



**UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA  
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**

**APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA À  
ANÁLISE ENERGÉTICA E AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS**

**Armando Teófilo dos Santos Pinto**  
**Eng<sup>o</sup> Mecânico e Mestre em Eng<sup>a</sup> Mecânica**

Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em  
Engenharia Mecânica

Orientador:           Doutor Paulo Manuel Cadete Ferrão  
Co-orientador:       Doutor João Carlos Godinho Viegas

Presidente:           Reitor da Universidade Técnica de Lisboa  
Vogais:               Doutor Eduardo Guimarães de Oliveira Fernandes  
                          Doutor Jorge Alberto Gil Saraiva  
                          Doutor Paulo Manuel Cadete Ferrão  
                          Doutor João Carlos Godinho Viegas  
                          Doutor Manuel de Arriaga Brito Correia Guedes  
                          Doutora Maria Luísa de Oliveira Gama Caldas

Dezembro de 2008



# APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA À ANÁLISE ENERGÉTICA E AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS

## RESUMO

O impacto energético e ambiental dos edifícios é cada vez mais importante nas sociedades contemporâneas, pelo consumo de energia e de recursos durante a fase de utilização dos edifícios, mas também pelas fases de construção e demolição. Encontra-se comprovado que os edifícios são responsáveis por cerca de 46% do consumo de energia primária no concelho de Lisboa, mas não se encontra apreciado o impacto da fase de construção e demolição.

No âmbito desta tese aplicou-se a metodologia de análise do ciclo de vida a edifícios, desde a fase de construção até à demolição, com o objectivo de avaliar os impactos ambientais directamente relacionados com o edifício, em particular avaliar as possíveis interações entre a fase de construção e a fase de utilização.

Para efectuar a análise do ciclo de vida foram inicialmente definidos os aspectos de conforto ambiental interior a satisfazer. Foram avaliados os impactos ambientais associados ao fabrico e à utilização de alguns materiais de construção e de instalações de edifícios de forma a possibilitar a ACV. Tendo em conta o impacto dos envidraçados nas necessidades energéticas na fase de utilização dos edifícios, foi efectuada a avaliação de diferentes soluções envidraçadas de forma a estabelecer áreas de vidro optimizadas que minimizem as necessidades energéticas de aquecimento, arrefecimento e iluminação. Foi avaliada experimentalmente a permeabilidade ao ar de edifícios Portugueses e foi avaliado o impacto da permeabilidade nas infiltrações de ar e nas necessidades de climatização para diferentes tipos de sistemas de ventilação, sendo apresentada uma proposta de limites a adoptar para os edifícios Portugueses.

Por fim a metodologia de ACV do edifício foi aplicada a casos de estudo sendo evidenciado que o impacto ambiental dos edifícios vai para além do consumo de energia na fase de utilização, pois a fase de construção de edifícios novos e de fim-de-vida pode corresponder a sensivelmente 30% do impacto ambiental do edifício. Se for considerado apenas a construção, fase de fim-de-vida e a energia para climatização, o impacto ambiental da construção é de sensivelmente 90% para o caso de Lisboa. Nos casos de estudo foi evidenciado que existe um ponto de optimização do nível de isolamento térmico dos elementos opacos a partir do qual as poupanças de energia associadas ao incremento da espessura do isolante térmico não compensam a carga ambiental nele incorporada. Por outro lado para reduzir o impacto ambiental dos edifícios é evidenciado que a concepção de edifícios que prevejam a reutilização dos elementos de construção mais pesados tem um peso que é cerca do dobro do associado à optimização do isolamento térmico do edifício.

**Palavras-chave:** sustentabilidade, edifícios, eficiência energética, ciclo de vida, declaração ambiental, qualidade do ambiente interior





# LIFE CYCLE ASSESSEMENT APPLIED TO THE ENVIRONMENTAL AND ENERGY ANALYSIS OF BUILDINGS

## ABSTRACT

The energy and environmental impact of buildings is very important in modern societies, because of the energy and resources consumption during the utilization phase, but also because of environmental burden during construction and demolition phases. For instance, in Lisbon Municipality the energy consumption in buildings is 46%, but the environmental burden of construction and demolition phase is unknown.

In this thesis it was done the Life Cycle Assessment of buildings, ranging from the construction phase until the demolition, with the purpose to evaluate the environmental impact directly related to buildings and possible interaction between construction and utilizations phase.

To carried out the Life Cycle Assessment it was defined the indoor environment condition that building should comply, namely it was calculated the air flow rates required to get reasonable indoor air quality in dwellings. It was evaluated the environmental impact related to the production and use of some construction materials to make possible the LCA of buildings. Having in mind the great importance of glazing in energy consumption during the utilization phase of buildings, it was evaluated the impact of glazed area, and glazing type on energy requirement related heating, cooling and lighting. Regarding the results obtained it is presented some recommendations for glazing and air tightness of Portuguese buildings. It was also appreciated the air permeability of building envelop and it was analysed the implication of air permeability in air infiltration and heating/cooling energy requirements of different ventilation systems and is proposed limits for building air tightness.

Finally, the LCA is applied to cases studies, proving that the environmental impact of buildings goes far beyond the energy consumption during the utilization phase. The construction and demolition phase are responsible for nearly 30% of the environmental impact of buildings. If we look only to construction/demolition and HVAC energy consumption the construction/demolition is responsible for nearly 90% of the environmental impact of buildings in Lisbon. In the assessment of the environmental impact of thermal insulation it was shown that we have a minimum for the thickness of thermal insulation were, the reduction in HVAC is lower than the increase in embody environmental impact of the material. In this study it is also shown that if buildings are design for disassembly and reuse of heavy construction elements (Structure, walls, floors, etc), the reduction in the environmental impact of building is almost the double of the reduction in environmental impact provided by the optimization of thermal insulation of the building.

**Key words:** sustainability, buildings, energy efficiency, life cycle, environmental declaration, indoor environmental quality



# APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA À ANÁLISE ENERGÉTICA E AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS

## AGRADECIMENTOS

Expresso o meu profundo reconhecimento a todos quantos contribuíram para a realização e bom termo deste estudo.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, nas pessoas do seu Directo Eng<sup>o</sup> Carlos Matias Ramos e do Chefe de Departamento de Edifícios, Eng<sup>o</sup> José Ângelo Vasconcelos de Paiva, onde me foi facultado todo o apoio técnico-científico que possibilitou a realização deste trabalho.

Ao Prof. Paulo Manuel Cadete Ferrão e ao Eng<sup>o</sup> João Carlos Godinho Viegas expresse o meu especial agradecimento pelo incentivo, disponibilidade, orientação e colaboração incansável prestados, sem o que seria muito difícil concluir esta tese

Ao Prof. Jorge Saraiva a amizade, o apoio e as profícuas conversas e reflexões.

Agradeço ao Prof. Eduardo Maldonado da FEUP o empréstimo das portas ventiladoras para realização dos ensaios de pressurização, ao Eng<sup>o</sup> Pina dos Santos do LNEC a cedência das células experimentais, ao Eng<sup>o</sup> Artur Brandão da Saint-Gobain Glass a cedência dos vidros para a realização dos ensaios, ao Eng<sup>o</sup> Artur Mexia da SAPA: Portugal a cedência dos caixilhos para as células experimentais e ao Eng<sup>o</sup> Ricardo Matias da Hydro Building Systems a cedência das portadas e das palas de sombreamento de alumínio.

Aos meus colegas e amigos do Núcleo de Componentes e Instalações um agradecimento pela colaboração prestada nas campanhas experimentais, nomeadamente na preparação das células de teste para o ensaio dos vãos envidraçados.



# APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA À ANÁLISE ENERGÉTICA E AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS

## ÍNDICE

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 - Motivação.....	1
1.2 - Objectivos da tese.....	9
1.3 - Questões de investigação .....	10
1.4 - Organização da tese .....	11
<b>2 - ESTADO DO CONHECIMENTO.....</b>	<b>13</b>
2.1 - Método de ACV .....	13
2.2 - ACV aplicada a edifícios .....	17
2.3 - Qualificação ambiental de materiais .....	23
2.4 - Reciclagem e resíduos.....	28
2.5 - Ambiente interior dos edifícios .....	31
2.5.1 - Conforto térmico .....	32
2.5.2 - Qualidade do ar interior e caudais de ventilação .....	40
2.6 - Consumo de energia nos edifícios durante a utilização .....	51
2.6.1 - Aspectos gerais .....	51
2.6.2 - Edifícios de escritórios .....	56
2.6.3 - Edifícios de habitação .....	59
2.7 - Métodos simplificados de avaliação ambiental de edifícios .....	64
2.8 - Definição do problema e metodologia .....	67
<b>3 - MÉTODO DE ACV ADOPTADO.....</b>	<b>71</b>
3.1 - Definição do objectivo e do âmbito da análise .....	71
3.2 - Condições de conforto térmico e de qualidade do ar interior .....	72
3.3 - Fase de inventário.....	74
3.3.1 - Fronteiras da análise .....	74
3.3.2 - Dados de origem, regras de corte e imputação .....	74
3.3.3 - Fim-de-vida - tratamento de resíduos .....	75
3.3.4 - Transporte.....	77
3.3.5 - Inventário dos recursos materiais .....	77
3.3.6 - Inventário dos recursos energéticos .....	79
3.4 - Avaliação dos impactes ambientais .....	82
3.4.1 - Perfil ambiental .....	82
3.4.2 - Caracterização.....	85
3.5 - Normalização e indicador ambiental único.....	86

<b>4 - ANÁLISE DE FACTORES CRÍTICOS PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E AMBIENTAL DOS EDIFÍCIOS .....</b>	<b>87</b>
4.1 - Construção e desconstrução.....	87
4.1.1 - Aspectos gerais .....	87
4.1.2 - Energia.....	87
4.1.3 - Transporte.....	88
4.1.4 - Vida útil e manutenção .....	89
4.1.5 - Materiais .....	92
4.1.6 - Fase de construção .....	110
4.1.7 - Fase desconstrução/demolição e tratamento de resíduos.....	143
4.2 - Desempenho térmico e energético de envidraçados nos edifícios .....	144
4.2.1 - Aspectos gerais .....	144
4.2.2 - Optimização da dimensão de palas horizontais de sombreamento .....	144
4.2.3 - Optimização da área envidraçada de edifícios de escritórios .....	153
4.2.4 - Edifícios de serviços do tipo administrativo - Solução de fachada dupla pele.....	173
4.2.5 - Optimização de envidraçados em edifícios do tipo residencial ou de serviços com ocupação contínua .....	183
4.2.6 - Síntese e valores de referência de consumo nominal de energia em edifícios .....	195
4.2.7 - Avaliação do impacte das caixilharias .....	196
4.2.8 - Avaliação do ciclo de vida de vãos envidraçados .....	199
4.2.9 - Método experimental proposto para a determinação do factor solar dos vãos envidraçados e simulação com ESP-r .....	203
4.2.10 - Notas conclusivas .....	207
4.3 - Ventilação, permeabilidade ao ar e eficiência energética .....	208
4.3.1 - Aspectos gerais .....	208
4.3.2 - Ensaios de pressurização .....	209
4.3.3 - Estudo de limites para a permeabilidade ao ar da envolvente.....	215
4.3.4 - Eficiência energética e ambiental de sistemas de ventilação .....	232
4.3.5 - Notas conclusivas .....	240
<b>5 - CASOS DE ESTUDO.....</b>	<b>243</b>
5.1 - Avaliação do ciclo de vida de um edifício de habitação multifamiliar .....	243
5.1.1 - Descrição do edifício.....	243
5.1.2 - Avaliação global do edifício.....	245
5.1.3 - Análise do efeito da estrutura de produção de energia eléctrica .....	248
5.1.4 - Análise do efeito do isolamento térmico elementos opacos.....	249
5.1.5 - Análise do efeito do isolamento térmico dos envidraçados.....	253
5.1.6 - Análise do efeito da temperatura interior de conforto .....	258
5.1.7 - Efeito da reciclagem e reutilização .....	260
5.1.8 - Síntese.....	261

5.2 - Avaliação do ciclo de vida de um edifício de habitação unifamiliar .....	264
5.2.1 - Descrição do edifício.....	264
5.2.2 - Avaliação global do edifício.....	267
5.2.3 - Análise do efeito da estrutura de produção de energia eléctrica .....	269
5.2.4 - Análise do efeito do isolamento térmico elementos opacos.....	270
5.2.5 - Análise do efeito do isolamento térmico dos envidraçados.....	275
5.2.6 - Análise do efeito da temperatura interior de conforto .....	280
5.2.7 - Análise do efeito da emissão de poluentes para o ar interior.....	282
5.2.8 - Efeito da reciclagem e reutilização .....	283
5.2.9 - Síntese.....	284
5.3 - Avaliação do ciclo de vida de um edifício de serviços.....	287
5.3.1 - Descrição do edifício e dos sistemas de climatização .....	287
5.3.2 - Avaliação do consumo de energia .....	292
5.3.3 - Avaliação global do edifício.....	295
5.3.4 - Avaliação global do edifício com uma fachada tradicional.....	298
5.3.5 - Avaliação de soluções alternativas para melhoria do desempenho térmico.....	300
5.3.6 - Síntese.....	301
<b>6 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>303</b>
6.1 - Contribuições da tese .....	303
6.1.1 - Análise do ciclo de vida.....	303
6.1.2 - Vãos envidraçados .....	307
6.1.3 - Permeabilidade ao ar e ventilação.....	309
6.1.4 – Proposta para análise da eficiência energética e ambiental dos edifícios .....	311
6.2 - Perspectivas de trabalhos futuros .....	312
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>313</b>

Lista dos Anexos em CD

ANEXO A - Análise de aspectos do conforto térmico associados aos envidraçados

ANEXO B - Determinação dos caudais de ventilação para habitações

ANEXO C - Célula experimental para ensaio de envidraçados – Descrição e resultados

ANEXO D - Ensaios de pressurização e estimativa da permeabilidade ao ar





# 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - MOTIVAÇÃO

Os impactes do desenvolvimento social e económico no meio ambiente ganharam importância pública com os resultados do estudo realizado pelo MIT, 1972 para o clube de Roma "*Limits to growth*" onde foram evidenciados os limites do ecossistema terra para suportar a tendência de crescimento demográfico e industrial verificado. Em 1992 foi publicado novo estudo pela mesma equipa, "*Beyond the limits*", onde foram confirmadas as principais conclusões do estudo inicial, sugerindo-se que passados cerca de 20 anos pouco havia sido efectuado para evitar os cenários mais pessimistas. Apesar do trabalho das nações unidas, para que fosse possível estabelecer acordos ambientais a nível global foi necessário passarem cerca de 20 anos sobre a conferência de Estocolmo, para que na cimeira da Terra em 1992 fosse possível obter alguns acordos (Ferrão, 1998), Agenda 21, Declaração do Rio, Convenção sobre a biodiversidade e convenção sobre o clima.

Embora tenham sido manifestadas preocupações com as alterações climáticas na conferência do Rio, apenas em 1997 na conferência de Quioto, foi possível estabelecer metas para limitar os problemas climáticos; tendo os compromissos internacionais que possibilitaram a rectificação desse protocolo sido estabelecidos na conferência de Marraquexe em 2001. No protocolo de Quioto prevê-se a redução de 6% das emissões de gases com efeito de estufa para atmosfera no período entre 2008 e 2012, tendo por base as emissões existentes em 1990. Para a Europa foi estabelecida uma redução de 8%. Tendo em conta o diferente estado de desenvolvimento dos países da EU, a Portugal foi concedida a possibilidade de aumentar em 27% as emissões de GEE (em relação a 1990) no horizonte de 2012, o qual em 2003 já se encontra ultrapassado (aumento de 37%).

Dos anos 70 para cá o paradigma da energia fóssil foi alterado da perspectiva do recurso finito para o recurso poluidor devido às emissões que contribuem para o efeito de estufa e, conseqüentemente, para o aquecimento global do planeta. Efectivamente, devido à queima de combustíveis fósseis na produção de electricidade, na industria e nos transportes e à desflorestação (Figura 1.1) as concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera subiram abruptamente durante o último século (Figura 1.2), bem como se registou um aumento de 0,6 a 1,2 °C da temperatura (Figura 1.3) e prevê-se para este século uma subida adicional entre 1,4 a 5,8°C, com conseqüências imprevisíveis. Nos últimos anos são mais frequentes os acidentes naturais e as situações extremas quer de calor, quer de frio, causadoras de doenças e de mortes. Nas vagas de calor ou de frio existe um risco acrescido de mortes de 13%. Em Portugal, na vaga de calor de 2003, houve um excesso de mortes de 2367 (Araújo, 2007). Neste último século também se registou um crescimento acentuado da população (Figura 1.4), o que aumentou ainda mais a pressão sobre o ambiente.

O sector dos edifícios em 2004 a nível do planeta foi responsável por cerca de 8% das emissões de CO<sub>2</sub> (Figura 1.1). Na Europa (EU 25), em 2004, o sector doméstico e dos serviços foi responsável por cerca de 41% do consumo de energia final e de emissões de CO<sub>2</sub>, enquanto em Portugal o consumo de energia nesses sectores representou 30% (17% doméstico e 13% serviços) (CE, 2007) e tem tendência de crescimento, Figura 1.5.

Neste contexto o sector dos edifícios tem um contributo importante para a sustentabilidade, quer devido aos recursos consumidos na fase de utilização e na fase de construção (que fazem parte do sector industria).

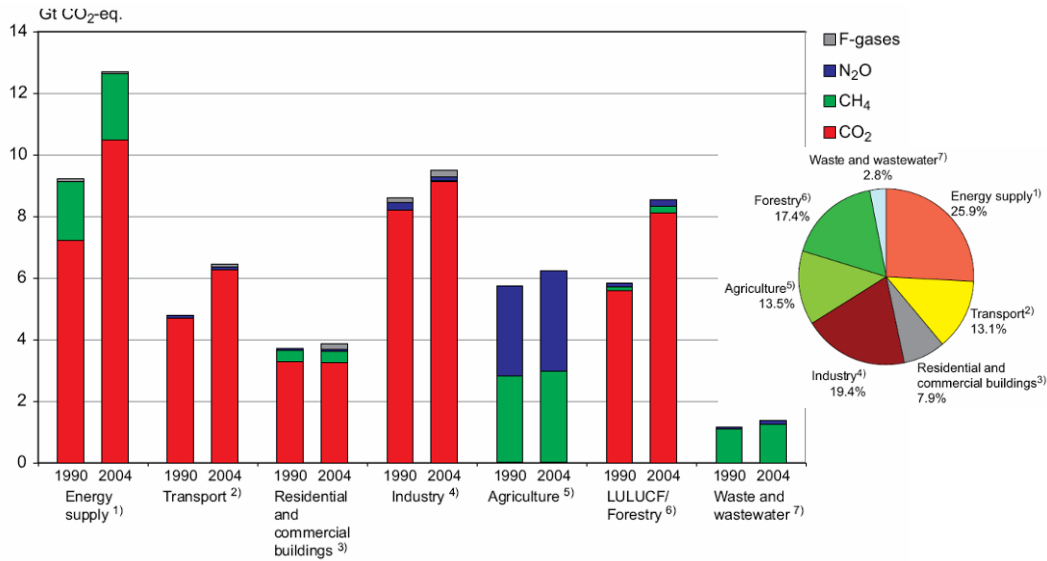


Figura 1.1 – Fontes de emissão de CO<sub>2</sub> 1990 e 2004<sup>1</sup>

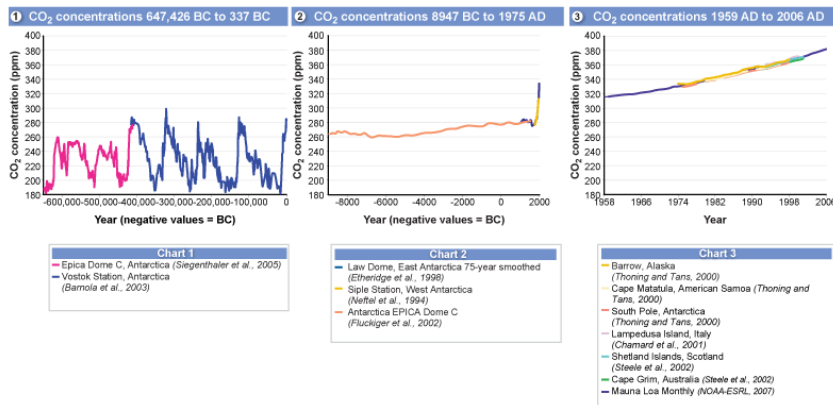


Figura 1.2 – Evolução da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera

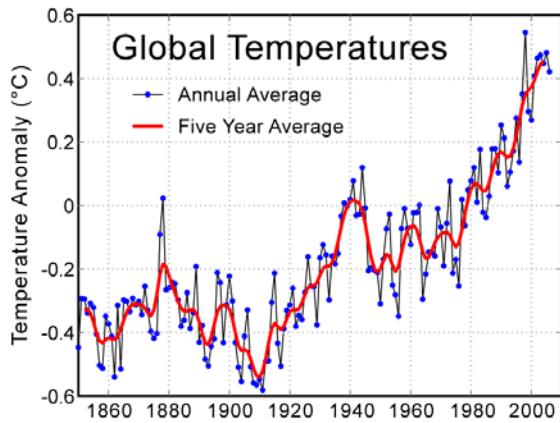


Figura 1.3 – Evolução da temperatura média<sup>2</sup>

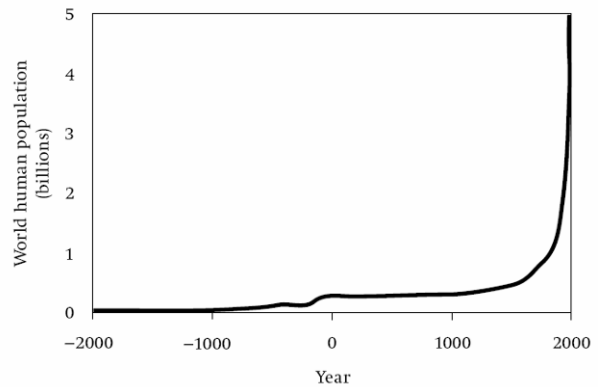


Figura 1.4 – Evolução da população mundial<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fonte: Rogner, 2007.

<sup>2</sup> Fonte: <http://www.stop-global-warming.com/>

<sup>3</sup> Fonte: Hiller, 2004.

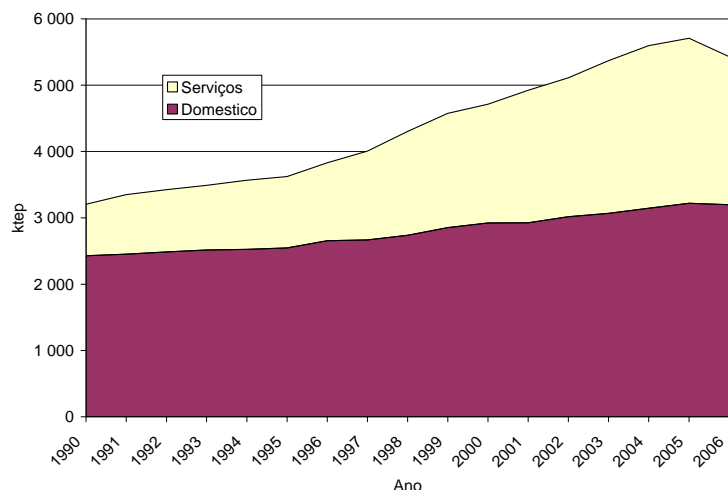


Figura 1.5 – Evolução do consumo de energia primária no sector doméstico e serviços<sup>1</sup>

A importância da energia consumida nos edifícios varia de país para país, dependendo do nível de actividades económicas desenvolvidas, padrões de conforto e clima. Nas estatísticas do sector edifícios encontram-se incluídos todos consumos de energia nos edifícios, os que se associam de uma forma directa ao edifício e à sua envolvente (exemplo, energia para climatização e iluminação) e os consumos associados às actividades nele desenvolvidas, sobre as quais estes têm um impacto indirecto (exemplo, consumo de energia de equipamentos de escritório, electrodomésticos, elevadores, etc).

O consumo de energia fóssil nos edifícios, além do impacte ambiental afecta a economia da União Europeia, pois a dependência da EU em relação aos combustíveis fósseis é apontada como uma das causas para a perda de competitividade e prosperidade (CEC, 2005), Figura 1.5.

Apesar da energia consumida na fase de utilização dos edifícios ser normalmente a parcela preponderante, a energia consumida na fase de construção dos edifícios (energia incorporada nos materiais) pode ser 15% (Harris, 1999) ou 20% (Wu, 2005) da energia consumida no ciclo de vida do edifício. Além do consumo de energia, o sector da construção apresenta impactes ambientais importantes (Harris, 1999; UEAtc, 2005; NRC, 1999; Erlandsson, 2003; Mora, 2007), pois é responsável por:

- 50% dos recursos extraídos da natureza.
- 40% do consumo de energia (inclui a fase de utilização dos edifícios).
- 50% do total dos resíduos gerados.
- 17% da água potável consumida.
- Sensivelmente 7 ton de resíduos na construção de uma habitação nos EUA .
- 0,5 ton/ano de resíduos da construção e demolição per capita na EU.

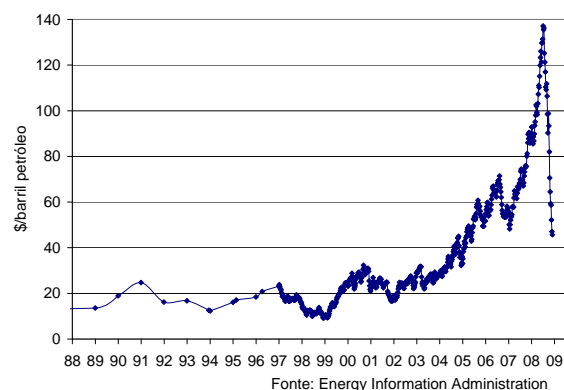


Figura 1.6 – Evolução do preço do barril de petróleo

<sup>1</sup> Fonte: DGGE.

- 25% da madeira recolhida.
- 7% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, em grande parte devido à produção de betão (sensivelmente 1 kg CO<sub>2</sub>/kg cimento) com um consumo anual estimado de 2000 milhões de ton.
- 24% do consumo de energia da indústria no UK em 1996, em que cerca de 12% corresponde à produção e os restantes 12% ao transporte de materiais de construção.
- É estimado que a energia consumida na construção e transporte dos materiais de construção é de 8% (350 PJ/ano) da energia primária no UK, representando um consumo de cerca de 6 ton de materiais de construção por pessoa.
- Na EU os edifícios são responsáveis por mais de 40% do consumo de energia e o sector da construção é estimado que gere 40% de todos os resíduos provocados pelo homem (450 milhões de ton na EU, 180 milhões de toneladas excluindo os trabalhos associados a estradas e de escavação) (CIB, 1999).
- No UK em 1996 (Baldwin, 1998) cerca de 50% das emissões de CO<sub>2</sub> deviam-se ao consumo de energia nos edifícios para aquecimento, arrefecimento e iluminação, 10% eram associados à fase de construção e cerca de 22% devido ao transporte das pessoas para os edifícios.
- No UK a indústria da construção consome 6 ton de material por pessoa, 20% para infra-estruturas, 50% para manutenção da construção.
- Nos escritórios no UK (Baldwin, 1998) cerca de 43% da água é gasta nas sanitas, 20% nos urinóis, 27% na limpeza e 9% nas cantinas.

Tendo em conta o impacto da construção no consumo de recursos, na produção de resíduos e na sociedade quer em termos económicos quer em termos sociais considera-se que estes devem ser aspectos a incluir na análise da eficiência energética e ambiental dos edifícios.

Em Tampa, 1994, na primeira conferência internacional sobre construção sustentável Kibert e Alii definiram construção sustentável como “a criação e a gestão responsável de um ambiente construído saudável baseado em recursos eficientes e nos princípios ecológicos”. Na Holanda (CIB, 1999) a construção sustentável é definida como a forma de minimizar os “impactes na saúde e no ambiente causados pelo processo de construção ou pelo edifício ou pelo ambiente construído”. De acordo com a definição apresentada por Mora (Mora, 2007) a construção sustentável é encarada como aquela que integra critérios ambientais na fase de projecto, na fase de construção, de manutenção e na fase de demolição.

Pelos exemplos atrás referidos, a definição de construção sustentável é complexa e por vezes não é fácil de materializar, existindo um grande número de países nos quais não se encontra definido o termo “construção sustentável” (CIB, 1999). Contudo, nos diversos países existem estratégias variadas para minorar o impacte ambiental da construção:

- promovendo a redução do consumo de energia, de água potável e de recursos minerais;
- limitando a criação e aplicação de materiais contendo substâncias perigosas;
- promovendo um ambiente interior saudável;
- promovendo a conservação de áreas naturais e da biodiversidade (gestão adequado do solo);
- promovendo um planeamento urbano que assegure sentido de comunidade e redução do uso de transportes.

Em face destes novos requisitos aplicáveis à construção, o CIB apresenta a evolução do paradigma da construção (CIB, 1999) em que da optimização de custos, tempo e qualidade se passa a incluir também o consumo de recursos, as emissões, a biodiversidade e os aspectos de equidade social e cultural, Figura 1.7.

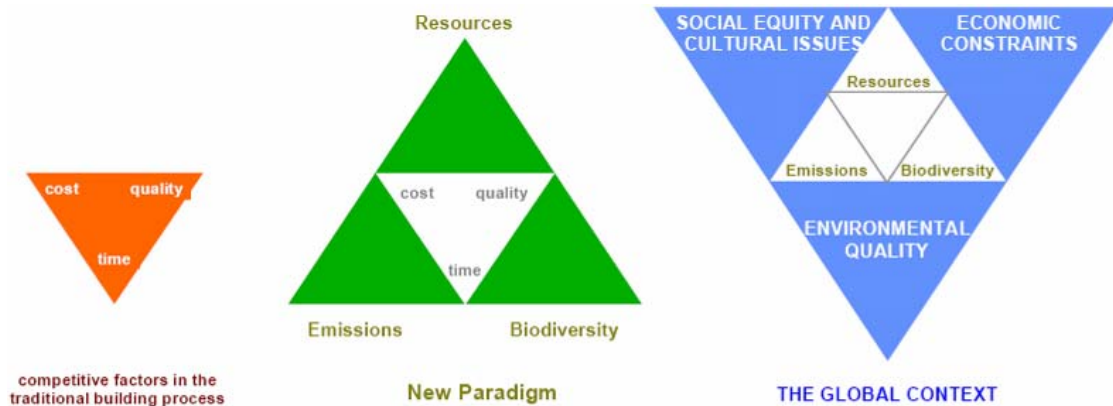


Figura 1.7 – O novo paradigma da construção sustentável num contexto global (CIB, 1999)

Apesar da utilização generalizada da expressão “construção sustentável” é relevante distinguir entre a sustentabilidade da actividade de construção e a sustentabilidade do produto construído (Mora, 2007). Os impactes da construção ocorrem ao longo do seu ciclo de vida, desde a fase da ideia até ao desmantelamento do edifício, Figura 1.8.

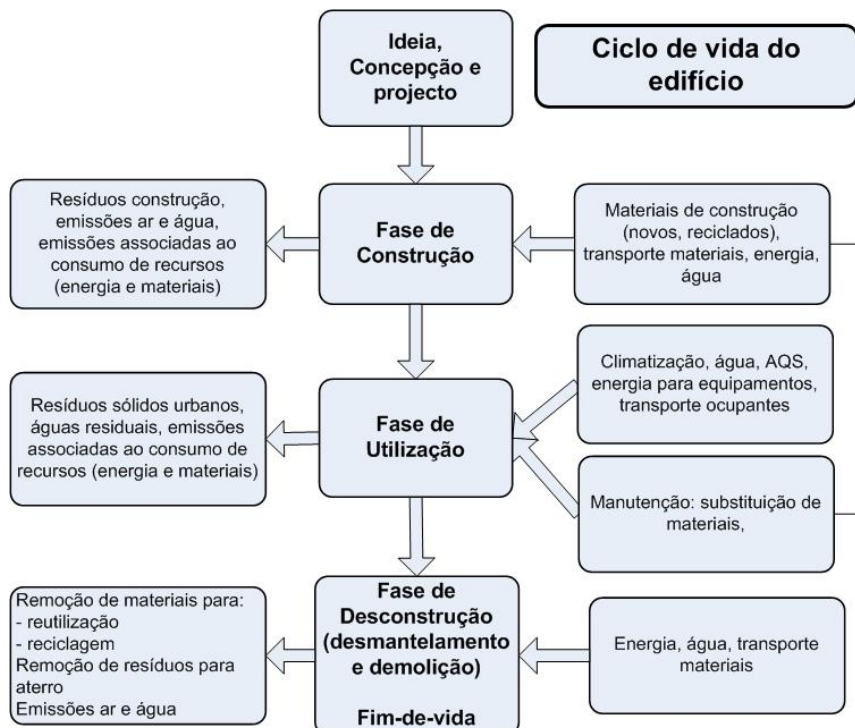


Figura 1.8 – Ciclo de vida do edifício

Os impactes ambientais da construção são variados (Pinheiro, 2006), podendo os mais relevantes ser agrupados em: alteração do uso do solo, contaminação do solo e das linhas de água, afectação das espécies naturais e seus habitats, intrusão visual, alteração da paisagem natural, extracção e consumo de matérias-primas, ruído resultante das

actividades de construção e de operação, consumo de energia e as consequentes emissões e a produção de resíduos da construção e demolição.

A fase da “ideia, concepção e projecto” é uma fase critica para a sustentabilidade da construção, pois através de uma adequada selecção de materiais/sistemas de construção poderão ser minimizados os impactes ambientais na fase de construção/desconstrução e na fase de utilização. Além disso na fase de ideia é onde pode ser concretizado o maior impacte ambiental que corresponde à transformação de uma área natural numa área urbanizada. Efectivamente, Portugal é dos países com maior área construída na EU (DGA, 2001), Figura 1.9.

A fase de construção, envolve a construção nova ou a reabilitação, sendo conjuntamente com a fase de demolição uma fase com impacte perceptível no local e na sua envolvente devido ao ruído provocado, emissão de poeiras e ao transporte de materiais e resíduos, etc. Nesta fase, além dos impactes ambientais associados à actividade de construção, são também incorporados os impactes ambientais associados ao fabrico e transporte dos materiais de construção.

A fase de utilização do edifício corresponde ao período de exploração onde os impactes ambientais decorrem das actividades nele desenvolvidas, sendo de salientar o consumo de energia para climatização, iluminação, equipamentos e produção de água quente sanitária (AQS), bem como os materiais consumidos nas intervenções de manutenção e nas actividades desenvolvidas.

A fase de desconstrução corresponde à fase de fim-de-vida do edifício, em que este deve ser desmantelado de forma selectiva e efectuada uma triagem dos materiais tendo em conta a sua perigosidade e a possibilidade de reutilização, reciclagem, incineração ou aterro. Para minorar os impactes da desconstrução é fundamental prever na fase de projecto a possibilidade de desmontagem.

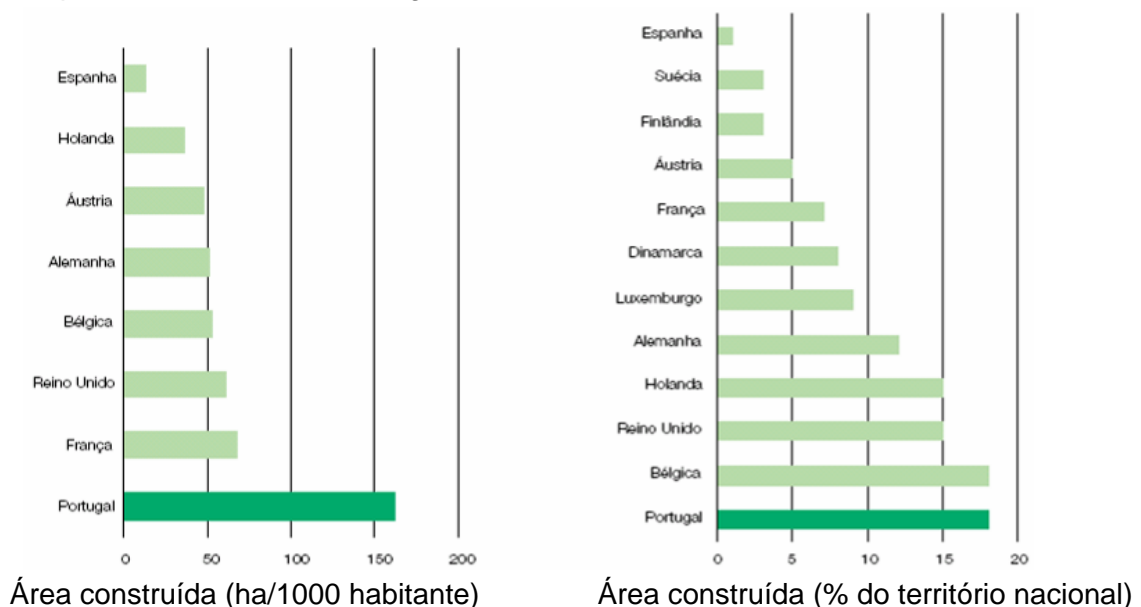


Figura 1.9 – Indicador da área construída (DGA, 2001)

No relatório do (CIB, 1998) encontra-se uma síntese das preocupações ambientais para uma construção sustentável, Quadro 1.1. Para a construção sustentável deve atender-se ao múltiplos decisores envolvidos nas diversas fase da vida útil do edifício (os projectistas, os donos, os ocupantes, etc) e à suas diferentes necessidades de informação

(Peuportier, 2001). Neste domínio salienta-se que os ocupantes/utilizadores são um factor chave no cumprimento das metas definidas na fase de projecto.

Quadro 1.1 – Preocupações para uma construção sustentável CIB (CIB, 1998)

<b>Recursos</b>	<b>Questões principais</b>	<b>Boas práticas</b>
Ocupação do solo	Uso eficiente do solo	Edifícios multi-funcionais, aproveitamento da zona enterrada
	Longevidade dos edifícios	Projectar para a flexibilidade/adaptabilidade Projectar tendo por base ACV e ACC Seleccionar materiais com qualidade e durabilidade Perspectivar necessidades e requisitos de futuros utilizadores
	Avaliação do local	Considerar o ambiente local (clima, topografia, impacto visual, ruído, economia local)
	Aproveitamento do parque edificado	Reabilitação/conversão dos edifícios existentes Análise renovação/demolição
	Protecção da natureza	Assegurar protecção da flora e da vida selvagem
Energia	Minimizar o recurso a transporte particular	Localizar o edifício de forma a minimizar os recursos a meios de transporte
	Eficiência energética do edifício	Projecto integrado para eficiência energética integrando a qualidade térmica da envolvente, os sistemas de iluminação e climatização Integração de produção de energia renovável Assegurar o respeito pela qualidade do ambiente interior Integração de sistemas de gestão de energia
Água	Poupança do consumo de água potável	Integrar equipamento de poupança de água e de aproveitamento de águas cinzentas
	Redução das águas residuais	Sistemas de drenagem de água (sistemas de compostagem)
Materiais	Gestão dos resíduos	Sistemas integrados de recolha de resíduos Utilização dos resíduos orgânicos para produção de energia Gestão local dos resíduos de construção e de demolição
	Materiais duráveis e não-tóxicos	
	Materiais recicláveis/reutilizáveis	Projectar para ser possível desmontar e para a reciclagem dos materiais com menor vida útil
	Utilização eficiente de matérias-primas	Utilização de materiais locais, utilização de materiais leves, materiais recicláveis
	Aumentar a durabilidade	Fornecer manuais de utilização e manutenção Etiquetar os materiais para facilitar a remoção selectiva e a reciclagem

No sentido de dar resposta às necessidades de avaliação e qualificação ambiental dos edifícios têm sido desenvolvidos estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV)<sup>1</sup> de

<sup>1</sup> LCA – *life cycle assessment*, ACV – avaliação do ciclo de vida

materiais de construção e de edifícios, bem como, sistemas simplificados de avaliação e certificação ambiental dos edifícios. Os métodos baseados na ACV são designados métodos quantitativos, enquanto os segundos são designados métodos qualitativos (Forberga, 2004).

Os métodos baseados na ACV têm uma utilização restrita, devido à grande quantidade de informação que necessitam, sendo por isso mais generalizada a utilização dos modelos qualitativos. São exemplos de métodos qualitativos o inglês BREAM implementado em 1990 (Baldwin, 1998), o americano LEED (USGBC, 2005) e o francês HQE (certivea, 2006). Nestes métodos, é exigido o cumprimento de requisitos básicos (por ex. os requisitos mínimos regulamentares ou a superação dos requisitos regulamentares em determinada percentagem) e são atribuídos créditos pela adopção de medidas consideradas eficientes do ponto de vista ambiental, sendo a qualificação do edifício função do total de créditos obtidos. Nos modelos qualitativos os critérios de ponderação dos vários aspectos ambientais são determinados normalmente com base em painéis de peritos que qualificam a relevância de cada um dos aspectos, sendo então estabelecida a matriz de avaliação (Dickie, 2000).

Para a avaliação do desempenho ambiental de materiais uma primeira abordagem consistiu na quantificação da energia incorporada, ou seja, a quantidade de energia envolvida no fabrico de determinado material ou componente (Roaf, 2003). Na Holanda (Anderson, 2000) e no UK (Anderson, 2002) foi estabelecido um método de preferência ambiental para a selecção de materiais de construção e de soluções construtivas.

Em Portugal e noutros países, alguns dos princípios da construção sustentável encontram-se integrados na regulamentação, estando previsto desde 1951 no RGEU os aspectos de durabilidade, segurança, habitabilidade, etc. Posteriormente, com as preocupações energéticas existentes essencialmente a partir do choque petrolífero dos anos 70, foram desenvolvidos regulamentos destinados a reduzir as necessidades energéticas de climatização dos edifícios (RCCTE, 1990 e RSECE, 1998), onde se estabeleceram requisitos, por exemplo, para o isolamento térmico da envolvente (opaca e envidraçada) e para o aproveitamento dos ganhos solares.

Em 2002 foi publicada a Directiva relativa ao desempenho energético dos edifícios (Directiva nº 2002/91/CE), onde são apresentados alguns requisitos para incrementar a eficiência energética no sector dos edifícios. Em Portugal, foi efectuada a revisão da regulamentação térmica dos edifícios (RSECE, 2006 e RCCTE 2006) e foi introduzida a certificação energética dos edifícios (SNCEQAI, 2006). A nova legislação traz substanciais diferenças de verificação face à anterior. No caso de edifícios abrangidos pelo RCCTE salienta-se a necessidade de um aumento do nível de isolamento da envolvente, uma ponderação da eficiência dos sistemas de climatização e a obrigatoriedade de instalação de sistemas de colectores solares para AQS.

Para além da legislação sobre a certificação energética dos edifícios (em que o edifício poderá ser responsável por parte das necessidades energéticas) a Comissão Europeia e o governo Português têm legislado no sentido de melhorar a eficiência dos diversos equipamentos consumidores de energia utilizados nos edifícios, por exemplo (RE, 1992): frigoríficos, máquinas de lavar, etc.

Estes instrumentos legais destinam-se a dotar o edifício de meios que permitam minimizar os consumos de energia na sua exploração podendo, no entanto, contribuir para aumentar a quantidade de materiais consumidos na fase de construção.



Neste sentido, considera-se pertinente estender a análise do consumo de energia da fase de utilização para as fases que envolvem a construção, a demolição e o tratamento dos resíduos, englobando todo o ciclo de vida do edifício, pois num clima ameno como o Português o peso relativo do consumo de energia na fase de construção tenderá a ser superior ao existente em climas mais frios, podendo existir pontos de optimização diferentes dos correspondentes apenas à minimização do consumo de energia na fase de utilização.

## **1.2 - OBJECTIVOS DA TESE**

De acordo com estudos realizados em vários países sobre o consumo de energia na fase de utilização dos edifícios esta pode corresponder a cerca de 75% a 95% do consumo de energia no ciclo de vida do edifício. Estes pressupostos têm conduzido a que a regulamentação térmica aponte num crescimento do isolamento da envolvente e consequentemente um acréscimo de consumo de materiais. Tendo em conta que o valor de 75% a 95% do consumo de energia na fase de utilização se reporta a estudos realizados em países com climas mais severos e, portanto, com consumos de energia de climatização superiores aos aplicáveis a Portugal, tem-se por objectivo nesta dissertação avaliar a importância da energia consumida e os impactes ambientais no ciclo de vida de edifícios para a construção e clima nacionais, ponderando os impactes da fase de construção e da fase de utilização, para se poder contribuir com recomendações para uma construção mais sustentável.

Assim, neste trabalho defende-se a tese de que será recomendável estabelecer limites sobre os recursos consumidos na construção, pois em alguns casos estes não chegam a ser rendibilizados no decurso da utilização, sendo tão importante construir para reutilizar/reciclar como construir para a conservação de energia de climatização.

Neste trabalho avaliou-se de uma forma mais detalhada o impacte das seguintes características:

- Impacte ambiental associado aos materiais e soluções de construção;
- Nível (resistência térmica) de isolamento térmico da envolvente opaca;
- Permeabilidade ao ar da envolvente e interacção com os sistemas de ventilação de habitações;
- Dimensão e propriedades dos vãos envidraçados.

Efectivamente, apesar das preocupações com a conservação de energia nos edifícios, não se encontrava incluído na regulamentação térmica portuguesa (RCCTE, 1990 e RSECE, 1998) o efeito da permeabilidade ao ar no balanço energético e na nova legislação ainda não tem uma formulação exigencial e crê-se que possa ser uma parcela com um impacte acrescido nas novas construções com elevados níveis de isolamento. Nesse sentido teve-se por objectivo avaliar a permeabilidade ao ar de edifícios Portugueses, apreciar a sua contribuição para o balanço térmico e estimar valores limites que sejam adequados face à importância das trocas de calor associadas à renovação de ar.

Nesta tese é aprofundada a análise do impacte térmico dos envidraçados devido ao recurso a áreas envidraçadas cada vez maiores em oposição à construção tradicional Portuguesa com áreas envidraçadas mais contidas, o que se crê está a aumentar desnecessariamente as necessidades de arrefecimento.

Pretende-se avaliar se existe um ponto óptimo para a espessura de isolamento térmico que minimize os impactes ambientais no ciclo de vida do edifício e a comparação desse óptimo face ao ponto que minimiza os custos.

Na avaliação da carga ambiental incorporada na fase de construção face às economias de energia durante a utilização foi considerado que eram mantidas condições de conforto e de QAI aceitáveis para a ocupação humana. Nesse sentido são consideradas as condições de conforto aplicáveis a edifícios com sistemas de climatização e as condições de conforto adaptativo aplicáveis a edifícios não climatizados, para avaliar a possibilidade de dispensar a instalação de sistemas mecânicos de climatização. Na quantificação dos caudais de ventilação são utilizadas as recomendações existentes para edifícios de serviços. Por outro lado, nos edifícios de habitação as recomendações internacionais são mais dispare, pelo que neste trabalho se teve por objectivo estimar os caudais de ventilação adequados para edifícios de habitação em Portugal, que contemplem o clima Português, as emissões de materiais, os caudais de ventilação de base e de ponta críticos para o dimensionamento dos sistemas de ventilação.

Para complementar as análises individuais e validar a pertinência dos resultados anteriores a metodologia de ACV foi aplicado ao estudo de três edifícios para avaliar a importância da fase de construção vs fase utilização e daí se poderem extrair conclusões quanto às linhas orientadoras para uma construção mais sustentável.

Os resultados obtidos com esta tese podem servir de suporte técnico à certificação ambiental de edifícios, bem como à revisão dos parâmetros de qualidade especificados na regulamentação nacional relativa à térmica de edifícios e aos sistemas de climatização.

### **1.3 - QUESTÕES DE INVESTIGAÇÃO**

Face ao estado actual dos conhecimentos e tendo em conta a incerteza e a quantidade de informação necessária para a ACV de edifícios nesta tese pretende-se contribuir com respostas às seguintes questões de investigação:

1. Avaliar a importância relativa do impacte ambiental dos materiais e da construção no ciclo de vida de edifícios Portugueses, com ênfase nos trocas de calor associadas ao nível de isolamento térmico da envolvente opaca, envidraçados e à utilização dos sistemas de climatização.
2. Avaliar o impacte dos envidraçados nas condições de conforto e no desempenho térmico de edifícios em Portugal e averiguar quais as condições optimizadas para a utilização dos envidraçados na envolvente. Tendo em conta a pertinência das propriedades térmicas dos envidraçados e a dificuldade em obter valores para soluções envidraçadas complexas, procura-se averiguar a possibilidade de utilizar um método experimental simplificado para obter o factor solar de um vão envidraçado com dispositivos de protecção solar.
3. Avaliar se a permeabilidade ao ar da envolvente é um parâmetro relevante para o desempenho energético dos edifícios e para assegurar a QAI em Portugal. Caso seja, qual deve ser a permeabilidade ao ar adequada dos edifícios portugueses de forma a minimizar as perdas térmicas e as necessidades energéticas.

#### **1.4 - ORGANIZAÇÃO DA TESE**

Esta tese encontra-se organizada em 6 capítulos. No capítulo 2 é efectuado o estado da arte e justificado a necessidade aplicar a metodologia de análise de ciclo de vida aos edifícios e enunciada a metodologia seguida nesta tese. No capítulo 3 é estabelecido o método de análise de ciclo de vida adoptado neste trabalho, sendo definidos os critérios de conforto térmico e as necessidades de ventilação necessários para estimar as necessidades energéticas de climatização dos edifícios.

No capítulo 4 é efectuada a análise dos factores considerados pertinentes para a eficiência energética e ambiental dos edifícios, onde se detalham os impactes ambientais dos materiais e componentes na fase de construção e de desconstrução do edifício, é efectuada a análise da eficiência energética e ambiental de vãos envidraçados e do impacte da permeabilidade ao ar da envolvente dos edifícios na eficiência energética e ambiental.

No capítulo 5 são apresentados os três casos de estudo de edifícios onde é aplicado o método de ACV para avaliar a relevância das construções e testadas algumas estratégias para reduzir o impacte ambiental dos edifícios e no capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais deste trabalho de investigação e perspectivas de trabalhos futuros.



## 2 - ESTADO DO CONHECIMENTO

### 2.1 - MÉTODO DE ACV

A ACV é a técnica de análise ambiental com o objectivo mais alargado, quer em termos espaciais, quer temporais, estando na base de processos como o rótulo ecológico, o projecto de produtos para o ambiente ou a produção mais limpa (Ferrão, 1998).

A ACV é um método para a avaliação do impacto ambiental de um produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida, desde a extracção das matérias-primas até à deposição final do produto na natureza, no qual são identificados e quantificados os recursos consumidos e a poluição gerada. A *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) foi a primeira organização internacional que estudou sistematicamente o princípio da ACV e desenvolveu uma metodologia - o triângulo SETAC. Posteriormente a ISO veio a normalizar a ACV através da norma ISO 14040, 2006. De acordo com a norma ISO 14040, que se pode aplicar a um objecto simples até um sistema mais complexo como um edifício, estão definidas quatro fases (Figura 2.1):

- Fase 1 - Definição do objectivo e do âmbito da análise (unidade funcional)
- Fase 2 - Inventário dos processos envolvidos, com enumeração das entradas e saídas do sistema (tabela de inventário)
- Fase 3 - Avaliação dos impactos ambientais associados às entradas e saídas do sistema (classificação, caracterização e normalização)
- Fase 4 - Interpretação dos resultados

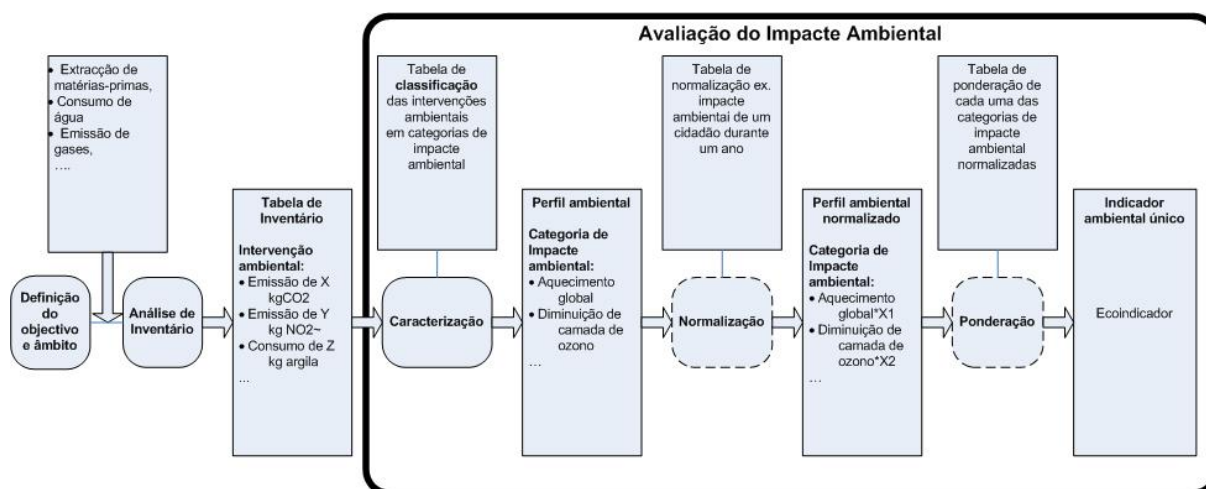


Figura 2.1 - Fases do processos de Avaliação do Ciclo de Vida

A definição do objectivo e do âmbito da análise implicam a definição de uma unidade funcional, que serve de base à quantificação do desempenho do produto ou serviço, em relação ao qual é realizado o inventário. Nesta fase é definida a função do produto ou serviço, as fronteiras temporais e espaciais para análise do sistema, as hipóteses consideradas, as limitações do estudo e a qualidade dos resultados pretendidos.

A fase de inventário consiste na identificação e enumeração das entradas e saídas do sistema. Tendo em conta a complexidade dos processos envolvidos e a informação disponível, nem sempre é possível realizar uma ACV completa, limitando-se esta

normalmente aos processos mais relevantes. Na fase de inventário, as fontes de informação podem ser específicas do processo em análise ou poderá recorrer-se a bases de dados.

Da fase de inventário resulta uma grande quantidade de dados correspondentes às intervenções ambientais, que impõe a sua redução a um conjunto limitado de informação, que constitui a 3ª fase da ACV, a fase de “avaliação de impactes ambientais”. Esta fase tem como principal objectivo a quantificação do contributo das diversas intervenções ambientais para um conjunto de “categorias de impacte ambiental” consideradas relevantes. Para esse efeito são seguidos os seguintes passos, Figura 2.1:

- Tabela de inventário das intervenções ambientais resultantes da fase 2;
- Definir as categorias de impacte ambiental prioritárias (Quadro 2.);
- Definir os factores de ponderação dos contributos das diversas intervenções ambientais para cada categoria de IA, ou seja estabelecer a matriz de conversão das intervenções em impactes ambientais (classificação);
- Caracterizar as intervenções em impactes ambientais com base na matriz de conversão das intervenções em impactes ambientais. A este resultado também se chama “perfil ambiental” do produto ou serviço ou o “eco-perfil”;
- Definição de um perfil ambiental de referência para a normalização do perfil ambiental do produto ou serviço;
- Normalização do perfil ambiental face ao perfil de referência;
- Definição de factores de ponderação do perfil ambiental normalizado para obtenção de um indicador único, com base na soma do produto dos valores normalizados pelos factores de ponderação.

No Quadro 2. apresentam-se as categorias de impacte ambiental prioritárias consideradas por algumas instituições ou modelos, de onde se conclui haver um consenso na utilização de apenas algumas dessas categorias.

Os factores de ponderação dos contributos das diversas intervenções ambientais para cada categoria de IA, são efectuados normalmente por comparação com o seu efeito relativo a uma intervenção ambiental de referência. Por exemplo, no caso dos GEE, as intervenções ambientais são convertidas em CO<sub>2</sub> equivalente. Deste modo, a emissão de 1 kg de CFC-11 corresponde a 4000 kgCO<sub>2eq</sub> (Ferrão, 1998).

Com o perfil ambiental de um produto ou serviço é possível efectuar uma primeira comparação entre produtos semelhantes. Contudo, é conveniente dispor da importância relativa de cada uma das categorias de impacte ambiental para que seja possível uma comparação mais fácil entre produtos. Efectivamente, se na comparação de dois produtos, um apresentar melhor desempenho face à categoria “efeito de estufa” e outro na categoria “diminuição da camada de ozono” será necessário dispor de impactes normalizados e ponderados para ser possível aferir qual é a solução que minimiza os impactes ambientais. Nesse sentido, é usual comparar o perfil ambiental do produto com um perfil de referência, chamando-se a este processo a normalização.

Quadro 2.1 - Exemplos de categorias de impacto ambiental

	CML (1992)	SETAC (1996)	Eco-indicator ISO	Ardenne, 2004	Erlundsson, 2003	Gonzalez, 2002	Wu, 2005	Peuportier, 2001	Junilla, 2004	UEAtc, 2005	XP-P 01-010, 2004	Howard, 1999	Chevalier, 1996	CIB, 1999	ASHRAE 189, 2007
Efeito de estufa /Aquecimento global(kg CO <sub>2</sub> eq 100 anos)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Diminuição da camada de ozono (kgCFC11)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Acidificação(kgSO <sub>2</sub> -eq)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Formação fotoquímica de oxidantes Smog de Verão kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ethene)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Smog de Inverno			x												
Toxicidade humana (kg de peso humano-Peup: kg-tox-UEAtc, UK)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	xar	x	x	x	x	x
Carcinogéneo			x												
Partículas em suspensão no ar				x											
Odor m <sup>3</sup> de ar contaminado (referência amónia)								x							
Poliuição do ar (m3)											x				
Ecotoxicidade/Pesticidas (m <sup>3</sup> água poluída-Peup: kg-tox-UEAtc, UK)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Eutrofização(kgPO <sub>4</sub> eq) fosfatos (Wu - NO3-pocp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Metais pesados (kgPb)				x	x	x	x	x	x		x	x			
Poliuição da água (m3)											x				
Libertação de calor	x														x
Odores	x	x													x
Ruído	x	x													x
Utilização do solo															x
Depleção de recursos bióticos (com vida)	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
Depleção de recursos abióticos (relação entre recursos consumidos e os recursos conhecidos x10 <sup>9</sup> - Peup) E-9	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
Consumo de água (m3)								x	x	x	x	x			
Consumo de energia (J)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
Energia primária total											x	x			
Energia renovável											x	x			
Energia não renovável											x	x			
Resíduos sólidos (kg)									x	x	x	x	x	x	x
Resíduos valorizados											x	x			
Resíduos eliminados											x	x			
Resíduos perigosos											x	x			
Resíduos não perigosos											x	x			
Resíduos inertes											x	x			
Resíduos radioactivos											x	x			
Resíduos radioactivos dm3								x							
Afectação dos ecossistemas e paisagem													x	x	x
Transporte (Mg.km)									x	x					

Notas do Quadro 2.:

q - qualitativa

y - Kg antimónio eq/UF

No documento (CIB, 1999) acresce: Ozono troposférico, Químicos, Água terrestre, Ambiente marinho e na costa, Ambiente urbano, Perigos tecnológicos e naturais.

Na norma NF P 01-010, 2004 acresce uma apreciação qualitativa da contribuição para: conforto olfactivo, visual, acústico, higrtermico, afectação da biodiversidade, poluição do solo e uma apreciação semi-qualitativa da contribuição para a QAI e para a qualidade da água.

Para a normalização é usual adoptar como perfil de referência o impacte ambiental médio de um cidadão durante um ano, Quadro 2.2, que apresenta diferenças que estão relacionadas com os diferentes perfis de consumo das populações de cada país e com o sistema de abastecimento energético. No estudo REGENER, 1997 para normalizar os resultados foi adoptado o perfil ambiental de uma habitação de referência por permitir uma comparação mais fácil do objecto do estudo.

Quadro 2.2 - Factores de normalização - um cidadão médio

	Unidade	Europa (REGENER, 1997)	Dinamarca (REGENER, 1997)	UK (Howard, 1999)	Portugal
GWP (potencial de aquecimento global)	kg CO <sub>2</sub> eq /p/ano	13100	8700	12270	5750 <sup>1</sup>
ODP (potencial de destruição da camada de ozono)	kg CFC 11 eq /p/ano	0,92	0,20	0,29	
Acidificação	kg SO <sub>2</sub> eq /p/ano	113	124	58,88	
Eutrofização/Nutrição	kg PO <sub>3/4</sub> eq /p/ano	38	2,7	8,006	
POCP (Formação fotoquímica de oxidantes)	kg Etileno eq /p/ano	18	17	32,23	
Metais pesados	kg Pb eq /p/ano	0,054			
Cancerígenos	kg PAH eq /p/ano	0,01			
Smog Inverno	kg SO <sub>2</sub> eq /p/ano	94,6			
Resíduos inertes	kg/p/ano		1350	7194	2430
Resíduos perigosos	kg/p/ano		20,7		
Resíduos radioactivos	kg/p/ano		0,035		
Poluição do ar: toxicidade Humana	kg.tox/ano			90,7	
Destruição e extracção de combustíveis fosseis	tep/ano			4,085	
Poluição da água: Toxicidade humana	kg.tox/ano			0,02746	
Poluição da água: ecotoxicidade	m <sup>3</sup> tox/ano			837600	
Extracção de minerais	ton/ano			5,04	
Extracção de água	litros/ano			417600	715000
Poluição transporte e congestionamento de tráfego	ton.km/ano			4140,84	

<sup>1</sup> Fonte: ADEporto



Do Quadro 2.2 verifica-se que em Portugal o impacto ambiental associado ao consumo de energia ainda se encontra abaixo da média Europeia (e deve de haver um esforço para assim se manter), enquanto ao nível do consumo de água existe um consumo acima da média europeia.

Na fase de avaliação para converter o perfil normalizado num indicador ambiental único são utilizados normalmente painéis de peritos que opinam acerca da importância relativa de cada uma das categorias de impacto ambiental, resultando uma matriz de ponderação. Esta abordagem é adoptada no indicador ecopontos do UK (Howard, 1999), Figura 2.2. No ecoindicator (Goedkoop, 2001) o painel pondera a relevância dos danos para três categorias, o ambiente, o ser humano e os recursos, pois foi considerado que os painéis têm dificuldade em ponderar directamente 10 indicadores ambientais. Os danos causados pelas intervenções ambientais são estimados com base na distância ao objectivo que foi definido como:

- no valor limite, o efeito causará uma morte adicional por ano/milhão de habitantes
- no valor limite, o efeito causará alterações em menos de 5% dos ecossistemas europeus
- no valor limite, a ocorrência de períodos de smog é extremamente improvável.

Na Figura 2.2 apresentam-se os factores de ponderação do indicador ecoindicator para as categorias de impacto ambiental depois de normalizado pelo impacto ambiental médio de um cidadão europeu e pela ponderação hierarquista (valorização da saúde 40%, ecossistemas 40% e recursos 20%).

Estes processos de normalização e avaliação ambiental envolvem uma componente subjectiva e apresentam incertezas significativas, sendo alvo de controvérsia (Harris, 1999). A análise científica da ACV termina no perfil ambiental.

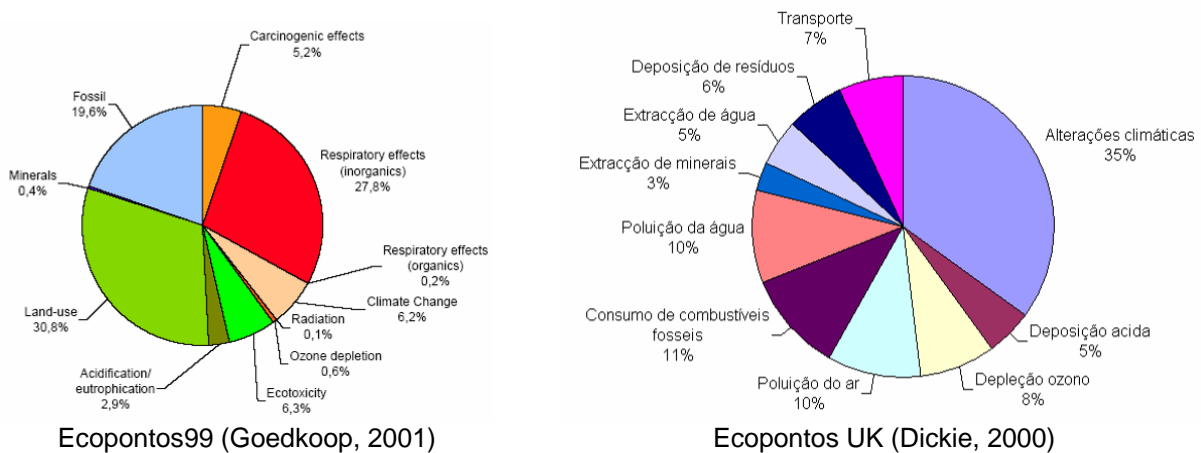


Figura 2.2 - Ponderação das categorias de impacto ambiental em dois indicadores ambientais

## 2.2 - ACV APLICADA A EDIFÍCIOS

A apreciação do impacto ambiental dos edifícios requer um vasto conjunto de informação para cada uma das suas fases, Figura 1.8. A aplicação da ACV a edifícios apresenta diversas dificuldades, nomeadamente devido às fronteiras espaciais e temporais do sistema. Efectivamente, a vida útil de um edifício situa-se em mais de 50 anos, enquanto a ferramenta de ACV inicialmente foi concebida para produtos com menor tempo de vida útil o que acarreta dificuldades na sua aplicação devido à indefinição quanto à utilização do

edifício, às tecnologias existente para o tratamento no fim-de-vida e dificuldades em relação à informação disponível à cerca dos materiais.

Apesar das dificuldades e incertezas a ACV é um método que permite ter uma visão mais alargada e integrada da eficiência energética e ambiental dos edifícios pois integras os impactes da construção, utilização e fim-de-vida.

Nos estudos iniciais do ciclo de vida dos edifícios a energia (incorporada nos materiais e a consumida na construção e utilização) era adoptada como indicador do impacte ambiental. Winther (1999) refere estudos sobre a energia incorporada nos materiais e na construção que datam de 1978, fazendo também referência a estudos sobre o “ciclo de vida dos custos” de 1987.

No projecto Europeu REGENER (1997) foram analisadas vários métodos disponíveis para a ACV de edifícios e concluíram haver diferenças nas categorias de impacte ambiental usadas. Nesse projecto não é proposta uma metodologia para ACV de edifícios, sendo apenas apresentados os princípios gerais e alguns dos aspectos a considerar. No âmbito da TC 350 foram publicados projectos de norma em 2006 que definem o princípio da ACV e da declaração ambiental de produtos, os quais são mais precisos do que foi possível estabelecer no âmbito do projecto REGENER, nomeadamente em relação ao âmbito e objectivos da análise, onde são apresentados critérios para definir a unidade funcional e as condições de fronteira. No que diz respeito à fase de utilização remete as condições de conforto e salubridade a satisfazer no interior dos edifícios para as normas existentes, bem como remete para normas o cálculo das necessidades energéticas do edifício. Em relação às categorias de impacte ambiental são consideradas as categorias indicadas no Quadro 2.3. Na apresentação dos resultados os documentos da TC 350 apontam para uma distinção entre os impactes associados ao consumo de energia na fase de utilização e os restantes. Contudo nestes projectos de norma não é considerada a existência de normalização para a fase da avaliação dos resultados da ACV. No 1º *draft* publicado pela ASHRAE sobre construção verde (ASHRAE 189, 2007), a fase de inventário da ACV inclui os materiais, a energia consumida e as emissões para o ar, solo e água para cada uma das seguintes fases:

- Extracção de materiais e combustíveis da natureza.
- Fabrico dos materiais de construção e dos componentes da construção.
- Transporte dos materiais e componentes
- Processos de construção do edifício
- Operação do edifícios, incluindo o consumo de energia, manutenção, reparação e renovação
- Demolição, deposição de resíduos, reciclagem e reutilização no fim-de-vida.

Quadro 2.3 - Exemplos de categorias de impacte ambiental CEN TC 350

<b>Categorias de impacte ambiental objecto de classificação/caracterização</b>	<b>Categorias de impacte ambiental que não são objecto de normalização</b>
alterações climáticas	depleção de recurso não renováveis, excluindo a energia
diminuição da camada de ozono estratosférica	utilização de recursos renováveis, excluindo a energia
acidificação do solo e da água	depleção de energia primária não-renovável
eutrofização	utilização de energia primária renovável
Formação de ozono ao nível do solo	utilização de água potável
	resíduos não-perigosos
	resíduos perigosos

Em termos metodológicos, existe uma primeira fase de definição do objectivo e âmbito da análise, da unidade funcional e das fronteiras de análise. Depois efectua-se a desagregação do edifício nos seus subsistemas, produtos e componentes de forma a realizar o inventário, Figura 2.3 (REGENER, 1997, TC 350, ASHRAE 189,2007). Para o inventário da energia de climatização são definidas as condições de conforto a satisfazer e utilizam-se os métodos de cálculo normalizados para a sua determinação. Com base na informação desse inventário e com as bases de dados são determinados as intervenções ambientais, é efectuada a classificação/caracterização dos impactes em categorias de impacte ambiental. Nalguns casos existe a integração da análise dos impactes ambientais com modelos de simulação do comportamento térmico de edifícios (caso Francês EQUER) para avaliação dos impactes da fase de utilização, noutros modelos esse é um dado de entrada no método de ACV.

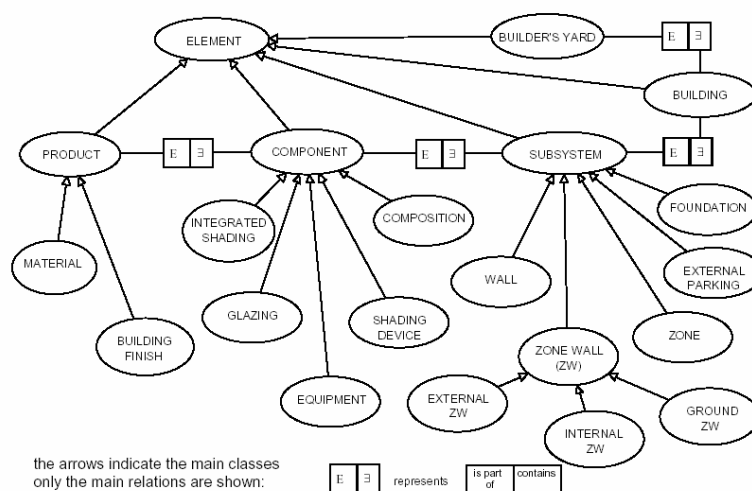


Figura 2.3 - Desagregação do edifício em objectos (REGENER, 1997)

Um dos pressupostos da ACV é a estabilidade no tempo (Chevalier, 1996 e Erlandson, 2003). Este aspecto implica, por exemplo, que um produto quando atinge o fim-de-vida os resíduos serão tratados de forma semelhante à que acontecia X anos antes, quando o produto foi fabricado. Esta é uma aproximação possível para se obter uma apreciação de um produto num dado instante, tendo em conta a dificuldade de prever os cenários futuros quanto à reciclagem e tratamento de resíduos.

Tendo em conta que os projectos de norma são relativamente recentes, os estudos sobre a ACV de edifícios realizados apresentam abordagens e quantificações relativamente diferentes, Harris, 1999, Mithraratne, 2004, Peuportier, 2001, Winther, 1999, Suzuki, Cole, 1996.

Na ACV da energia e de custos de uma moradia isolada de 94 m<sup>2</sup> na Nova Zelândia (Mithraratne, 2004) foi considerado uma vida útil da construção de 100 anos e aquecimento ambiente a uma temperatura de 18 °C. Nesse estudo foram analisadas três soluções de materiais de construção para a mesma moradia: i) construção corrente (leve), ii) uma com laje de betão e iii) uma casa com o dobro do isolamento regulamentar (R = 4,4 m<sup>2</sup>K/W paredes e vidro duplo). A energia do ciclo de vida é estimada em 17017, 16237 e 11832 MJ/m<sup>2</sup>, para a construção leve, laje de betão e super-isolada. A energia de aquecimento ambiente (21,9, 20,0 e 11,8 kWh/m<sup>2</sup>/ano) durante a fase de utilização corresponde a 64%, 60% e 42% do total da energia do ciclo de vida do edifício. Da análise do ciclo de custos, mesmo para um acréscimo do custo da energia de 100%, é referido que

a construção leve (tradicional) apresenta um custo inferior em 10% face à moradia super-isolada. A energia incorporada (excluindo mobiliário e electrodomésticos) para os três casos é, respectivamente, 4425, 4764 e 5041 MJ/m<sup>2</sup>. Em todas as construções os elementos mais importantes (pavimento, paredes e cobertura) correspondem a (34%, 43% e 38%) da energia incorporada, enquanto os acabamentos apresentam um impacto de 34%, 26% e 30%. Para o mobiliário e electrodomésticos é estimada uma energia incorporada de 1776 MJ/m<sup>2</sup> (10%, 11% e 15% da energia incorporada no ciclo de vida do edifício).

Peuportier, 2001 efectuou a ACV de três tipos de moradias francesas com necessidades de aquecimento de 70 kWh/m<sup>2</sup>, 90 kWh/m<sup>2</sup> e 35 kWh/m<sup>2</sup>. Nesse estudo foi admitido um período de vida útil de 80 anos, ganhos internos de calor de 4,6 W/m<sup>2</sup> e uma temperatura interior de 19 °C. Os resultados da ACV encontram-se na Figura 2.4, sendo interessante registar por exemplo, a variação da energia e da quantidade de resíduos, que mostra que a utilização do indicador energia é insuficiente para uma comparação ambiental de soluções.

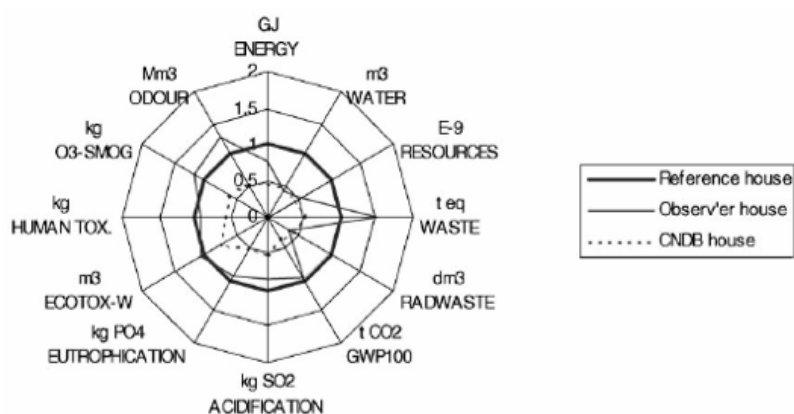


Figura 2.4 - Comparação do ecoperfil de 1 m<sup>2</sup> de construção para 3 moradias em França (Peuportier, 2001)

No Quadro 2.4 apresenta-se um resumo da energia incorporada de vários estudos: cinco edifícios na Noruega<sup>1</sup> (Winther, 1999), dez edifícios de escritório no Japão (Susuki, 1998) e quinze edifícios de escritórios citados por (Cole, 1996).

No estudo de edifícios de escritórios Suzuki (1998) concluiu que a energia incorporada na construção de 1 m<sup>2</sup> varia entre 6,5 a 13 GJ/m<sup>2</sup> e considera que a energia consumida na fase de demolição é negligenciável, 0,49 GJ/m<sup>2</sup>, Figura 2.5. No estudo de Cole (Figura 2.6) foi concluído não existir uma diferença muito significativa entre os três tipos de estrutura (madeira, aço betão) na energia incorporada; a existência do parque de estacionamento agrava a energia incorporada e constata-se o grande impacto da fase de utilização no ciclo de vida do edifício.

<sup>1</sup> i) super isolado (30 cm de lã mineral), recuperação de calor na ventilação, 22m<sup>2</sup> de células fotovoltaicas, bomba de calor, ii) caso 2 (20 cm de lã mineral), AQS produzidas por colector solar, recuperação de calor na ventilação, iii) (20 cm de lã mineral), recuperação de calor na bomba de calor, iv) construção corrente, (15 cm de isolante), ventilação de exaustão, v) construção verde, (20 cm de fibra de celulose).

Quadro 2.4 - Energia incorporada de edifícios - casos de estudo

Origem	Tipo	Vida Útil (anos)	Nec. Aquec. (kWh/m <sup>2</sup> /ano)	Nec. Aquec (GJ/m <sup>2</sup> /80 anos)	Energia Incorporada (GJ/m <sup>2</sup> )	Energia Primária Total (GJ/m <sup>2</sup> /80ano)
NZ	Moradia (leve)	100	21,9	6,3	4,4	14,9
NZ	Moradia (betão)	100	20,0	5,8	4,8	14,3
NZ	Moradia (isolada)	100	11,8	3,4	5,0	10,8
Fr	Moradia (normal)	80	70	20,2	-	-
Fr	Moradia (solar passiva)	80	90	25,9	-	-
Fr	Moradia (madeira)	80	35	10,1	-	-
NO	Moradia (i)	50	10,0	2,9	4,5	4,1
NO	Moradia (ii)	50	31,8	9,2	2,4	9,8
NO	Moradia (iii)	50	50,0	14,4	2,1	15,0
NO	Moradia (iv)	50	71,8	20,7	1,8	21,2
NO	Moradia (v)	50	54,5	15,7	2,5	16,4
Susuki	Média edifícios escritório	40	-	-	9,0 (6,0 a 14)	59,4 (40 anos)
Cole	Média edifícios escritório	50	-	-	4,3 a 5,1 (refere 4 a 12)	58 a 64 (50 anos)

NZ - Mithraratne, 2004; Fr - Peuportier, 2001; NO - Winther, 1999; Susuki, 1998, Cole, 1996.

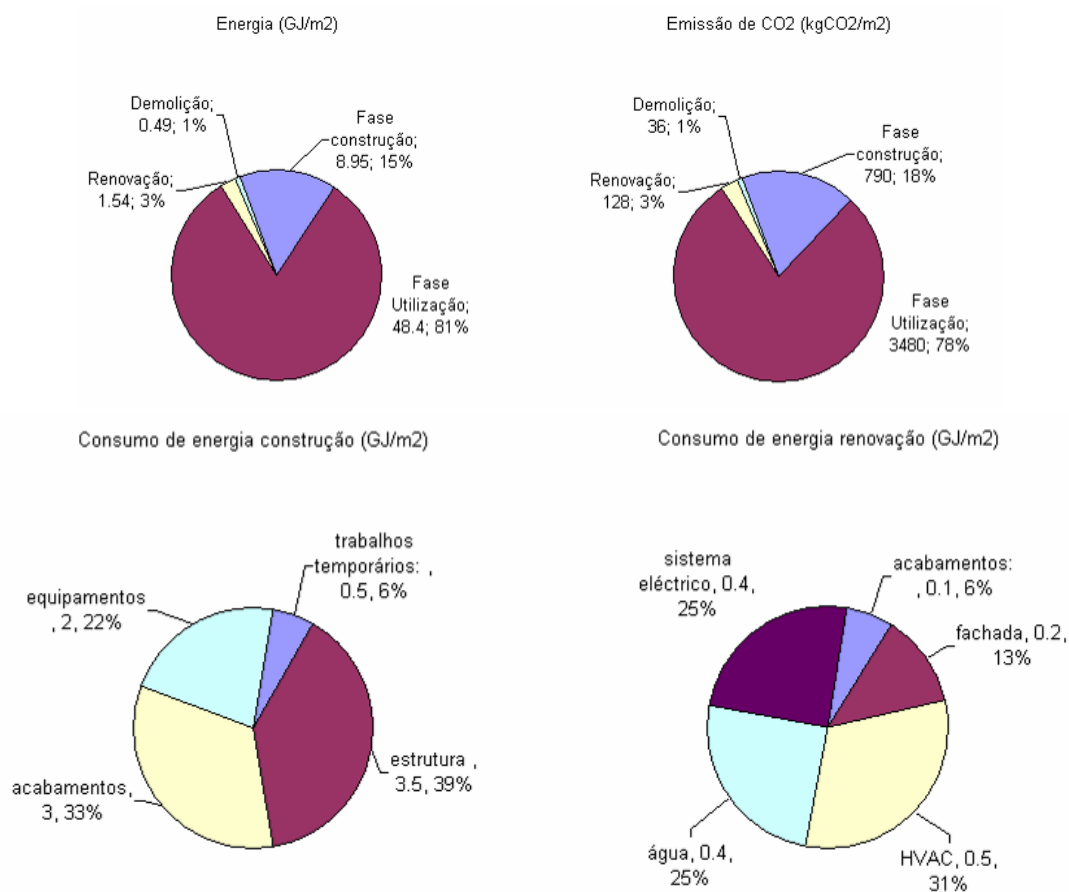


Figura 2.5 - Valores médios de dez edifícios de escritórios no Japão (Susuki, 1998)

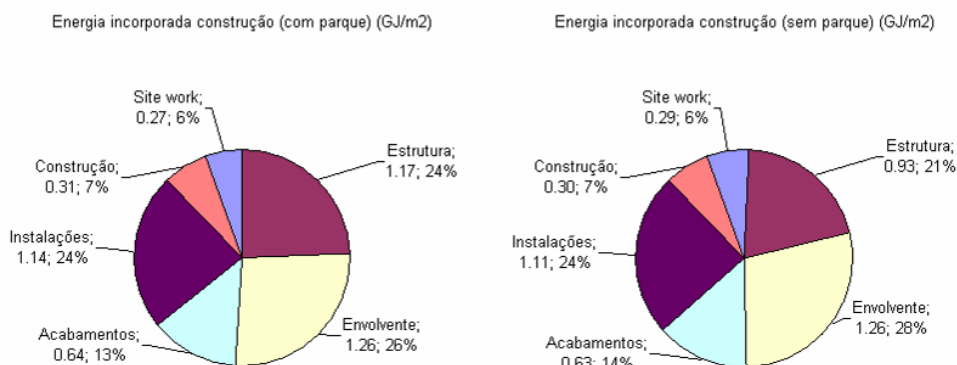


Figura 2.6 - Desagregação da energia da fase de construção estrutura de betão

No estudo de três edifícios de escritórios na Finlândia (Junilla, 2004) é evidenciado que a fase de demolição e de construção apresentam um impacto limitado no ciclo de vida do edifício, encontrando-se os impactos mais significativos associados ao consumo de energia na fase de utilização e aos materiais de construção. A fase de construção inclui os materiais, a construção, a demolição e o tratamentos dos resíduos. O AVAC inclui o consumo de energia e também os sistemas de AVAC, AQS, distribuição e drenagem de água. O impacto das actividades dos utilizadores, inclui a utilização de PC, impressoras, etc. Para o caso base é estimada uma emissão de 4700 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 15,1 kgSO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 2,1 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>, 1,6 kg PO<sub>4</sub>/m<sup>2</sup> e 0,0021 kgPb/m<sup>2</sup>.

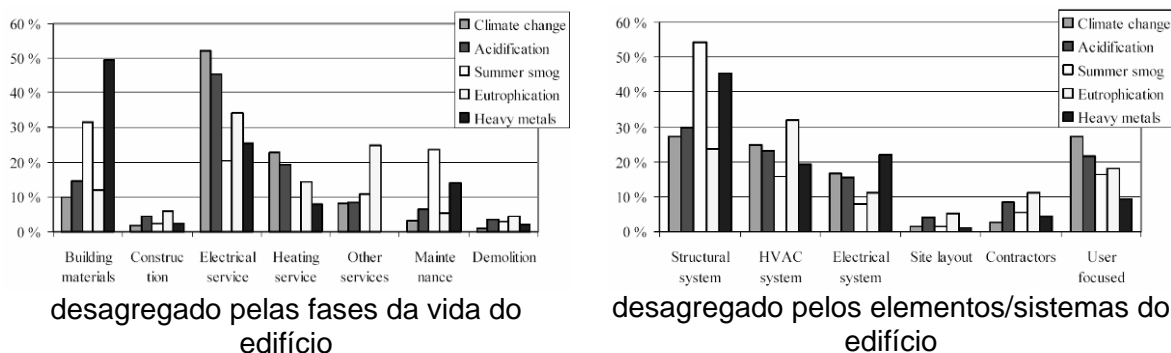


Figura 2.7 - Impacte ambiental de um edifício de escritórios na Finlândia para uma vida de 50 anos

No trabalho de Harris, 1999 sobre o impacto ambiental em edifícios residenciais no UK, este efectuou uma avaliação do ponto de equilíbrio para a espessura de isolante térmico de paredes, tendo em conta a energia incorporada no isolante térmico e a poupança de energia de climatização (Figura 2.8), verificando-se que a partir dos 200 mm de espessura as poupanças de energia não compensam o acréscimo da energia incorporada.

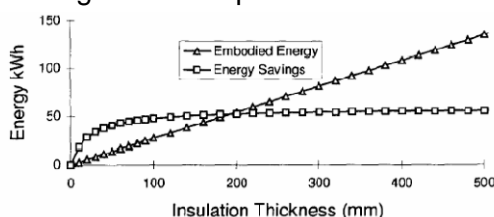


Figura 2.8 - Espessura de equilíbrio entre energia incorporada e poupança na energia de climatização UK (Harris, 1999)

Em Portugal (Soares, 1999) efectuou a ACV de sistemas de climatização, nas suas componentes de conforto, eficiência energética e ambiental. Contudo não analisou a interacção do edifício e a carga ambiental associada aos equipamentos de produção térmica e as possibilidades associadas a uma optimização da envolvente. Paiva, 1985 ponderou o estudo de ciclo de vida dos edifícios, contudo considerou que na altura este não era relevante baseado nos trabalhos de autores que referiam que esta parcela correspondia a cerca de 5% do ciclo de vida do edifício. Nesse trabalho, referiu o interesse nas soluções baseadas na recuperação de materiais e técnicas construtivas tradicionais, por exemplo as baseadas no material terra (taipa e adobe).

Nos artigos consultados a ACV geralmente baseia-se no ciclo de vida da energia. Quer nesses estudos, quer nos estudos de ACV mais completos não foi possível identificar de forma clara as fases previstas na ACV, nomeadamente:

- Definição do objectivo;
- Definição da unidade funcional e das fronteiras da análise;
- Qualidade e origem dos dados;
- Fase de inventário;
- Categorias ambientais.

No que concerne à qualidade dos dados, a ACV dos edifícios é efectuada com base em resultados de auditorias mas também (e na grande maioria dos casos) utilizando informação de bases de dados (Ardente, 2004 e Peuportier, 2001). De uma forma geral não é evidenciada a revisão dos dados.

Dos resultados apresentados, constata-se que para minimizar o impacte ambiental dos edifícios a preocupação principal deve centrar-se na redução do consumo de energia na fase de utilização. A fase de construção (materiais) tem um peso importante, pelo que deve ser envolvida no processo destinado a limitar o impacte ambiental dos edifícios novos. A fase de fim-de-vida, com a criação de resíduos (que são cerca de 50% dos resíduos criados na UE) e o seu não tratamento colocam pressões ambientais, para as quais a Comissão Europeia pretende uma resposta mais eficaz, pelo que este aspecto deve carecer de uma valorização na ACV.

Nos estudos a unidade funcional adoptada varia sendo nuns casos considerado o edifício e noutros o m<sup>2</sup> de área construída que reúne condições de conforto e salubridade. O período de vida útil adoptada é variável, existindo estudos em que foram considerados 40 anos e noutros foi adoptado um período de 100 anos. Os estudos apresentados reportam-se a construção nova e não são apreciados casos de reabilitação.

### **2.3 - QUALIFICAÇÃO AMBIENTAL DE MATERIAIS**

Um das aplicações mais frequentes da ACV é na análise e comparação de materiais, para a qualificação ambiental de materiais de construção (Howard, 1999 e NF P 01-010, 2004) e que serve posteriormente de suporte aos sistemas de qualificação ambiental de edifícios (Baldwin, 1998 e ADEME, 2006).

Spiegel, 2006 define material verde como aquele que utiliza os recursos da terra de uma forma ambientalmente responsável. Os matérias de construção verdes respeitam a

limitação dos recursos não-renováveis como o carvão, petróleo e minerais metálicos; são trabalhados no respeito do seu ciclo natural e da sua interacção com os ecossistemas, não são tóxicos, são realizados de materiais recicláveis e são eles próprios recicláveis, são eficientes do ponto de vista energéticos e do consumo de água.

Aos materiais de construção encontram-se associados diversos impactes ambientais ao longo do seu ciclo de vida nomeadamente:

- Consumo/extracção de matérias-primas, que pode contribuir para extinção de recursos naturais, degradação de ecossistemas, biodiversidade, paisagem.
- Consumo de recursos energéticos durante as diversas fases, fabrico, manutenção e transporte.
- Consumo de água.
- Resíduos gerados durante as diversas fases, que podem contribuir para a contaminação do ar, do solo e das águas.
- Poluição atmosférica, com emissão de GEE, gases que destroem a camada de ozono, chuva acida, formação de oxidantes fotoquímicos.
- Poluição da água e do solo.
- Ruído e odor.
- Impacte na saúde humana.

O impacte ambiental do material pode depender: apenas das propriedades do material, da sua aplicação no edifício ou da localização no edifício. Pelo que a selecção dos materiais deve ser efectuada abrangendo os diversos requisitos (Roaf, 2003):

- Aspectos relacionados com o material:
  - o energia necessária para produzir o material.
  - o emissão de CO<sub>2</sub> resultante da produção do material.
  - o impacte ambiental resultante da extracção do material.
  - o toxicidade do material.
  - o impacte do transporte do material desde a produção até à sua instalação.
  - o impacte ambiental no fim-de-vida.
- Aspectos relacionados com a selecção do material e a sua instalação:
  - o localização no edifício.
  - o manutenção requerida.
  - o contribuição do material para reduzir o impacte ambiental do edifício.
  - o capacidade de acomodar alterações no edifício ao longo da sua vida.
  - o período de vida útil do material e o seu potencial de reutilização se o edifício for demolido.

Os materiais naturais disponíveis localmente são normalmente aqueles cuja utilização menos impactes ambientais apresenta, devido à redução das operações de transformação e transporte. Contudo, a sua utilização será ecologicamente eficiente se forem tidos em conta factores de durabilidade, segurança, eficiência, sustentabilidade dos recursos, se forem reutilizáveis ou recicláveis e cujo fabrico e uso permitam a pré-fabricação, a redução dos desperdícios e a minimização da contaminação dos recursos naturais.

No UK, para suportar a aplicação do sistema BREEAM e para possibilitar a qualificação ambiental de materiais foi estabelecido um processo de avaliação no qual é



descrita a metodologia e os resultados do estudo referente à ponderação dos aspectos ambientais, económicos e sócias da sustentabilidade na construção (Dickie, 2000). A ponderação foi obtida por um painel, em que a componente ambiental foi valorizada em 40%, a componente económica em 30% e a componente social em 20%, sendo o indicador final expresso em ecopontos UK. Este indicador tem por referência a poluição média anual de um habitante do UK, Quadro 2.5. As categorias de impacte ambiental e os coeficientes de normalização são apresentados no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Ponderação das categorias de impacte ambiental ecopontos UK

<b>Categoria</b>	<b>Unidade</b>	<b>Ponderação</b>	<b>Normalização cidadão UK</b>
Alterações climáticas	Kg CO <sub>2eq</sub> 100	35	12 269
Deposição acida	Kg SO <sub>2eq</sub>	5	58,9
Diminuição da camada de ozono	Kg CFC11 <sub>eq</sub>	8	0,3
Poluição do ar (toxicidade humana)	Kg tox	6,5	90,7
Poluição do ar (criação de ozono)	Kg eteno eq (POCP)	3,5	32,2
Consumo de combustíveis fósseis	tep	11	4,09
Poluição da água (toxicidade humana)	Kg tox	2	0,01
Poluição da água (ecotoxicidade)	M3 tox	4	177 948
Poluição da água (eutrofização)	Kg PO <sub>4</sub> eq	4	8,0
Extracção de minerais	Ton	3	5,0
Extracção de água	Litros	5	417 583
Deposição de resíduos	Ton	6	7,2
Transporte	Ton km	7	4 141

Ex. 1 kg CO<sub>2</sub> conduz a  $1/12269 \times 35 = 0,0029$  UK ecopoints

Os ecopontos UK são calculados com base na ACV do produto em questão, sendo seguidas as fases:

- Definição do produto/sistema, com definição de fronteiras de análise
- Inventário (input/output)
- Classificação/caracterização (classificar as intervenções ambientais nas 13 categorias de impacte ambiental, obtendo os CO<sub>2eq</sub>, etc)
- Normalização (a partir dos CO<sub>2</sub> eq dividir pelo valor correspondente ao impacto de um cidadão UK, Quadro 2.5)
- Ponderação (multiplicar os valores normalizados pelos factores de ponderação, Quadro 2.5)
- Obter os UK ecopoints somando o resultado obtido na aliena anterior.

Na ACV dos materiais e soluções construtivas no UK é considerado 1 ton do produto ou 1 m<sup>2</sup> do elemento de construção instalado, durante 60 anos de vida útil (Howard, 1999).

Para facilitar a selecção de matérias pelo projectista foi elaborado um guia onde são apresentadas tabelas em que as soluções construtivas são classificados de A, B e C, função do seu impacte ambiental considerando um período de vida de 60 anos (Anderson, 2002).

Em França, a qualificação ambiental dos materiais é realizada de acordo com a norma NF P 01-010 (2004), onde são adoptadas as seguintes categorias de impacte ambiental:

- Consumo de recursos energéticos
- Depleção de recursos
- Consumo de água
- Resíduos sólidos
- Alterações climáticas
- Acidificação atmosférica
- Poluição do ar
- Poluição da água
- Diminuição da camada de ozono
- Formação de ozono fotoquímico

O método de preferência ambiental (*Environmental Preference Method-EPM*) para a selecção de materiais foi criado na Holanda (Jönsson, 2000), para auxiliar na selecção de materiais para utilização na construção e na reabilitação. Neste método, para cada categoria de produtos estes são comparados e são ordenados pelo seu impacte ambiental em: preferência 1, preferência 2, preferência 3 e não aconselhados. Neste método não são considerados critérios como a estética e o custo. A ordenação dos produtos tem em conta a perspectiva do ciclo de vida, nomeadamente:

- Escassez de matérias primas
- Impacte ambiental causado pela extracção das matérias-primas
- Consumo de energia nas fases de fabrico, manutenção e transporte
- Consumo de água
- Ruído e odor
- Emissão de gases com efeito de estufa, chuva acida, redução da camada de ozono
- Aspectos de saúde humana
- Risco de acidente
- Possibilidade de reparação
- Possibilidade de reutilização
- Resíduos

Jönsson, 2000 refere que a adopção de métodos simplificados e de listas de materiais pode conduzir a respostas contraditórias, como se verificou no estudo em que foram aplicados seis métodos diferentes à selecção de 3 materiais de revestimento de piso. As diferenças estão associadas à falta de transparência dos critérios dos métodos simplificados.

Contudo, (Roaf, 2003 e Harris, 1999) sugerem que o indicador mais importante para aferir o impacte ambiental dos materiais é a energia incorporada, pois é o dado mais fácil de obter. Para além disso a energia incorporada no material fornece indicações quanto ao consumo de combustíveis fósseis e ao potencial de aquecimento global, sendo expresso em energia primária J ou tep. No Quadro 2.6 e no Quadro 2.7 apresentam-se valores da energia primária de alguns materiais, sendo perceptível poderem existir diferenças significativas entre valores declarados por fontes diferentes. Nos edifícios os materiais com maior energia incorporada são normalmente: aço, alumínio, betão, tijolo, cimento, agregados, vidro e estuque.

Quadro 2.6 - Valores aproximados da energia incorporada de alguns materiais de construção

Material	Taylor, 2002 MJ/kg	Sidler, 2000 MJ/kg	Buchanan (Pinheiro, 2007) MJ/kg	Lawson (Pedro, 2007) MJ/Kg	Paiva, 1985 MJ
<b>Metais</b>					
Alumínio	190	121 <sup>b</sup>	145	170,0	
Aço	30	42 <sup>a</sup>		34,0	
Aço para estruturas			59		
Aço galvanizado				38,0	
Aço inoxidável		105			
Cobre	50	63		100,0	
Zinco		50		51,0	
<b>Betão cimento</b>					
Betão	1,3	1,5		1,7	
Betão armado		2,8			
Betão aerated (1/3 da massa betão)	2				
Blocos de betão				1,4	0,72
Blocos de betão celular autoclavado					1720 MJ/m <sup>3</sup>
Painéis de betão pré-fabricado				1,9	
Inertes pesados (britas)					0,11
Cimento		6,3		5,6	
Cimento portland (wet process)	6				4,92
Cimento portland blast furnace	3				
Argamassa cimento revestimento					2170 MJ/m <sup>3</sup>
Argamassa bastarda revestimento					2400 MJ/m <sup>3</sup>
Cal hidráulica					5,27
Gesso		2,5			1,99
<b>Cerâmica/Pedra</b>					
Tijolo/telha cerâmica	4	3,3			3,05
Tijolo sand-lime	1,2				
Tijolo fletton	0,6				
Mosaico cerâmico (de argila)				2,5	
Pedra cortada	0,8				
Agregado de granito	0,2				
Granito importado				13,9	
Granito local				5,9	
Terra estabilizada				0,7	
<b>Madeira</b>					
Madeira (softwood) importada	5				
Madeira		2,5			2400 MJ/m <sup>3</sup>
Madeira bruta			848 MJ/m <sup>3</sup>		
Madeira seca e tratada			1200 MJ/m <sup>3</sup>		
Madeira branda seca em estufa				3,4	
Madeira dura seca em estufa				2,0	
Madeira dura seca ao ar				0,5	
Oak (verde)	1,2				
Softwood (do país)	0,8				
Contraplacado			9440 MJ/m <sup>3</sup>		5580 MJ/m <sup>3</sup>
Painel de madeira				24,1	5470 MJ/m <sup>3</sup>
Painel de aglomerado				8,0	
Madeira lamelada colada				11,0	
<b>Diversos</b>					
Vidro	20	22	31,5	12,7	
Plásticos		75		90,0	
Polietileno	100				
PVC	80				
Borracha sintética				110,0	
Placa de gesso			5000 MJ/m <sup>3</sup>	4,4	
Fibrocimento				7,6	
Papel de parede			7,5 MJ/m <sup>2</sup>		
Tinta acrílica				61,5	
Asfalto			280 MJ/m <sup>2</sup>		
Movimento de terra		0,042 MJ/m <sup>3</sup>			
<b>Material de isolamento térmico</b>					
Poliestireno	4,1 GJ/m <sup>3</sup>	84 <sup>c</sup>			
Poliuretano		65			
Lã de vidro	2,7 GJ/m <sup>3</sup>	50			
Fibra mineral	0,8 GJ/m <sup>3</sup>				
Papel reciclado	0,5 GJ/m <sup>3</sup>				

Material	Taylor, 2002	Sidler, 2000	Buchanan (Pinheiro, 2007)	Lawson (Pedro, 2007)	Paiva, 1985
	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/Kg	MJ
Lã sheep's wool	0,1 GJ/m <sup>3</sup>				

a - perfil, b - 1ª fusão, c-expandido

Quadro 2.7 - Valores da energia incorporada (Roaf, 2003)

Material	Valor mínimo			Valor máximo	
	Kg/m <sup>3</sup>	GJ/ton	GJ/m <sup>3</sup>	GJ/ton	GJ/m <sup>3</sup>
Inertes naturais	1500	0,030	0,05	0,12	0,93
Cimento	1500	4,3	6,5	7,8	11,7
Tijolo	1700	1,0	1,7	9,4	16
Madeira*	500	0,52	0,26	7,1	3,6
Vidro	2600	13	34	31	81
Aço	7800	24	190	59	460
Estuque	1200	1,1	1,3	6,7	8,0

\* este impacte está essencialmente relacionado com o transporte

A madeira é um material com uma elevada mais valia na redução de impacte ambiental da construção, desde que seja proveniente de florestas exploradas de forma sustentável. Por outro lado, quando a madeira é aplicada no exterior devem ser tomados cuidados para evitar o caruncho (deve ser minimizado o risco da madeira ser molhada, deve dispor de uma drenagem eficaz e quando esta for molhada deve estar adequadamente ventilada para que a secagem seja o mais rápida possível). De acordo com a síntese realizada por Petersen, 2005 de vários estudos ACV sobre a madeira, esta é a melhor alternativa no que se refere a minimizar a emissão de gases com efeito de estufa, as emissões de SO<sub>2</sub> e gera menor quantidade de resíduos face aos materiais alternativos. Por outro lado, a madeira com substâncias de preservação pode ter impactes toxicológicos no homem e nos ecossistemas, devendo ser seleccionadas madeiras naturalmente duráveis como o carvalho, teixo. O potencial de acidificação, eutrofização e criação de ozono fotoquímico variam em diferentes comparações. Como em Portugal não existem florestas com sistema de qualificação ambiental da madeira a sua utilização tem limitações importantes do ponto de vista da sustentabilidade.

## 2.4- RECICLAGEM E RESÍDUOS

Na resolução do conselho de ministros da Europa de 7 de Maio de 1990, a comissão foi convidada a estabelecer um plano para o tratamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) Vasquez, 2000. Os resíduos da construção são o principal fluxo de resíduos na União europeia, cerca de 180 milhões de ton/ano, Quadro 2.8 (Symonds, 1999). Na Europa a reciclagem dos RCD é em média de 28%, variando de menos de 5% a 90% na Holanda, sendo a restante quantidade destinada a aterro (125 milhões de ton) (Symonds, 1999). Ou seja, os RCD correspondem a sensivelmente 480 kg/p/ano na UE15. Symonds, 1999 refere que os RCD são frequentemente enviados para os mesmos aterros dos RSU e que os RCD são em quantidade equivalente à dos RSU. Do Quadro 2.8 verifica-se que em Portugal mais de 95% dos RCD vão para aterro ou para incinerar.

Quadro 2.8 - Resíduos da construção e demolição tratamento de resíduos na União Europeia (Symonds, 1999)

<b>Estado membro</b>	<b>Resíduos da construção e demolição</b>	<b>% de resíduos reutilizados ou reciclados</b>	<b>% de resíduos incinerados</b>
Alemanha	59	17	83
UK	30	45	55
França	24	15	85
Itália	20	9	91
Espanha	13	<5	>95
Holanda	11	90	10
Bélgica	7	87	13
Áustria	5	41	59
Portugal	3	<5	>95
Dinamarca	3	81	19
Grécia	2	<5	>95
Suécia	2	21	79
Finlândia	1	45	55
Irlanda	1	<5	>95
Luxemburgo	0	n/a	n/a
EU-15	180	28	72

O termo RCD abrange um largo conjunto de materiais, nomeadamente:

- Resíduos provenientes da demolição (ou reparação) total ou parcial de edifícios e/ou infra-estruturas;
- Resíduos resultantes da construção de edifícios ou outras infra-estruturas;
- Terra, pedra, vegetação, etc resultante dos movimentos de terras (terraplanagens, fundações, etc).

Os RCD enquadram-se no código 17 do catálogo europeu de resíduos (Portaria n.º 818/97 de 5 de Setembro/Directiva 75/442/EEC). Os RCD de edifícios são essencialmente resíduos inertes (betão, tijolo, telhas) e são adequados para serem triturados e reciclados como agregados, em substituição da utilização de agregados novos em algumas aplicação de menor importância, nomeadamente como material de enchimento e de sub-base em vias de comunicação. Efectivamente, o maior consumidor de agregados na UE é a construção de estradas, parques de estacionamento, etc. A utilização destes agregados em betão é menos comum devido aos requisitos técnicos aplicáveis (Symonds, 1999).

Contudo podem existir alguns componentes dos RCD que sejam considerados perigosos pelo facto dos materiais originais serem considerados perigosos como, por exemplo, amianto, chumbo, produtos químicos de preservação, colas, etc, os quais devem ser objecto de procedimentos de remoção especiais.

Tendo em conta a quantidade de RCD e o seu impacte, desde a fase de concepção do edifício que deve ser pensada a sua adaptação ao longo da vida e a fase de fim-de-vida da construção para minorar os RCD, devendo ser seguidas as estratégias (Vasquez, 2000, Symonds, 1999 e Taylor, 2002):

- Reduzir:
  - i) Reduzir o consumo de recursos
- Reutilização:
  - ii) reutilização na obra e para a função inicial
  - iii) reutilização fora da obra e para a função inicial

- Reciclagem

- iv) transformação no local da obra para recuperar material de valor e comercializável
- v) transformação fora do local da obra para recuperar material de valor comercializável
- vi) reciclagem no local da obra para uma utilização de menor valor
- vii) reciclagem fora do local da obra para uma utilização de menor valor

- Recuperar energia

- viii) incineração dos resíduos para recuperação da energia

- Resíduos

- ix) incineração dos resíduos sem recuperação da energia
- x) envio para aterro fora da obra de resíduos materiais triados
- xi) envio para aterro fora da obra de resíduos misturados

Para minimizar a quantidade de RCD os edifícios e seus componentes devem ser projectados para poderem ser desmontados, prevendo formas de ligação reversíveis e escolhendo materiais cuja reciclagem seja viável. A utilização de sistemas pré-fabricados poderá dar um contributo para minimizar os resíduos na fase de construção pois na fabrica é maior a eficácia de fabrico e de reutilização/reciclagem dos materiais.

Para minimizar os resíduos no estaleiro é recomendado uma preparação técnica da obra adequada que minimize a formação de resíduos e desperdícios na construção (ou no caso de demolições, otimizar o grau de desconstracção de forma a obter uma maior valorização dos resíduos), efectuar a selecção das técnicas construtivas adequadas, quantificar os resíduos e prever uma zona de triagem de resíduos.

A reutilização, constitui a primeira preferência no tratamentos dos RCD, pois envolve menos actividades que a reciclagem, podendo consistir apenas numa limpeza. Contudo, a reutilização é substancialmente mais difícil que a reciclagem, pois usualmente é difícil remover os materiais sem os deteriorar devido a uma inadequada previsão da fase de fim-de-vida ou de adaptação do edifícios.

A reciclagem dos materiais, apesar de se encontrar na segunda linha de preferenciais para o tratamento dos RCD, é uma forma eficaz de reduzir a quantidade de resíduos para aterro e a energia incorporada nos novos materiais. Existem materiais para os quais a sua reciclagem tem pouco peso na energia incorporada, como por exemplo o betão, enquanto noutros tem uma importância elevada como é o caso dos materiais metálicos (alumínio, aço, etc). Na apreciação do potencial de reciclagem devem ser tidos em conta as características do material e o seu valor “ambiental”, pois os impactes associados ao seu transporte podem contrabalançar os benefícios associados à reciclagem, sendo nalguns casos preferível utilizar material novo, Harris, 1999.

Apesar das inúmeras vantagens da reciclagem em termos ambientais, existem alguns constrangimentos à sua utilização mais generalizada, como seja a necessidade de uma separação dos diversos tipo de resíduos, a limpeza dos resíduos, o custo e o impacte ambiental associado à sua reciclagem, bem como o baixo custo/penalização da deposição em aterro. Efectivamente na reciclagem de alguns materiais é vital a separação de alguns elementos que podem prejudicar o desempenho, por exemplo a cal existente nas paredes pode limitar a reciclagem das paredes para constituírem agregados de betão. Para além disso, os técnicos envolvidos na construção têm algum receio quanto à especificação e

desempenho de materiais reciclados, conduzindo a uma redução do preço do material reciclado, reduzindo o mercado e o interesse na reciclagem (Harris, 1999).

Symons, 1999 refere que para a reciclagem ser viável existe a necessidade de:

- ser penalizado economicamente o envio para aterro de material reciclável
- ser penalizado economicamente a mistura de resíduos perigosos com resíduos inertes
- existir informação clara que os agregados reciclados podem substituir agregados naturais.

De acordo com Freire, 2000 para ser possível a reciclagem dos RCD é necessário uma demolição selectiva. Os materiais mais difíceis de reciclar são aqueles que se encontram misturados com gesso, betuminosos, geotexteis e amianto. A presença de gesso nos resíduos de betão inviabiliza a sua utilização em inertes reciclados para betão devido ao mau comportamento do gesso com a água.

Os inertes de betão reciclado são utilizados em vias de comunicação (execução da camada de base), edificações (execução de betão e argamassa de baixa e média resistência até C25/30, pré-fabricação ligeira) e aterros de obras hidráulicas (inertes para camada de aterro ou muro de suporte (Freire, 2000).

A utilização de material reciclado é normalmente para substituir inertes de grande dimensão do betão, pois a trituração de betão de pequena dimensão aumenta os custos e tende a produzir areia e pó. Para melhorar a qualidade dos agregados reciclados para betão o conteúdo de tijolo deve ser o menor possível, bem como devem ser removidas as peças de madeira, aço, metais, asfalto, madeira e plástico. Para reduzir a variabilidade do material (inertes) devem de existir resíduos em abundância. Normalmente o betão obtido com materiais reciclados não será de elevada resistência (Freire, 2000).

Em relação aos materiais de isolamento térmico, existem alguns que podem ser reciclados como seja o EPS, lã de rocha, celulose (Roaf, 2003). Existe uma procura elevada dos materiais metálicos para reciclagem e a reciclagem do aço varia entre 50% a 70%, sendo a reciclagem do aço de construção na Suécia de 90%. A reciclagem do cobre é elevada, sendo consideradas taxas de 90%. A taxa de reciclagem de alumínio é de 65% na Suécia e 85% no sector da construção na Europa (Nyman, 2005).

Para incentivar a valorização dos RCD nos sistemas de qualificação ambiental dos edifícios (ver secção 2.7) é recomendada a introdução de uma % de material reciclado, (5% a 15% na HQE (Certivea, 2006) e assegurar a triagem e o destino final dos RCD.

## **2.5 - AMBIENTE INTERIOR DOS EDIFÍCIOS**

No que diz respeito às condições ambientes interiores aplicáveis aos edifícios existem actualmente normas que permitem especificar as condições a satisfazer no interior dos edifícios, nomeadamente as normas (ANSI/ASHRAE 55, 2004; CEN/TR 14788, 2006; CR 1752, 1998; EN 13799, 2007, EN 15251, 2007, ISO 7730, 2005). É através da energia necessária para climatizar e satisfazer a estas condições de conforto que se estabelece a relação entre a fase de construção e a fase de utilização.

### 2.5.1- Conforto térmico

O conforto é uma sensação humana que expressa a satisfação dos ocupantes face ao ambiente circundante. A interacção do homem com o meio é condicionada pelos factores ambientais térmicos, acústicos, de qualidade do ar e de iluminação.

As condições de conforto térmico são centrais no método de ACV adoptado neste estudo, pois é a partir da satisfação desse requisito que são estimadas as necessidades energéticas de climatização e que permitem estabelecer a relação com a energia incorporada na fase de construção.

A sensação de conforto térmico do homem encontra-se relacionada com o equilíbrio térmico estabelecido entre o corpo humano e o ambiente, de forma a manter a temperatura interior do corpo humano próxima de 37°C (ASHRAE, 1997), bem como depende da adaptação fisiológica (aclimatação), expectativas (componente psicológica) e do comportamento dos ocupantes.

O desconforto térmico sentido pelos ocupantes pode ser provocado por uma sensação de desconforto local, ocasionada por um aquecimento ou arrefecimento diferenciado de certas partes do corpo, ou então devido a um desconforto generalizado do corpo associado à falta de equilíbrio térmico entre o corpo humano e o ambiente.

O equilíbrio termodinâmico entre o corpo humano e o ambiente é condicionado pela transmissão de calor e massa entre o corpo e o ambiente, sendo as variáveis mais importantes desse equilíbrio subdivididas em factores pessoais e factores ambientais.

Factores pessoais:

- nível de actividade desenvolvida,
- isolamento térmico e permeabilidade ao vapor de água do vestuário.

Factores ambientais:

- humidade do ar,
- temperatura do ar,
- velocidade do ar,
- temperatura radiante média das superfícies do contorno do espaço.

A sensação de conforto térmico, além de envolver aspectos fisiológicos relacionados com os mecanismos de termoregulação é afectada também pela adaptação fisiológica (aclimatação), pela componente psicológica e pelo comportamento dos ocupantes, pois a percepção térmica dos ocupantes é influenciada pelo seu historial de exposição térmica, pelas suas expectativas e por aspectos culturais (Brager e Dear, 2000).

O comportamento dos ocupantes e a adaptação destes ao ambiente interior, resultante de uma acção consciente ou inconsciente, tem uma grande influência na sensação de conforto térmico manifestada, pois podem alterar as trocas de calor entre o corpo e o ambiente. O comportamento pode manifestar-se através de: i) ajustamento pessoal (por exemplo, alteração do vestuário, vestindo ou retirando uma camisola, alteração da actividade física, ingestão de líquidos quentes/frios, mudando de local no compartimento); ii) ajustamento do ambiente térmico do local; por exemplo, abertura de janelas para incrementar a ventilação do espaço e a respectiva velocidade do ar, actuar sombreamento, ligar uma ventoinha, ligar aquecimento, regular termóstato AVAC (Aquecimento Ventilação e ar condicionado), etc; iii) ajustamento cultural (por exemplo, alterar horário de trabalho, regulamentar vestuário, etc). A adaptação do comportamento



oferece uma grande margem de manobra para as pessoas desempenharem um papel activo na criação das condições de conforto e desta forma reduzir as necessidades de aquecimento e de arrefecimento.

A componente psicológica inclui os efeitos cognitivo e cultural, ponderando de que forma a habituação e expectativas alteram a percepção e a reacção dos ocupantes ao ambiente térmico. Efectivamente, a repetida exposição do homem a estímulos novos conduz a uma diminuição da resposta e, portanto, um ocupante habituado a um ambiente controlado manifestará insatisfação e será menos tolerante com ambientes mais variáveis (Brager e Dear, 2000). É nesta componente que mais se faz notar a diferença entre os edifícios com AVAC centralizado e os edifícios não-climatizados, existindo diversos estudos que mostram uma menor tolerância dos ocupantes a variações térmicas nos edifícios com AVAC do que nos edifícios não-climatizados (Brager, 2000).

Nos edifícios que privilegiem o conforto adaptativo deve de haver a preocupação de promover o contacto visual dos ocupantes com o ambiente exterior, dar a possibilidade de abertura de janelas, de utilização de ventoinhas e de actuação do sombreamento. Além da intervenção sobre o ambiente, também deve ser possível a adaptabilidade “pessoal” através do ajustamento do vestuário, ingestão de bebidas frescas e pausas. Por exemplo, a ingestão de uma garrafa de água de 33 cl a 5°C ( $c_p=4,2$  kJ/K.kg) pode traduzir-se num arrefecimento de 42 kJ, ou seja, cerca de 12 W ao longo de 1 hora, admitindo temperatura do corpo a 35°C (Baker, 1996). Por outro lado, a obrigatoriedade de vestuário “tradicional”, fardas ou uniformes, pode limitar a adaptabilidade “pessoal” e conseqüentemente a tolerância a ambientes mais quentes ou mais frios.

De acordo com vários estudos verifica-se não existir uma alteração sensível das condições térmicas de conforto dos ocupantes com a idade e sexo (ASHRAE, 1997).

Atendendo à complexidade e subjectividade da sensação de conforto térmico ao longo do tempo foram desenvolvidos vários índices para simplificar a apreciação das condições de conforto térmico, Quadro 2.9. Nos índices racionais pretende-se combinar num único valor vários parâmetros que afectam o conforto térmico, por exemplo a temperatura do ar, temperatura media radiante, humidade relativa, etc.

Quadro 2.9 - Índices de conforto térmico

<b>Índices directos</b>	<b>Índices racionais derivados</b>	<b>Índices empíricos</b>
temperatura seca do ar;	temperatura média radiante;	temperatura efectiva;
temperatura de orvalho;	temperatura operativa;	temperatura efectiva
temperatura de bolbo húmido;	stress térmico.	normalizada ;
humidade relativa;		PMV;
velocidade do ar.		PPD.

Neste trabalho na análise das condições de conforto térmico em edifícios climatizados utiliza-se a temperatura operativa indicada no Quadro 2.10, que é baseada nos critérios de conforto (PMV e PPD) determinado por Fanger e adoptado em várias normas internacionais (ASHRAE 55, 2004; CR 1752, 1998; EN 13799, 2007; EN 15251, classe II, 2007 e ISO 7730, 2005). Essas condições são adequadas para uma ocupação dos espaços superior a 15 minutos e correspondem às condições termo-higrométricas de neutralidade térmica. Para que a percentagem previsível de ocupantes insatisfeitos devido ao desconforto global seja inferior a 10%, o índice PMV deve estar compreendido entre -0,5 e +0,5. Dependendo do vestuário e do nível de actividade, pode ocorrer uma variação

significativa das condições higrotérmicas de conforto, pois o modelo de conforto é particularmente sensível a estas duas variáveis, devendo ser efectuados cálculos sempre que existam variações em relação aos valores assumidos. Os limites da humidade relativa do ar devem-se a aspectos relacionados com a qualidade do ar (para evitar a sensação de pele seca ou húmida, irritação dos olhos, electricidade estática, ocorrência de condensações, degradação de materiais, desenvolvimento de microrganismos, etc) e não propriamente à sua influência nas condições de conforto térmico (ISO 7730, 2005, Toftum, 1998a e 1998b).

Quadro 2.10 - Condições satisfatórias de conforto térmico global actividade sedentária (PPD<10%)

	<b>Estação de Aquecimento</b>	<b>Estação de Arrefecimento</b>
Hipóteses assumidas	Actividade 1,2 met Vestuário 1,0 clo	Actividade 1,2 met Vestuário 0,5 clo
Temperatura operativa	22±2°C	24,5±1,5°C
Humidade relativa do ar	30 % a 70 %	30 % a 70 %

O modelo de conforto de Fanger foi desenvolvido com base em ensaios de um grande número de pessoas em câmara climática e foi apreciada a sua adequação com ensaios realizados em edifícios em diversos locais do planeta (McCartney, 2002). Mesmo satisfazendo às temperaturas de conforto indicadas no Quadro 2.10 é expectável que 10% dos ocupantes manifestem insatisfação com o ambiente térmico. No artigo de Dear (1998a) é referido que em diversos estudos conduzidos em edifícios com ar condicionado o modelo PMV se aproxima da sensação de conforto manifestada pelos ocupantes.

Apesar dos princípios racionais inerentes a este método, são lhe apontadas diversas limitações, por exemplo, assumir uma relação unívoca entre stress fisiológico, sensação térmica e desconforto associado, não ter em conta por exemplo que as pessoas podem estar confortavelmente quentes ou frias!

Oseland (1995) realizou uma comparação da sensação térmica expressa por 30 pessoas com base em ensaios em câmara climática, em casa e no escritório. Dos resultados obtidos verificou que a temperatura neutra manifestada pelos ocupantes em casa era 2,2 °C inferior à manifestada nos ensaios na câmara climática e no escritório era inferior em 0,7 °C à dos ensaios em câmara climática.

Em diversos estudos de edifícios com ventilação natural e sem ar condicionado, nos quais os utilizadores podem abrir janelas, controlar o sombreamento, ligar uma ventoinha, etc, foi verificado que os ocupantes se sentem confortáveis para temperaturas mais quentes/frias do que as previstas com base no modelo de Fanger. Por outro lado estas condições de conforto menos restritivas ao permitirem obter uma percentagem equivalente de pessoas com conforto, permite reduzir em cerca de 60% o consumo de energia, conforme se concluiu no estudo de Oseland (1997) realizado em 23 edifícios no UK (uns com AVAC, outros com ventilação natural. Além da redução dos consumos de energia, a possibilidade de alargar as condições conforto térmico permite reduzir os custos das instalações de climatização e os custos de manutenção.

De acordo com a norma ISO 7730, 2005 e ASHRAE 55, 2004, na estação de arrefecimento, uma velocidade média do ar de 0,6 m/s permite incrementar a temperatura

operativa máxima de conforto em 2°C, para a mesma sensação térmica dos ocupantes, devido ao aumento das perdas de calor por convecção.

Neste trabalho é considerado o modelo de conforto adaptativo no estudo dos edifícios de habitação e para analisar a possibilidade de dispensar a instalação de sistemas mecânicos de arrefecimento e estimar as necessidades térmicas de aquecimento. Na Figura 2.9 apresenta-se uma representação gráfica das temperaturas de conforto previstas com vários modelos de conforto adaptativo, nomeadamente o previsto na norma ASHRAE 55, 2004 (eq. 2.1) para os edifícios sem sistemas mecânicos de arrefecimento. Esta proposta da ASHRAE é baseada em cerca de 21000 medições realizadas, essencialmente, em edifícios de escritórios em vários locais do planeta (Brager, 2000). Na Figura 2.9 também são apresentadas as curvas correspondentes às temperaturas definidas no Quadro 2.10.

$$\text{Limite de aceitação de 80\%} = 0,31 \times T_m + 17,8 \pm 3,5^\circ\text{C}$$

$$\text{Limite de aceitação de 90\%} = 0,31 \times T_m + 17,8 \pm 2,5^\circ\text{C}$$

eq. 2.1

$T_m$  é a temperatura média mensal.

No projecto SCAT (McCartney e Nicol, 2002) foi desenvolvido um algoritmo de controlo adaptativo (*ACA – adaptive control algorithm*) para edifícios com AVAC de forma a minimizar os consumos de energia. Para Portugal é proposto o algoritmo representado na eq. 2.2 e para a Europa é pela eq. 2.3. Nas equações a temperatura média  $T_{RM80}$  é dada pela eq. 2.4. Este modelo foi adoptado na norma EN 15251,2007, com um intervalo de temperatura de  $\pm 3^\circ\text{C}$  para a classe II.

$$T_{\text{conf}} = 0,381T_{RM80} + 18,12 \quad \text{eq. 2.2}$$

$$\begin{cases} T_{\text{conf}} = 0,302T_{RM80} + 19,39 & \text{se } T_{RM80} > 10^\circ\text{C} \\ T_{\text{conf}} = 22,88 & \text{se } T_{RM80} \leq 10^\circ\text{C} \end{cases} \quad \text{eq. 2.3}$$

$$T_{RM80} = 0,80T_{RMn-1} + 0,20T_{DMn-1} \quad \text{eq. 2.4}$$

em que:

$T_{\text{conf}}$  é a temperatura de conforto interior;

$T_{RM80}$  é a temperatura média do algoritmo no dia  $n$ ;

$T_{RMn}$  é a temperatura média do algoritmo no dia  $n-1$ ;

$T_{DMn-1}$  é a temperatura média diária do dia  $n-1$ .

Não deixa de ser surpreendente o facto de no modelo ACA (McCartney, 2002) a temperatura de conforto ser de 22,9 °C, quando a temperatura exterior é inferior a 10 °C, portanto, superior ao valor mínimo de 20 °C que se encontra referido tipicamente para a estação de aquecimento Quadro 2.10.

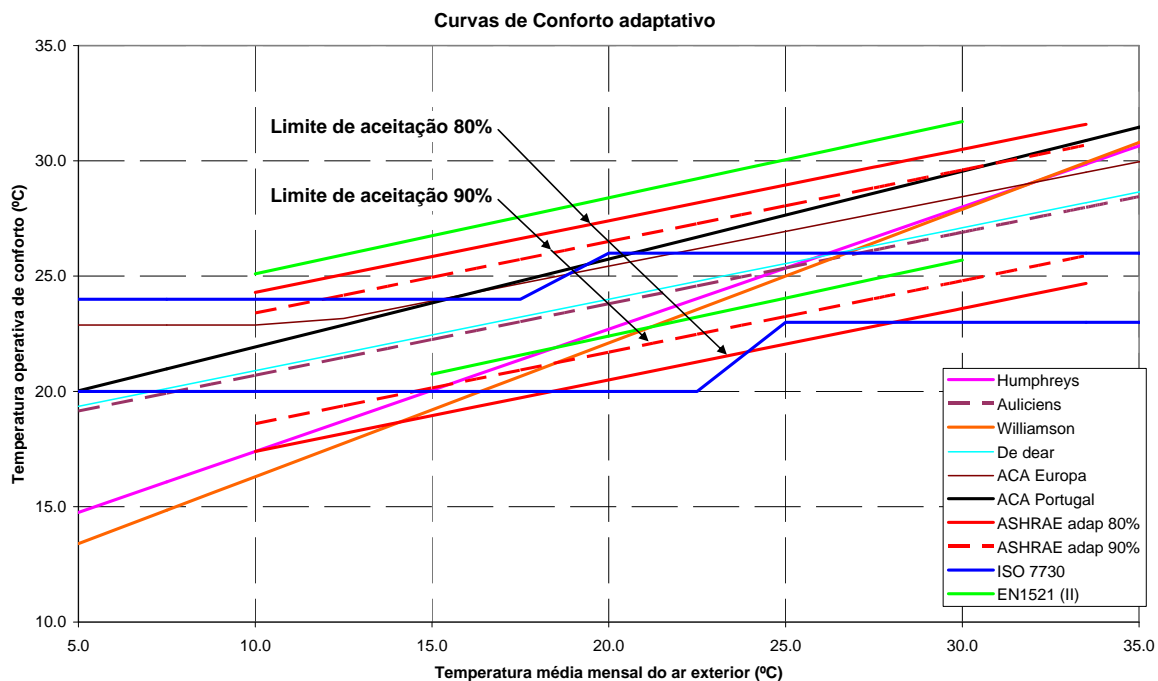


Figura 2.9 – Temperaturas de conforto de modelos de conforto adaptativo

De uma forma geral as curvas propostas nos vários modelos adaptativos enquadram-se dentro dos limites de aceitabilidade de 80% da norma ASHRAE 55, 2004, Figura 2.9. Da figura também é possível observar a diferença entre os limites propostos para o conforto adaptativo e os limites propostos na norma ISO 7730, em que, no caso dos meses mais frios e dos meses mais quentes podem existir diferenças nas temperaturas de conforto de cerca de 2,6°C ( $T_{ext}= 10^{\circ}\text{C}$ ) a 5,5°C ( $T_{ext}= 33,5^{\circ}\text{C}$ ).

Estas diferenças nas temperaturas de conforto são concordantes com um estudo realizado pelo INETI numa escola do concelho de Mafra (Patricia, 1997), em que os alunos manifestaram estar confortáveis com uma temperatura interior de 14 °C, apesar da metodologia da norma ISO 7730 prever uma sensação térmica classificada como moderadamente frio ( $PMV=-1,1$  e  $PPD=30\%$ )! Existem estudos na Grécia em edifícios sem sistemas mecânicos de climatização que revelam ocupantes satisfeitos com ambientes térmicos com temperatura interior do ar de 30,5 °C (Baker, 1996)!

Com base em trabalhos mais recentes (Dear, 2006) propõe que em vez da temperatura média mensal seja utilizada uma temperatura média semanal dada a maior correlação entre as expectativas das pessoas e a sua adaptação (por exemplo o vestuário) às condições ambientais exteriores dos dias mais próximos (eq. 2.5).

$$T_{mot} = 0,34 \times T_{dia} + 0,23 \times T_{dia-1} + 0,16 \times T_{dia-2} + 0,11 \times T_{dia-3} + 0,08 \times T_{dia-4} + 0,05 \times T_{dia-5} + 0,04 \times T_{dia-6} \quad \text{eq. 2.5}$$

De forma a reduzir as discrepâncias entre as previsões de conforto e os resultados PPD/PMV em edifícios não-climatizados, foram introduzidas classes de conforto no modelo de Fanger com percentagens previsíveis de ocupantes insatisfeitos diferenciadas (CR 1752, 1998); em que a classe C ( $PPD < 15\%$ ) seria aplicável a edifícios com ventilação natural, sem

ar condicionado. Contudo esta classe C de conforto não tem em conta a correlação entre a temperatura de conforto e a temperatura exterior verificada na generalidade dos estudos em edifícios não-climatizados, sendo por isso considerada uma aproximação pouco satisfatória. Posteriormente Fanger (2002) propôs um factor de expectativa (factor multiplicativo de PMV que varia entre 0,5 a 1,0), função da utilização de ar condicionado na região de implantação do edifício (práticas técnicas locais/regionais) e da duração dos períodos quentes.

Tendo em conta a variação das condições térmicas ao longo do tempo nos edifícios, em alguns países (Holanda e Dinamarca), para apreciar a eficácia destes a proporcionar condições de conforto foram introduzidos indicadores do número de horas de desconforto (Kurvers, 2006 e Brohus, 2006). Ou seja, o número de horas por ano em que não são satisfeitos os requisitos de conforto ou um número de horas ponderado pelo afastamento da temperatura face à temperatura de conforto. Na Holanda o número de horas de desconforto é limitado a 100 h e 20 h, repetitivamente para temperaturas superiores a 25 °C e a 28 °C. Na Dinamarca esse limite é de 100 h para temperaturas superiores a 26 °C e 25 h para 27 °C. 20 h na estação de verão corresponde a cerca de 3% das horas de trabalho (admitindo 8 h de trabalho por dia) e 0,7% do total das horas de verão. No sistema de avaliação ambiental Francês HQE (certivea, 2006) no que diz respeito ao conforto térmico em edifícios de escritórios prevê-se uma temperatura operativa de 19 °C no Inverno e 26 °C no verão. Para edifícios sem sistemas de arrefecimento prevê-se que o número de horas de desconforto no verão seja limitado aos valores indicado no Quadro 2.11. 70 h no verão corresponde a 10% das horas de trabalho e 2,5% do total das horas de verão.

Quadro 2.11 – Número de horas aceitável de desconforto térmico no verão

Desempenho satisfatório	Desempenho elevado
A temperatura operativa de 28°C não deve ser excedida em mais de	A temperatura operativa de 28°C não deve ser excedida em mais de:
- 50 h/ano zonas H1a - H1b - H2a - H2b	- 30 h/ano zonas H1a - H1b - H2a - H2b
- 60 h/ano zonas H1c - H2c	- 40 h/ano zonas H1c - H2c
- 70 h/ano zonas H2d - H3 <sup>1</sup>	- 50 h/ano zonas H2d - H3

As horas, referem-se a horas de ocupação do edifício.

#### 2.5.1.1 - Desconforto local

Admitindo que é satisfeita a condição de neutralidade térmica para os ocupantes (satisfeita a condição de conforto global), mesmo assim estes podem sentir desconforto térmico local devido a trocas de calor diferenciadas entre certas partes do corpo, ou seja, apesar do corpo humano estar em equilíbrio pode estar a ocorrer um aquecimento/arrefecimento diferenciado de certas partes do corpo causando desconforto. Os problemas de desconforto local podem ser causados por: i) diferença da temperatura do ar na vertical, ii) temperatura do pavimento, iii) risco de corrente de ar (*draught risk* - DR) e iv) assimetria das trocas de calor por radiação. No Quadro 2.12, encontram-se indicados os valores limites recomendados para a classe B do documento CR 1752, 1998.

<sup>1</sup> H3 – locais com uma temperatura exterior de projecto no inverno de -3° C e uma temperatura de verão de 26°C que corresponde à temperatura média diária que é ultrapassada em média cinco dias por ano.

Quadro 2.12 - Condições para limitar o desconforto local

	PPD	Estação de Aquecimento	Estação de Arrefecimento
Diferença de temperatura do ar na vertical	5%	<3°C	<3°C
Temperatura do pavimento	10%	19°C a 26°C	19°C a 26°C
Risco corrente de ar (DR)	20%	DR<20%	DR<20%
Velocidade média do ar		<0,15 m/s*	<0,20 m/s*
Assimetria vertical da radiação	5%	<10°C (parede fria)	<23°C (parede quente)
Assimetria horizontal da radiação	5%	<5°C (tecto quente)	<14°C (tecto frio)

\* Este limite máximo advém de se ter assumido uma intensidade de turbulência de 40% (sistema de ventilação por mistura).

Atendendo a que no interior dos edifícios e dos compartimentos existem variações dos parâmetros ambientais as condições de conforto devem ser avaliadas nos locais onde os ocupantes se encontram ou nas zonas onde seja previsível que se venham a encontrar ou nos locais mais desfavoráveis. Nesse sentido, encontra-se prevista a apreciação da diferença de temperatura do ar na vertical, nas cotas 0,1 m (nível dos pés) e 1,1 m (nível da cabeça) para ocupantes sentados e às cotas 0,1 e 1,7 m para ocupantes de pé. Por sua vez, a assimetria da radiação deve ser avaliada num ponto a uma cota de 0,6 m para ocupantes sentados e 1,1 m para ocupantes de pé. Como referência, na norma ASHRAE 55, 2004 é recomendada a realização de medições a cerca de 1 m de paredes exteriores e de envidraçados.

Estas condições conforto locais condicionam as temperaturas superficiais e também a distribuição de ar nos compartimentos. Em relação à qualidade térmica da envolvente os critérios de conforto podem limitar principalmente as propriedades térmicas dos envidraçados, devido à baixa inércia térmica e ao baixo isolamento térmico destes face aos elementos opacos (Pinto, 2006b). Nesse sentido no anexo A apresenta-se a metodologia e os resultados experimentais e teóricos obtidos no estudo das implicações dos critérios de conforto na especificação das propriedades térmicas dos envidraçados.

No Quadro 2.13 são apresentados os principais resultados para a estação de aquecimento, admitindo como condição de conforto interior uma temperatura de 20 °C e janelas de grande dimensão (3 m x 2,7 m). No caso de janelas de pequena dimensão, a adopção de envidraçados com vidro simples de uma forma geral não é causadora de desconforto, com excepção do risco de ocorrência de condensações. Os perfis das janelas, como ocupam uma fracção limitada do vão (inferior a 30%), usualmente não apresentam um impacte significativo nas condições de conforto térmico interior, com excepção do risco de ocorrência de condensações.

A aplicação de cortinas interiores usualmente não é considerada. No entanto, neste estudo evidenciou-se que a sua utilização atenua alguns dos aspectos de desconforto, nomeadamente o fenómeno de corrente de ar, pelo que nessas situações até pode ser razoável adoptar envidraçados com isolamento térmico inferior ao valor indicado no Quadro 2.13.

Quadro 2.13 - Umax para assegurar requisitos de conforto na estação de aquecimento em envidraçados de grande dimensão (W/m<sup>2</sup>/K)

<b>Zona climática:</b>	<b>I1</b>	<b>I2</b>	<b>I3</b>
Conforto global	5,8	4,5	3,8
Assimetria radiação	5,8	5,8	5,8
Diferença temperatura pés cabeça	5,3	4,3	3,7
Corrente de ar	3,5	2,9	2,5
Condensação	3,8	3,0	4,6
<b>U máximo</b>	<b>3,5</b>	<b>2,9</b>	<b>2,5</b>

Em relação à estação de arrefecimento, o impacto dos envidraçados nas condições de conforto global encontra-se relacionado essencialmente com a transmitância e a absorptância solar. Para envidraçados de grandes dimensões mostra-se que a aplicação de vidros de controlo solar pode conduzir a temperaturas na superfície interior excessivamente elevadas, mesmo com a adopção de vidros duplos, para assegurar a condição de conforto de 25 °C no interior. Nesse sentido, foi mostrado que o sombreamento do envidraçado ou a aplicação de uma protecção solar exterior pouco absorvente permite limitar este problema de conforto, sem agravar o consumo de energia. No caso de janelas de dimensões mais limitadas, de uma forma geral os problemas de conforto são menores, sendo também satisfatória a adopção de vidros simples.

Como condições a satisfazer pelos envidraçados recomenda-se que para as condições mais desfavoráveis a temperatura superficial interior do envidraçado seja inferior a 31,5 °C, para assegurar um valor máximo da temperatura operativa de 26 °C com a temperatura do ar interior e das restantes superfícies de 25 °C. Nesse sentido, devem ser ponderadas as combinações de vidros e protecção solar que permitam satisfazer aos limites aplicáveis à temperatura da superfície interior, podendo nalguns casos requerer a aplicação de vidros de baixa emissividade.

No caso da temperatura média radiante ser excessiva, para assegurar o conforto térmico interior será necessário aumentar (na estação de aquecimento) ou diminuir (na estação de arrefecimento) a temperatura do ar interior, o que tem como consequência um aumento das perdas térmicas, sendo por isso essencial corrigir o isolamento térmico do vão.

Com base nos resultados obtidos verifica-se que em Portugal a aplicação de vidros duplos permite garantir de forma satisfatória a generalidade dos aspectos de conforto directamente relacionados com os envidraçados, não sendo usualmente requerido um isolamento térmico comparável ao exigido em climas mais frios onde em alguns casos se pretende evitar a formação de gelo nas superfícies mais frias.

#### 2.5.1.2 - Aspectos regulamentares

Sobre as condições térmicas no interior dos edifícios em Portugal aplicam-se as condições de referência definidas no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006), destinado a promover uma melhor qualidade térmica da envolvente e como tal a minorar as necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento, principalmente nos edifícios de habitação e as definidas no Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE, 2006) destinado a limitar as potências instaladas e a maximizar a eficiência energética no funcionamento dos sistemas de climatização.

Nas versões de 2006 do RCCTE e do RSECE são indicadas como condições de conforto 20 °C na estação de aquecimento e 25 °C e 50% de humidade relativa na estação de arrefecimento. No RSECE é também referido um limite para a velocidade do ar de 0,2 m/s.

Pelo que foi referido na secção anterior, verifica-se que as condições nominais interiores indicadas na regulamentação térmica publicada em 2006 (RCCTE, 2006 e RSECE, 2006) correspondem aproximadamente às condições estáticas de conforto preconizadas nas normas para edifícios com sistemas de climatização, não tendo em conta os modelos de conforto adaptativos aplicáveis a edifícios não climatizados, para os quais seria admissível uma temperatura interior mínima de 18 °C (para temperatura exterior média mensal de 10 °C) e uma temperatura máxima de 28 °C (para temperatura exterior média mensal de 22 °C).

Conclui-se assim que a regulamentação térmica, além de não considerar o conhecimento entretanto adquirido quanto aos critérios de conforto adaptativo, conduz por esse facto a estimativas “exageradas” das necessidades térmicas. Por outro lado, a metodologia de verificação da regulamentação impõe a existência de climatização de todos os espaços úteis (nem que seja com sistemas por defeito) o que de certa forma está a compelir à previsão em projecto e à instalação de sistemas de climatização (eficientes) como forma de reduzir as necessidades energéticas nominais anuais, não se constituindo como um incentivo à arquitectura bioclimática e à adopção de estratégias passivas que poderiam dispensar a instalação de sistemas mecânicos de arrefecimento.

### **2.5.2- Qualidade do ar interior e caudais de ventilação**

Para assegurar o bem estar no interior dos edifícios além de assegurar condições aceitáveis de conforto térmico deve ser assegurada a qualidade do ar interior, pois o homem nas sociedades modernas passa cerca de 90% do seu tempo no interior de edifícios (habitação, locais de trabalho, entretenimento, compras, etc.). Os problemas de qualidade do ar interior podem ser agudos e causa de doenças respiratórias graves (cancro, asma, etc) ou podem ser temporários e incapacitante como a vermelhidão da pele, fadiga, dores de cabeça, irritação de olhos, nariz e garganta, congestão nasal, espirros, tosse, etc.

Para assegurar a qualidade do ar interior é necessário efectuar a renovação do ar. A ventilação geral dos edifícios destina-se a assegurar a remoção dos poluentes e também a:

- promover a admissão de oxigénio para a respiração do homem (0,1 a 0,9 l/s);
- promover a admissão de oxigénio para os aparelhos de combustão;
- minimizar o risco de transmissão de doenças por via respiratória;
- promover condições que optimizem o conforto e a produtividade;
- para diluir os poluentes e odores a valores considerados satisfatórios;
- controlo das condições termo-higrométricas interiores, para evitar a ocorrência de condensações e condições propícias para o aparecimento de fungos e bolores, sobreaquecimento interior.

Após o choque petrolífero dos anos 70 para reduzir os consumos de energia de climatização foram reduzidas as taxas de ventilação, Figura 2.10. Esta redução dos caudais juntamente com a introdução de novos materiais na construção com emissões de substâncias químicas para o ar, conduziram ao aparecimento de problemas de saúde e salubridade em alguns edifícios, tendo sido introduzidos os conceitos de edifícios doentes, síndrome dos edifícios doentes e doenças associadas aos edifícios (Rostron, 1997). Pelo que os caudais de ventilação mínimos necessários para assegurar a qualidade do ar interior são centrais para a eficiência energética dos edifícios e para a sua salubridade.



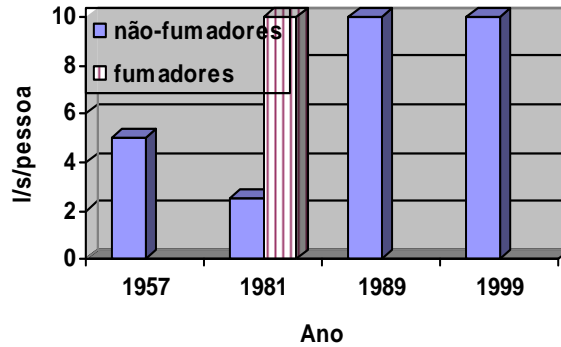


Figura 2.10 - Evolução da taxa de ventilação em edifícios de escritório recomendada pela ASHRAE

A qualidade do ar inteiro é uma função da qualidade do ar exterior admitido por ventilação ou infiltrações do ar, das fontes/poços de poluição existente no interior do edifício, dos seus equipamentos e dos caudais de ventilação.

Os primeiros estudos sobre a qualidade do ar interior datam de meados do século XIX, nos quais era assumido que a maioria dos poluentes podia ser removida por limpeza, restando apenas para remover os poluentes gerados pelo Homem (Schreiber, 2000). Em 1858 Pettenkofer introduziu o CO<sub>2</sub> como indicador dos bioefluentes humanos e propôs um limite de 1000 ppm para a concentração de CO<sub>2</sub>, referindo igualmente que para assegurar a QAI era importante limitar a diferença de concentração de CO<sub>2</sub> entre o interior e o exterior<sup>1</sup>. Em 1936 Yaglou introduziu a apreciação subjectiva da qualidade do ar pelos ocupantes, através da opinião que estes emitiam quando entravam pela primeira vez na sala. Nestas propostas o homem continuava a ser considerada a principal fonte de poluição interior. De forma complementar existiam exigências para o limite de concentração de alguns poluentes do ar (WHO,1987). Em 1988 foi desenvolvido por Fanger (1988b) um método destinado a apreciar a percepção que os ocupantes têm da qualidade do ar interior e que depende do odor e das propriedades irritantes do ar. Efectivamente, as poluição do ar pode encontrar-se dentro dos limites convencionais de aceitabilidade e mesmo assim os ocupantes manifestarem sentir o ar como desagradável. Na Figura 2.11 e na Figura 2.12 apresenta-se a percepção da qualidade do ar função dos caudais de ventilação e para a poluição emitida por uma pessoa.

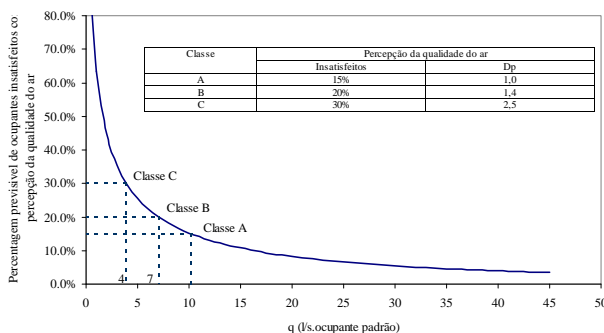


Figura 2.11 - Percepção da qualidade do ar

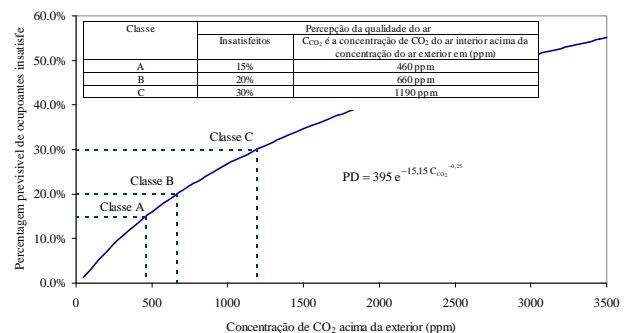


Figura 2.12 - Percentagem previsível de ocupantes insatisfeitos função da concentração de CO<sub>2</sub>

<sup>1</sup> É curioso registar que este critério se mantém válido após cerca de 150 anos e ainda é utilizado em diversas normas e regulamentos.

No estudo de 15 edifícios na Dinamarca concluiu-se que em média 42% da poluição do ar interior sentida pelos ocupantes derivava do sistema de ventilação (condutas e filtros), 20% dos materiais de construção, 25% do fumo do tabaco e 13% dos ocupantes (Fanger, 1988a). Num estudo de 529 edifícios, efectuado pelo instituto NIOSH (*National Institute of Occupational Safety and Health*), foi concluído que os problemas de qualidade do ar (irritação de olhos, nariz e garganta; dores de cabeça e fadiga; sintomas respiratórios como, congestão nasal, espirros, tosse; náusea) em cerca de 53% dos casos eram associados a ventilação inadequada, 10% dos casos à poluição do ar exterior, 24% às fontes interiores e o restante a causas desconhecidas (Godish, 1997).

Com estes resultados para assegurar o QAI, além de controlar a poluição promovida pelos ocupantes, passou também a existir uma maior preocupação com os sistemas de climatização e com os materiais de revestimento.

Existem vários estudos que evidenciam que a concentração de poluentes no interior dos edifícios como os VOC e o formaldeído, são substancialmente superiores (10 vezes) à concentração existente no exterior, em edifícios de escritórios e em edifícios de habitação, devido às emissões dos materiais de construção, mobiliário, equipamentos de escritório, produtos de limpeza, sistemas de climatização (Rehwagen (2003), Mølhave, 2003, Baughman, 1996, ECA 1992, Yu, 1998, Daisey (1993).

Apesar de existirem alguns estudos que mostram que os indicadores da qualidade do ar no inteiro de edifícios com climatização são melhores do que em edifícios com ventilação natural, contudo esses estudos também mostram existir maior prevalência de sistemas de SBS em edifícios com sistemas HVAC face aos edifícios com ventilação natural (Daisey, 1993, Seppänen, 2004, Hummelgaard, 2005, Austwick citado em ECA, 1993). Contudo, no estudo de Hummelgaard (2005), dos 13 sintomas SBS apreciados apenas existe uma diferença estatística significativa para o sintoma “vermelhidão da pele”. Um aspecto interessante e que não foi discutido pelos autores desse trabalho está relacionado com o facto de não correlacionarem a maior aceitabilidade dos edifícios com VN face aos edifícios com VM, devido à menor temperatura registada em alguns edifícios com VN face aos edifícios com VM (nos edifícios com VM 28% dos ocupantes prefeririam um ambiente mais fresco, enquanto nos edifícios com VN apenas 16% dos ocupantes manifestaram essa necessidade). Efectivamente no estudo de Fang (2004) foi concluído que os sintomas SBS são reduzidos quando os trabalhadores se encontram a temperatura e humidade mais baixa do que as correspondentes à condição de neutralidade térmica, sendo concordante com outros estudos nos quais é referido que o ar “frio” e seco conduz à percepção de ar fresco, enquanto o ar quente e húmido conduz a ar abafado (Reinikainen, 2003). De acordo com os ensaios realizados por Fang (2004), a redução da taxa de ventilação de 10 l/s para 3,5 l/s por pessoa e a conseqüente agravamento da percepção da qualidade do ar pode ser contrabalançada por uma redução da temperatura e humidade do ar de 23°C/50% para 20°C/40%!

Nestes estudos também se concluiu pela necessidade uma adequada manutenção e higienização dos sistemas para reduzir os sintomas SBS nos edifícios com HVAC. Os filtros de partículas são normalmente a principal fonte de poluição sensorial nos sistemas de ventilação (Wargocki, 2004 e Bluysen, 2003b).

Em Portugal os casos conhecidos de problemas de qualidade do ar interior são relativamente poucos, sendo o mais emblemático o pó amarelo no INSA Ricardo Jorge. De uma forma geral os estudos evidenciam que a situação não será substancialmente diferente

da apresentada, ou seja, o insuficiente caudal de ventilação poderá ser causa de problemas de QAI (Afonso, 2006 e Ramos, 2006).

### Edifícios de serviços

Função do conhecimento adquirido o conceito da percepção da qualidade do ar interior foi objecto do CR 1752, 1998 e mais recentemente encontra-se nas normas europeias EN 13799, 2007 e EN 15251, 2007 destinadas a calcular os caudais de ventilação. Nos edifícios de serviços existe um certo consenso quanto aos caudais de ventilação a adoptar devido ao trabalho e experiência da ASHRAE terem sido utilizados na regulamentação de diversos países, incluindo Portugal (RSECE, 1998 e 2006), Quadro 2.14.

Quadro 2.14 - Síntese das taxas de ventilação recomendadas em edifícios do tipo administrativo

<b>País</b>	<b>Tipo espaço</b>	<b>Recomendação de caudal</b>
RSECE, 2006	Gabinete	$5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2 \text{ pav}$ , $35 \text{ m}^3/\text{h}/\text{p}$ (10 l/s/p)
Estados Unidos		10 l/s/p (ASHRAE 62.1-2003)
CEN Report 1752: 1998	Gabinete	Classe A: $2,0 \text{ l/s}/\text{m}^2 \text{ pav}$ (20 l/s/p) Classe B: $1,4 \text{ l/s}/\text{m}^2 \text{ pav}$ (14 l/s/p) <b>Classe C: <math>0,8 \text{ l/s}/\text{m}^2 \text{ pav}</math> (8 l/s/p)</b> Admitindo $0,1 \text{ p}/\text{m}^2$ e materiais de baixa emissão de poluentes
EN 13779, 2007		Classe IDA1: 20 l/s/p Classe IDA2: $12,5 \text{ l/s}/\text{p}$ <b>Classe IDA3: 8 l/s/p</b> Classe IDA4: 5 l/s/p Admitindo materiais de baixa emissão de poluentes, não fumadores
EN 15251, 2007		Classe I: $10 \text{ l/s}/\text{p}$ ( $+1 \text{ l/s}/\text{m}^2$ ) <b>Classe II: <math>7 \text{ l/s}/\text{p}</math> (<math>+0,7 \text{ l/s}/\text{m}^2</math>)</b> Classe III: $4 \text{ l/s}/\text{p}$ ( $+9,4 \text{ l/s}/\text{m}^2$ ) Admitindo materiais de baixa emissão de poluentes, não fumadores

Na síntese efectuada por Seppänen, 2004, é referido que nos edifícios de escritórios para minimizar os sintomas de SBS os caudais de ventilação devem ser superiores a 10 l/s, sendo que esse risco é tanto menor (ou existe uma percepção de melhor qualidade do ar) quanto maior for a taxa de ventilação até valores de 20 a 25 l/s por pessoa. Seppänen, 2005 refere que ao aumentar a taxa de ventilação de 10 l/s/pessoa para 20 l/s/pessoa existe um aumento de produtividade de 1,5% e um decréscimo de prevalência de doenças (face à situação de ausência de ventilação) de 0,6 para 0,4.

Neste trabalho para a ACV de edifícios do tipo administrativo adoptam-se os caudais de ventilação previstos na norma EN 15251 com base no método do caudal por pessoa ( $n_p$ ) ou por área de pavimento ( $A_p$ ), eq. 2.6.

$$q(\text{l/s}) = \begin{cases} \max(7 \times n_p; 0,7 \times A_p) & \text{materiais com baixa emissão} \\ \max(7 \times n_p; 1,4 \times A_p) & \text{materiais não baixa emissão} \end{cases} \quad \text{eq. 2.6}$$

### Edifícios de habitação

Quanto aos caudais de ventilação de habitações as diferenças entre os países são maiores, havendo estados que se limitam a definir dimensões de aberturas para a ventilação a outros com uma maior descrição dos caudais a extrair em cada espaço, contudo os caudais são expressos em renovações de ar por hora, caudais adimensionalizados à área de pavimento, número de pessoas ou valores absolutos (Concannon, 2002). Na Figura 2.13 apresentam-se os caudais de ventilação de base recomendados em vários países para as

tipologias com as dimensões indicadas no Quadro 2.15, da qual se verifica existirem variações significativas (0,33 a 1,54 rph) quanto aos caudais de ventilação mínimos destinados a assegurar a QAI e a minimizar os consumos de energia.

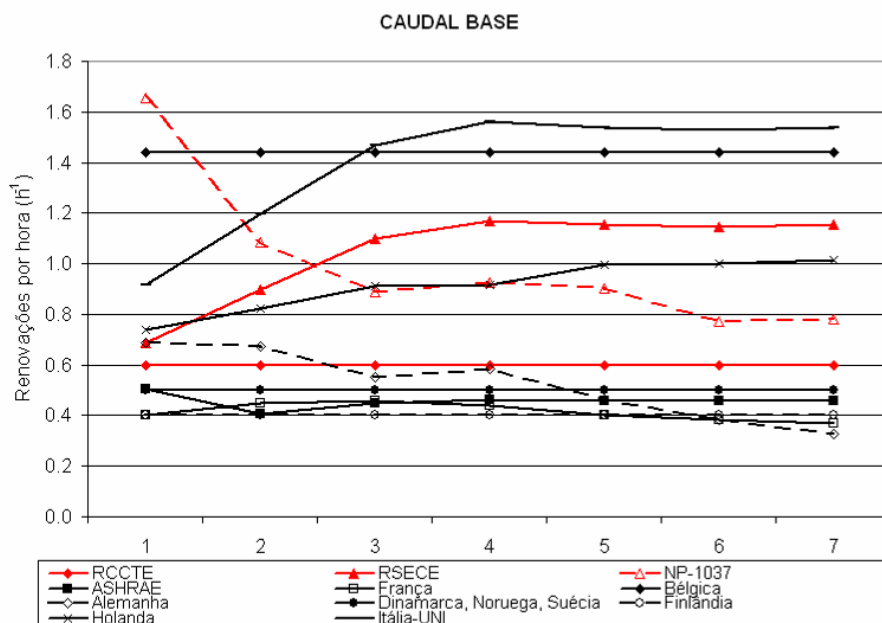


Figura 2.13 - Estimativa das taxas de ventilação correspondente ao caudal base

Quadro 2.15 - Dimensões das diferentes tipologias consideradas nos gráficos

Tipologia		T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
área de pavimento total	m <sup>2</sup>	37	55	67	86	108	132	154
área compartimentos principais	m <sup>2</sup>	20	34	46	58	80	97	114
área cozinha	m <sup>2</sup>	10	10	10	10	10	10	10
área casas de banho	m <sup>2</sup>	5	5	5	10	10	15	20
área da sala	m <sup>2</sup>	20	20	20	20	30	35	40
área dos quartos	m <sup>2</sup>	0	14	26	38	50	62	74
volume total	m <sup>3</sup>	89	133	162	207	259	316	369

Pelo facto do caudal base ser o valor mínimo da taxa de ventilação que deve ser assegurado ao longo do tempo (ou em termos médios nos edifícios com ventilação natural), este tem um impacto significativo nas trocas de calor do edifício e consequentemente na ACV do edifício, pelo que foi considerado necessário efectuar um estudo destinado a definir os caudais mínimos de ventilação a considerar em Portugal, atendendo às condições climáticas e à informação existentes à cerca das fontes de emissão de poluentes.

Para calcular os caudais de ventilação necessários para assegurar a QAI é necessário definir os poluentes, as fontes de poluição e simular a transmissão de massa.

Salienta-se que a equipa de pediatria do hospital Garcia de Orta registou desde 1998, cerca de 62 internamentos e dois óbitos devidos a intoxicação por monóxido de carbono (Tavares, 2004) que se admite estar associada a uma inadequada ventilação das habitações, principalmente uma inadequada ventilação do esquentador (aparelhos a gás do tipo B).

### Limites para a concentração de poluentes

O estudo da QAI é complexo devido à miríade de substâncias contidas no ar, à baixa concentração (grande parte das vezes substâncias com uma concentração inferior aos limites de detecção dos aparelhos de medida), aos efeitos aditivo, sinérgico ou antagónico que podem ter e à diferente sensibilidade e exposição dos ocupantes. Por outro lado os estudos epidemiológicos e toxicológicos destinados a estimar os limites para as concentrações de poluentes têm uma incerteza elevada pois existem alguns factores não controlados (nível de exposição, exposição a outros factores de risco, dificuldade de detecção e identificação das substâncias patogénicas e às incertezas envolvidas no estabelecimento de relações exposição/efeito). Aos resultados destes estudos são normalmente aplicados coeficientes de segurança de 100 a 1000 para contemplar a exposição de pessoas mais sensíveis (como, por exemplo, asmáticos, crianças, idosos e pessoas doentes), ter em conta a perigosidade do poluente e a incerteza da sua interacção com o ser humano.

O ar no interior dos edifícios contém alguns dos poluentes existentes no ar exterior, contudo estes normalmente apresentam uma concentração inferior à do ar exterior, devido à reactividade dos mesmos ou devido ao efeito de filtragem da envolvente. Por exemplo, o SO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> e pólen existem essencialmente no exterior e são encontrados no interior devido às infiltrações pela envolvente ou pelo ar exterior admitido no sistema de ventilação. Como poluentes gerados principalmente no interior incluem-se o HCHO, amónia, VOC e microrganismos. O CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas, VOC são comuns tanto no ambiente exterior como no interior. A principal fonte de poluição do ar interior é o fumo do tabaco, que é responsável pela emissão de partículas respiráveis, CO, NO<sub>2</sub> e mais de 4000 substâncias, em que 40 deles são cancerígenas (EPA, 1995 e Seppänen, 2004), sendo responsável pelo aumento do cancro do pulmão, acidentes cardiovasculares, asma e pela morte de milhares de fumadores passivos com cancro do pulmão e doenças respiratórias.

Do conhecimento do efeito da poluição do ar na saúde das populações e em trabalhadores e de estudos de epidemiológicos, encontram-se definidos limites para a concentração de diversos poluentes, Quadro 2.16. Os COVT apesar da dificuldade da sua medição e das dúvidas quanto à sua representatividade na avaliação da QAI são utilizados na regulamentação portuguesa (RSECE, 2006) e são usados profusamente em artigos científicos e técnicos e na qualificação de materiais.

A humidade do ar por si não pode ser considerada um poluente do ar interior pois o homem tolera uma humidade relativa do ar de 30% a 100%. No entanto, a humidade do ar pode repercutir-se em condições favoráveis para a germinação, crescimento e reprodução de microrganismos os quais podem afectar a saúde dos ocupantes. Os principais riscos para a saúde são (Baughman, 1996):

- Doença infecciosa (patogénica): bactérias (ex. *streptococcus*, *Legionella*), vírus (ex. Gripe), fungos (ex. *Aspergillus fumigatus*)
- Reacção alérgica (ex. asma, rinite): ácaros do pó (ex. Excreções fecais, partes secas do corpo), fungos
- Reacções imunológicas não-alérgicas (ex. Hipersensibilidade *pneumonitis*): fungos, bactérias
- Micotóxicas: fungos

Quadro 2.16 - Síntese das concentrações limite de alguns poluentes

Poluente	ISIAQ (mg/m <sup>3</sup> )	Canada (mg/m <sup>3</sup> )	WHO (mg/m <sup>3</sup> )	COMEAP (mg/m <sup>3</sup> )	INDEX (mg/m <sup>3</sup> )	RSECE (1000 ppm)	Alemanha (MAC)	Bélgica (ppm)	Suécia (ppm)	UK (ppm)
CO <sub>2</sub>		3500 ppm								
CO	10 (8h)	11 ppm (8h)	10 (8h)	10 (8h)	10 (8 h)	1,8 kg/m <sup>3</sup> (1000 ppm)	5000 ppm	5000 MAC	5000 MAC	5000 (8h)
	30 (1h)	25 ppm (1h)	30 (1 h)	30 (1h)				30000 (15 m)	1000 AIC	15000 (15 m)
	60 (30 m)		60 (30 m)	60 (30 m)				50 MAC	35 ppm MAC	50 (8h)
	100 (15 m) <sup>1</sup>		100 (15 m)	100 (15 m)				400 (15 m)	5 ppm (8h) AIC	300 (15 m)
NO <sub>2</sub>	0,2 (1h)	0,48 (1 h)	0,2 (1h)	0,3 (1 h)	0,2 (1 h)		5 ppm	3 MAC	2 ppm MAC	3 (8h)
	0,04 (anual)	0,10 (anual)		0,04 (anual)	0,04(anual)			5 pico 15 min	0,06 ppm AIC	5 (15 min)
SO <sub>2</sub>		1,0 (5 min)	0,5 (10 m)				2 ppm			100 ppb (15 min)
		0,05 (anual)	0,125 (24 h)							
O <sub>3</sub>		0,24 (1 h)	0,12 (8h)							
	0,12 (8h)					0,2 mg/m <sup>3</sup> (0,1 ppm)	0,1 ppm			50 ppb (8h)
VOC							1 ppm	1 MAC	0,5 ppm MAC	2 MEL (8h)
Tolueno	0,26 (1 sem)							2 (15 min)	0,04 pp AIC	2 MEL (15 m)
Benzeno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	5			0,005	0,005 (anual)					
TVOC				0,3 (8 h)						
Formaldeído (HCHO)	0,1 (30 min)	0,06 target level 0,12 action level	0,1 (30 m)	0,1 (30 min)			1 ppm	1 MAC	0,5 ppm MAC	2 MEL (8h)
PM								2 (15 min)	0,04 pp AIC	2 MEL (15 min)
Radiação		50 Bq/m <sup>3</sup>								
		ALARA	800 Bq/m <sup>3</sup> anual requer intervenção	100 Bq/m <sup>3</sup>						

1 WHO 2000

2 Seifert 1990

De acordo com Davies (2004) os dois factores mais importantes para os problemas respiratórios nos ocupantes são os ácaros do pó e os bolores. A existência de fungos e bolores é condicionada pela existência de superfícies húmidas, por exemplo, devido à ocorrência de condensações superficiais. De acordo com a norma (BS 5295, 1991) a humidade junto das superfícies deve ser inferior a 80%, referindo que existe risco de germinação de fungos e bolores se a humidade relativa do ar interior for superior a 70% durante longos períodos de tempo. Para minimizar condições propícias ao desenvolvimento de fungos, bolores, bactérias e ácaros devem ser evitadas condensações e a humidade interior deve ser limitada a 50%, 60% ou 70% conforme a fonte (EPA, 2001, CDNHW, 1987, ECA, 1992, BS 5250, 2002, CEN/TR 14788, 2006). Por outro lado a humidade relativa deve ser superior a 30% para evitar problemas de conforto (electricidade estática, irritação das membranas mucosas do nariz e olhos e sintomas de garganta seca).

Na Figura 2.14 encontram-se sintetizadas as principais conclusões do estudo de Sterling (1985) que mostra a variação da tendência para o desenvolvimento de microrganismos e do seu impacto na saúde humana, com a humidade relativa, fundamentando a adequação da estreita gama para a humidade relativa de 40% a 60%.

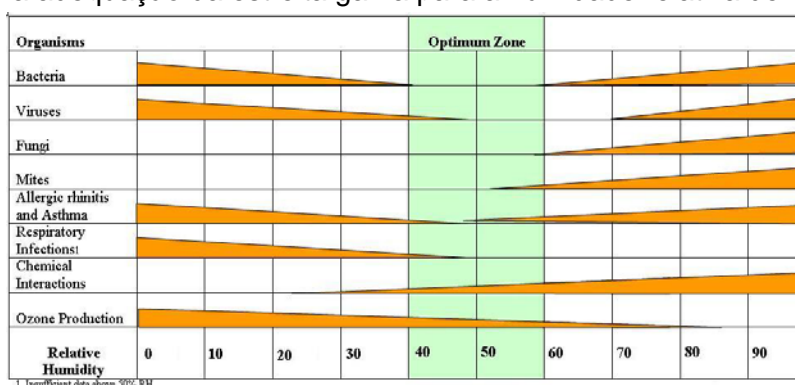


Figura 2.14 - Impacto da humidade relativa do ar interior na saúde dos ocupantes (Sterling, 1985)

De uma forma geral, nessas recomendações não são referidos períodos mínimos de exposição, os quais são importantes para a definição das taxas de ventilação. Platts-Mills, 2001 e Baughman, 1996 referem que as condições óptimas para o desenvolvimento e sobrevivência de ácaros são de 70% a 80% para 25 °C, ou na gama de 55% a 17 °C a 80% a 32 °C, para *D. Pteronyssinus*, pelo que se recomenda a humidade relativa inferior a 70%. O Reino Unido é o país com maior taxa de sintomas asmáticos em crianças com 13 a 14 anos (Howieson, 2003). Para minimizar esse risco é proposto que seja efectuada uma análise do desempenho do sistema de climatização de forma a comprovar a sua eficácia para manter a humidade relativa interior abaixo da humidade crítica de equilíbrio dos ácaros, ou seja, que a humidade relativa não excede 70% em mais de 2 horas num período de 12 horas e 90% em não mais de 1h durante períodos de 12 h, durante a estação de aquecimento (Roos, 2005). Através deste controlo da humidade relativa e do nível de isolamento térmico da envolvente não é expectável a ocorrência de condensações superficiais e de condições propícias ao desenvolvimento de fungos e bolores. A apreciação do risco do aparecimento dos bolores depende do material, das condições de temperatura, humidade e duração da exposição, sendo usualmente adoptados gráficos com curvas de limitação de crescimento de bolores (Moon, 2004).

Simonson (2002) estudou o efeito higroscópico dos materiais (madeira) na humidade relativa do ar interior de um quarto<sup>1</sup>, concluindo que os materiais podem contribuir para reduzir o valor médio da humidade relativa do ar e principalmente minimizar os valores de pico da humidade relativa, contribuindo para uma melhoria da qualidade do ar interior, por exemplo um máximo de 65% de HR em vez de 90% se fossem considerados materiais impermeáveis.

No estudo de Viegas (2002a, 2002b e 2004) num edifício de habitação multifamiliar com ventilação natural, foi monitorizada a temperatura e humidade relativa dos vários compartimentos de uma habitação e os caudais de ar escoados nas chaminés. Dos resultados obtidos regista-se que de uma forma bastante frequente a humidade relativa interior se encontra acima de 70%.

### Fontes de poluição

Uma das principais fontes de poluição do ar interior é o homem. No caso dos ocupantes serem a principal fonte de poluição interior o CO<sub>2</sub> pode ser adoptado como indicador dos bioefluentes humanos (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, aldeídos, esterres, álcoois e odores), pois a emissão de CO<sub>2</sub> é proporcional ao metabolismo (eq. 2.7). Para um adulto em actividade sedentária (M=70 W/m<sup>2</sup>, A=1,8 m<sup>2</sup>) a emissão de CO<sub>2</sub> pela respiração é de aproximadamente 0,005 l/s, cerca de 4,4% do volume do ar expirado, bastante superior face aos típicos 0,04% do ar exterior. No Quadro 2.17 apresenta-se a carga poluente sensorial e química emitida pelos ocupantes.

$$G = 4 \times 10^{-5} M.A \quad \text{eq. 2.7}$$

Em que: G emissão de CO<sub>2</sub> (l/s); M metabolismo (W/m<sup>2</sup>); A superfície do corpo (m<sup>2</sup>).

Quadro 2.17 - Carga sensorial de poluentes emitidos pelos ocupantes

Actividade	Carga de poluição sensorial olf/p	CO <sub>2</sub> l/h/p	CO l/h/p	Vapor de água g/h/p	Fonte
Dormir				40	BS
Sedentária (1 a 1,2 met)					5295
0% fumadores	1	19		50	CR
20% de fumadores <sup>a)</sup>	2	19	11×10 <sup>-3</sup>	50	1752
40 % de fumadores <sup>a)</sup>	3	19	21×10 <sup>-3</sup>	50	
100 % de fumadores <sup>a)</sup>	6				
Durante o acto de fumar	25				

a) Considera-se 1,2 cigarros/h por fumador, emissão de 44 ml CO/cigarro

Os materiais de construção, mobiliário e decoração podem ter origens e processos de fabrico e instalação diversos. De uma forma geral tem-se vindo a assistir a um crescente recurso aos materiais sintéticos, em que ao longo do tempo são emitidas (pequenas) quantidades dos seus compostos ou produtos da reacção destes, como por exemplo os compostos orgânicos voláteis (COV) e formaldeído (HCHO). Cortinas, tapetes, telas, têxteis,

<sup>1</sup> Quarto de 12 m<sup>2</sup>, 32,4 m<sup>3</sup>, superfície interior 60 m<sup>2</sup>, taxa ventilação 0,5 h<sup>-1</sup>, 2 ocupantes, cada ocupante liberta 60 gH<sub>2</sub>O/h (42 W calor latente) e 90W calor sensível. Quarto ocupado das 22 h às 7 h.



contêm fibras feitas pelo homem, sendo fontes de uma grande variedade de poluentes orgânicos e microrganismos.

No âmbito da Directiva dos produtos da Construção o requisito essencial 3 “Higiene, saúde e ambiente” acautela a garantia da qualidade do ar interior (Directiva 89/106/CEE) e limita a utilização de substâncias perigosas (Directiva 76/769/CEE). Nos trabalhos do CEN e da Comissão Europeia estão a ser efectuadas exigências específicas para alguns materiais como, por exemplo, para as placas de derivados de madeira (*wood-based panel*) EN 13986: 2002; para placas da madeira maciça (*SWP-solid wood panel*) prEN 14080, em que estas são classificados de acordo com as emissões de formaldeído determinadas em ensaio em câmara de teste EN 717-1, 1998. Estão previstas duas classes: classe E1 (HCHO  $\leq 124 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ar) ou E2 (HCHO  $> 124 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ar), ou seja uma emissão de sensivelmente  $125 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ . Admite-se que as emissões de HCHO são baixas quando são adoptadas resinas de isocianeto, fenol ou fenol-resorcinol. Para tintas e vernizes de interiores foi criada a *eco-label* Europeia (RETV, 2002) de forma a minimizar o impacte ambiental e o conteúdo de VOC a 30 g/l em tintas de parede (exceptuando água, rendimento superior a  $8 \text{ m}^2/\text{l}$ ).

Na ausência de normalização harmonizada, com o objectivo de reduzir o impacte das emissões para o ar interior dos materiais de construção, desde 1995 foram desenvolvidas marcas nacionais (Saarela, 2002, Kukkonen, 2003, DSIC, 2003, GEV, 2002). De uma forma geral as taxas de emissão que delimitam as classes não são iguais entre marcas, bem como existem diferenças na forma de medição e expressão de resultados.

De acordo com (DSIC, 2000) o odor é o factor preponderante na qualificação dos materiais, pois a concentração limite para o odor usualmente é bastante inferior à concentração limite para evitar a irritação das membranas mucosas ou de outros factores mais graves para a saúde. No Quadro 2.18 são apresentados os valores limites para as taxas de emissão de materiais das classes M1 e M2 (FISIAQ, CR 1752) e para os materiais de baixa emissão da EN 15251, 2007.

Quadro 2.18 - Classificação das emissões de materiais<sup>1</sup>

FISIAQ, CR 1752	-	M1	M2	M3
EN 15251)	Muito baixa emissão	Baixa emissão		
TVOC <sup>1</sup>	<0,1 mg/m <sup>2</sup> /h	<0,2 mg/m <sup>2</sup> /h	<0,4 mg/m <sup>2</sup> /h	Material ensaiado no qual as emissões excedem as da classe M2
Formaldeído	<0,02 mg/m <sup>2</sup> /h	<0,05 mg/m <sup>2</sup> /h	<0,125 mg/m <sup>2</sup> /h	
Amónia	<0,01 mg/m <sup>2</sup> /h	<0,03 mg/m <sup>2</sup> /h	<0,06 mg/m <sup>2</sup> /h	
Compostos cancerígenos	<0,002 mg/m <sup>2</sup> /h	<0,005 mg/m <sup>2</sup> /h	<0,005 mg/m <sup>2</sup> /h	
Sensorial	Sem odor Insatisfação com o odor <10%	Sem odor Insatisfação com o odor <15%	Pouco odor Insatisfação com o odor <30%	

Ao fim de 4 semanas a intensidade da fonte deve ser inferior aos valores indicados

<sup>1</sup> No mínimo 70% dos componentes devem ser identificados

<sup>2</sup> Compostos pertencentes à classe I da IARC

<sup>1</sup> Para um espaço ser considerado com baixa emissão de poluentes a maioria dos materiais deve ser M1.

A título de exemplo refere-se que pertencem à classe M1 os seguintes materiais: tijolo não revestido, pedra, materiais cerâmicos, vidro, superfícies metálicas e madeira natural.

Apesar do processo de emissão das substâncias ao longo do tempo ser complexa (Yu , 1998, Silva, 2000), pois numa primeira fase envolve um processo de difusão e evaporação, de acordo com (DSIC, 2000 e 2003) as concentrações medidas nas câmaras de ensaio podem ser convertidas para o ar dos compartimentos pela eq. 2.8.

$$R_{si} = \frac{C_{si} \times n_s \times V_s}{A_s} \approx R_{ki} \quad \text{eq. 2.8}$$

Em que:

- $R_{si}$ , taxa de emissão do componente  $i$  no compartimento ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ )
- $C_{si}$ , é a concentração do componente  $i$  no compartimento ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- $n_s$ , é a taxa de ventilação do compartimento;
- $V_s$ , é o volume do compartimento ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- $A_s$ , é a superfície do material exposta no compartimento ( $\text{m}^2$ )
- $R_{ki}$ , taxa de emissão do componente  $i$  na câmara de teste ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ )

A emissão de TVOC aumenta com o aumento da temperatura, no entanto existem alguns VOC que não apresentam esta tendência (Haghighat,1998, Silva 2000), e não foi encontrada uma tendência entre as emissões e a humidade relativa. As emissões de VOC dos revestimento é condicionado pelo substrato, sendo indicado que numa amostra de tinta aplicada sobre uma chapa de alumínio e outra sobre estuque, a emissão no substrato de alumínio era superior na fase inicial mas inferior à do estuque ao fim de 30 dias (Haghighat,1998, Silva, 2000).

As emissões de formaldeído (HCHO) encontram-se associadas à sua utilização em colas, derivados de madeira, carpetes, isolantes térmicos, papel, vestuário, cosmética, etc. A emissão de formaldeído decresce ao longo do tempo, sendo particularmente importante nos primeiros três meses a um ano (Sherman, 2004). A emissão é favorecida em ambientes quentes e húmidos, contudo as emissões são atenuadas pela adsorção e dessorção nos materiais de construção e mobiliário (Sherman, 2004).

No estudo de Sherman, 2004 para definir taxas de ventilação foi considerada a emissão em regime estacionário, sem considerar o efeito da temperatura, da humidade e da concentração de formaldeído no ar, o que é uma abordagem conservativa, com um desvio de sensivelmente 20%. No âmbito do trabalho de Funch (2002a) e Hodgson (2002) foi possível concluir que existe uma boa concordância entre as medições *in situ* numa habitação e os ensaios nas câmaras através da eq. 2.8.

Deste modo, apesar das dificuldades na caracterização das emissões de VOCT e HCHO dos materiais, existem resultados que evidenciam uma boa correlação entre as medições na câmara de ensaio e o comportamento em obra, desde que sejam utilizados os mesmos materiais, incluindo substrato.

Em relação aos equipamentos eléctricos e electrónicos existem estudos sobre as emissões de poluentes para o ar interior, sendo estimado para um posto de trabalho num escritório ao fim de 10 dias a emissão de 5 mgTVOC/h (Shaw (1997). As emissões de ozono

variam de 16 a 131  $\mu\text{g}/\text{c\acute{o}pia}$  antes da manuten\c{c}\~ao a 1 a 4  $\mu\text{g}/\text{c\acute{o}pia}$  ap\os a manuten\c{c}\~ao e a emiss\~ao de TVOC pode variar entre 0,5 a 16,4  $\mu\text{g}/\text{c\acute{o}pia}$ , Hates (1995). As emiss\~oes de um PC com monitor de raios cat\odicos s\~ao de aproximadamente 3,4 olf/PC, 468,6  $\mu\text{gTVOC}/\text{h}/\text{PC}$  e 5,2  $\mu\text{gHCHO}/\text{h}/\text{PC}$  e no caso de um PC com monitor TFT as emiss\~oes s\~ao residuais (Wargocki, 2004)

## 2.6- CONSUMO DE ENERGIA NOS EDIFÍCIOS DURANTE A UTILIZAÇÃO

### 2.6.1 - Aspectos gerais

Na fase de utiliza\c{c}\~ao dos edifícios o consumo de recursos \e vari\~avel e encontra-se fortemente relacionado com o tipo de utiliza\c{c}\~ao e com o clima. Um dos recursos mais importantes consumidos \e a energia, que pode ser desagregada nos diferentes usos, Figura 2.15. Como foi referido em Portugal o sector dos edifícios \e respons\~avel por cerca de 30% do consumo de energia prim\~aria, existindo uma ac\c{c}\~ao europeia concertada para reduzir o consumo de energia neste sector (Directiva 2002/91/CE e SCE, 2006).

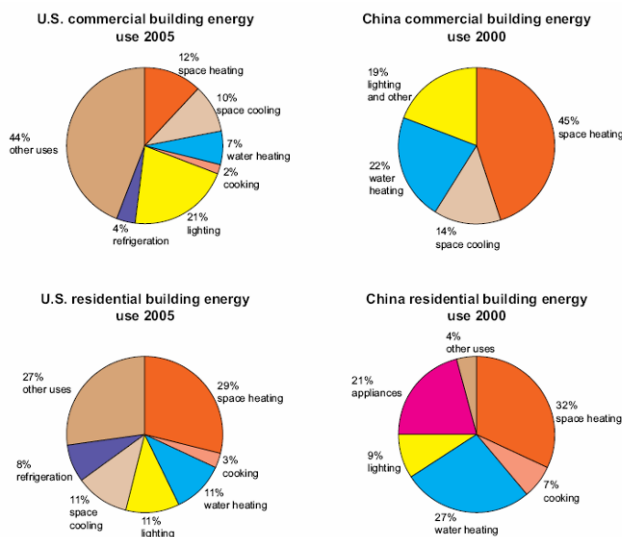


Figura 2.15– Consumo de energia em edifícios comerciais e habita\c{c}\~oes nos Estados Unidos (2005) e na China (2000)<sup>1</sup>

Tendo em conta a relev\~ancia do consumo de energia nos edifícios e o seu impacte ambiental em rela\c{c}\~ao \e emiss\~oes e \e depend\~encia da energia f\osil, ao longo do tempo existe uma preocupa\c{c}\~ao de incrementar a efici\~encia t\ermica e energ\~etica dos edifícios atrav\~es de t\ecnicas solares passivas, (Gomes, 1977, Gon\c{c}alves, 1990, RCCTE, 1990, Givoni, B., 1991, Goulding, 1992). No \~ambito das tecnologias solares passivas, enquadram-se solu\c{c}\~oes construtivas correntes como o isolamento t\ermico da envolvente, a in\~ercia t\ermica, os ganhos solares pelos envidra\c{c}ados no inverno e a protec\c{c}\~ao solar no ver\~ao, o aproveitamento da luz natural, bem como solu\c{c}\~oes menos correntes, como as paredes de trombe, a ventila\c{c}\~ao com tubos enterrados. Para a an\~alise do desempenho destas solu\c{c}\~oes existentes modelos de c\~alculo validados como por exemplo o ESP-r e EnergyPlus.

<sup>1</sup> Fonte: Rogner, 2007.

## Envidraçados

Na envolvente o isolamento térmico, a área e as propriedades dos envidraçados são aspectos centrais para o comportamento térmico e energético dos edifícios. Em Portugal tem-se vindo a assistir a um contínuo aumento da área envidraçada nos edifícios de habitação e de escritórios. Em diversos casos são reportados problemas de sobreaquecimento interior, mesmo em períodos de meia-estação e Inverno, com temperaturas interiores superiores a 30°C durante o dia. De uma forma geral crê-se que estes problemas ocorrem devido a uma inadequada protecção solar dos vãos, mas também devido a uma área de vidro excessiva.

De acordo com o estudo de fachadas solares multi-funcionais (permite admissão de luz natural, ganhos de calor e produção de electricidade com células fotovoltaicas) de Vartianen (2000) a área óptima de zona transparente para o clima mediterrânico numa fachada exposta a sul deve ser de 10% da área da fachada, devendo este valor ser inferior a 25%<sup>1</sup>. Refere que o peitoril do envidraçado se deve situar acima do plano da secretária (para maximizar luz natural). Por razões de conforto (vista para o exterior) recomenda uma área envidraçada mínima de 15% da fachada. Ghisi (2005) efectuou um estudo de optimização da área envidraçada de forma a minimizar as necessidades de iluminação artificial e as cargas de arrefecimento. Nesse estudo foi considerada uma janela de vidro simples incolor cobrindo uma área da fachada de 0% a 100% e compartimentos com várias dimensões. No Quadro 2.19 apresenta-se a área envidraçada da fachada óptima para um compartimento de 4 m × 5 m × 2,8 m.

Quadro 2.19 - Área envidraçada da fachada óptima (Ghisi, 2005)

<b>Local</b>	<b>N</b>	<b>E</b>	<b>S</b>	<b>W</b>
Leeds	20%	19%	12%	8%
Florianopolis	19%	23%	24%	14%

Para maximizar o aproveitamento da luz natural é necessário dotar o sistema de luz artificial com meios de controlo (Tzempelikos, 2005 e Athienitis, 2002). Tzempelikos (2005) estudou o impacte energético dos vãos envidraçados na cidade de Montreal, onde considerou um vidro duplo incolor. Nesse estudo, conclui que a área que optimiza a iluminação natural numa fachada exposta a sul é de 50% da área da fachada. Nestas circunstâncias (50% da fachada envidraçada) o controlo on/off da iluminação pode conduzir a uma redução do consumo de energia de 85%. No caso de ser adoptada uma protecção solar exterior (para minimizar ganhos de calor, evitar encandeamento e transmitir luz difusa), considera que o consumo de energia é minimizado para uma transmitância da solução envidraçada de 15%. Se o envidraçado for 30% da fachada mostra que se assegura 500 lux em mais de 70% do ano (9 às 17h), evidenciando que não são necessárias grandes áreas envidraçadas para assegurar níveis de luz natural satisfatórios.

Gugliermetti (2006) refere que a optimização energética tem conduzido a envidraçados cada vez maiores, mesmo em países onde o sobreaquecimento é importante, devido ao potencial de conservação de energia associado à iluminação natural e consequente redução de consumo de energia da iluminação artificial e de redução de cargas internas. No entanto, refere que os grandes envidraçados podem ser causa de

<sup>1</sup> Corresponde a cerca de 5% a 14% da área de pavimento de um gabinete de 2,7 m × 5,0 m × 2,7 m

desconforto devido a problemas de encandeamento, o que é particularmente importante em edifícios de escritórios devido ao uso cada vez maiores de computadores. Tendo em conta este problema, refere que nos países mediterrânicos o controlo da luz natural é fundamental.

Maldonado (1997) sugere para o clima português as áreas envidraçadas optimizadas indicadas no Quadro 2.20, admitindo uma envolvente com bom desempenho térmico ( $U_{paredes}=0,5 \text{ W/m}^2/\text{K}$  e vidros duplo sombreados  $g=0,55$ )

Quadro 2.20 - Área envidraçada da fachada óptima - WWR<sup>1</sup> (Maldonado, 1997)

Orientação	Edifícios de habitação		Edifícios de serviços	
	Só aquecimento	Aquecimento e arrefecimento	Só aquecimento	Aquecimento e arrefecimento
N	20%	15%	50%	45%
S	40%	50%	50%	55%
E/O	25%	20%	50%	45%
Cobertura	20%	10%	20%	10%

No estudo de Camelo (1995) foi evidenciado que ao aumentar 0,10 a relação área envidraçada/área de pavimento pode ocorrer um acréscimo da temperatura média interior entre 0,6 a 1,5°C (dependendo da orientação) para várias soluções de isolamento da envolvente e para a condição de caudal de ventilação zero.

Deste conjunto de recomendações verifica-se que de uma forma geral para edifícios de serviços em climas quentes é sugerida uma área envidraçada de 15% a 25% da área da fachada<sup>2</sup> ou uma relação  $WWR \times \tau_v$  de 0,15 a 0,25, enquanto para Portugal é sugerida uma área de 15% a 50% da área da fachada. Nesse sentido, considera-se importante a realização de um estudo destinado a otimizar a área envidraçada de forma a minimizar as necessidades energéticas.

### Permeabilidade ao ar

Nas construções recentes e face à aplicação da regulamentação sobre a qualidade térmica dos edifícios tem-se assistido a um incremento do nível de isolamento térmico dos edifícios e a um conseqüente aumento da importância da taxa de ventilação e das infiltrações de ar no balanço térmico dos edifícios (Liddament, 1998).

A ventilação compreende um fluxo de ar controlado através de aberturas para passagem do ar, podendo os diferenciais de pressão ser criados de forma natural (acção térmica ou eólica) ou por meios mecânicos. As infiltrações de ar são um fluxo de ar incontrolado que ocorre através das frinchas existentes na envolvente.

Apesar dos aspectos negativos da infiltração de ar nas perdas térmicas, na construção típica portuguesa são estas infiltrações incontroladas de ar que promovem a renovação do ar interior. Contudo, a aplicação de janelas menos permeáveis e a melhoria qualitativa da construção, ocorreu uma redução de permeabilidade da envolvente e das taxas de infiltrações de ar, o que tem conduzido a alguns problemas de QAI e a ocorrência

<sup>1</sup> WWR – window to wall ratio

<sup>2</sup> Em concordância com os valores que minimizam a energia total do Método LT desenvolvido por N. Baker (in Goulding, 1992).

mais frequente de condensações em elementos da construção. Face à tecnologia e componentes de ventilação disponíveis, para assegurar a renovação do ar considera-se as infiltrações incontroladas de ar devem ser substituídas por um sistema de ventilação natural, mecânico ou híbrido, que permita renovar o ar interior com o caudal pretendido.

Para caracterizar o caudal de infiltração de ar é frequente admitir valores convencionais de renovações de ar, existindo inúmeros regulamentos e modelos de simulação em que é seguida esta abordagem, por exemplo no RCCTE (2006) e no modelo VisualDOE. O tratamento da permeabilidade ao ar na regulamentação térmica é incipiente, pois são apresentados valores de rph apenas para as soluções de ventilação mista, de forma a incentivar a aplicação de grelhas de ventilação, reduzir a permeabilidade das janelas e retirar as caixas de estore.

A modelação da ventilação e das infiltrações de ar num edifício com vários compartimentos é efectuada normalmente com base em modelos integrais (modelos nodais). Por exemplo EN 15242, 2007; Awbi, 2003 e Orme, 1999.

Em diversos países para limitar as trocas de calor na envolvente são impostos limites para a permeabilidade ao ar da envolvente de forma a reduzir as infiltrações de ar. Os limites para a permeabilidade ao ar tem várias designações, nomeadamente  $Q_{50}$  (caudal escoado pela envolvente para uma diferença de pressão de 50 Pa),  $n_{50}$  (valor de  $Q_{50}$  em  $m^3/h$  a dividir pelo volume interior) e  $ELA_4$  (área equivalente de frinchas para uma diferença de pressão de 4 Pa). No Quadro 2.21 apresenta-se uma síntese dos requisitos de permeabilidade ao ar da envolvente existente em vários países e expressos em termos de  $n_{50}$ . Na norma EN 13790, 2004 para quantificar as infiltrações de ar é efectuada a classificação dos edifícios em função do valor de  $n_{50}$ , conforme se indica no Quadro 4.22.

Quadro 2.21 - Síntese dos valores limites especificados na regulamentação estrangeira e equiparados a  $n_{50}$

	Edifícios residenciais		Edifícios de escritórios	
França	Isoladas	$n_{50}= 3,2$	$n_{50}= 4,8$	
	Colectivas	$n_{50}= 4,8$		
UK	Boa prática	VN $n_{50}= 11,$ VM $n_{50}=6$	Regulamentar VN $n_{50}= 7,5$ VM $n_{50}= 3,8$	
	Melhor prática	VN $n_{50}= 6,$ VM $n_{50}=6$		
Suécia	$n_{50}= 2,2$		$n_{50}= 4,3$	
Holanda	Vent. Natural	$n_{50}= 3,1$		
	Vent. Mecânica	$n_{50}= 2,1$		
Noruega	$n_{50}= 4,0$		Até 2 pisos	$n_{50}= 3,0$
			Mais de 2 pisos	$n_{50}= 1,5$
USA	$n_{50}= 0,5$ a $8,5$			

\* não existe obrigação regulamentar, corresponde a valor de boas práticas

Quadro 4.22 - Classes de permeabilidade ao ar

Classe de permeabilidade	Edifícios multifamiliares	Edifícios unifamiliares
Baixa	< 2	< 4
Média	2 a 5	4 a 10
Elevada	> 5	10

Dos resultados do Quadro 2.21 não se detecta um padrão do nível de exigência da permeabilidade ao ar face à severidade do clima e ao sistema de ventilação, pressupondo-se que os valores exigidos são baseados, de certa forma, na prática da construção e constituem um incentivo para a melhoria da qualidade térmica da envolvente.

Em Portugal conhecem-se os estudos pioneiros da permeabilidade ao ar de Afonso (1988), nos quais foi ensaiados edifícios situados no Porto, nomeadamente na casa termicamente otimizada do LNETI e em 6 apartamentos de pisos intermédios de edifícios multifamiliares de 3 a 7 pisos. Os valores da permeabilidade ao ar da envolvente dos apartamentos n50 variam de  $4,4 \text{ h}^{-1}$  a  $10 \text{ h}^{-1}$ , sendo apresentado um valor máximo de  $13,8 \text{ h}^{-1}$  para um edifício de habitação social de baixa qualidade de construção, com 12 anos. Na casa termicamente otimizada foi medida uma permeabilidade de  $8,1 \text{ h}^{-1}$ . No trabalho de Silva (1991) foram ensaiadas 12 moradias unifamiliares na zona de Vila Real. Os valores de n50 medidos variam entre  $2,4$  a  $20 \text{ h}^{-1}$ . Se forem excluídos os dois valores mais elevados, verifica-se que n50 varia entre  $2,4$  e  $9,5 \text{ h}^{-1}$ , tendo um valor médio de  $5,0 \text{ h}^{-1}$ . Estes valores medidos em Portugal são concordantes e encontram-se dentro dos valores típicos de edifícios residenciais medidos noutros países, encontrando-se contudo acima dos valores actualmente exigidos em diversos regulamentos.

Em qualquer destes estudos não foi apurada a permeabilidade de alguns componentes da envolvente como as janelas e as caixas de estore, nem é indicada a permeabilidade ao ar expressa em função da área da envolvente.

Nesse sentido, para otimizar a eficiência energética e ambiental de edifícios considera necessário efectuar uma avaliação da permeabilidade ao ar de edifícios e identificar as principais frinchas da envolvente de forma a perceber limites inferiores da permeabilidade ao ar exequíveis com soluções correntes, que não passem por isolar juntas das paredes com tectos, ou as aberturas de passagem da canalização eléctrica. Por outro lado, função da amenidade do clima Português, considera-se pertinente indagar se a permeabilidade ao ar da envolvente afecta de forma relevante o desempenho térmico dos edifícios e, em caso afirmativo, que limites se devem recomendar.

### Edifícios

Seguidamente para edifícios de escritórios e de habitação, é sintetizada a informação relacionada com o consumo de energia nos edifícios para serem estabelecidos os perfis de ocupação e de consumo que serão utilizados na análise do ciclo de vida dos casos de estudo.

Para a análise do consumo de energia em edifícios existem actualmente vários modelos de cálculo que se encontram validados para a simulação do desempenho térmico de edifícios, incluindo os sistemas de ventilação e de iluminação, como por exemplo o ESP-r e o Energyplus. Neste sentido é importante definir os perfis de utilização dos edifícios para se ter uma estimativa das necessidades energéticas e para se apreciar a possibilidade de

dispensar a instalação de equipamentos de climatização, tendo em conta os princípios de conforto adaptativo adoptados neste estudo (secção 2.5.1).

### 2.6.2- Edifícios de escritórios

No RSECE, 2006 encontra-se definido o perfil de utilização nominal de um edifício de escritórios Figura 2.16, bem como um densidade de equipamentos ( $15 \text{ W/m}^2$ ), de ocupação de  $15 \text{ m}^2/\text{ocupante}$  e o indicador de eficiência energética (IEE) de  $30 \text{ kgep/m}^2/\text{ano}$  para edifícios só com aquecimento ou  $35 \text{ kgep/m}^2/\text{ano}$  para edifícios com aquecimento e arrefecimento.

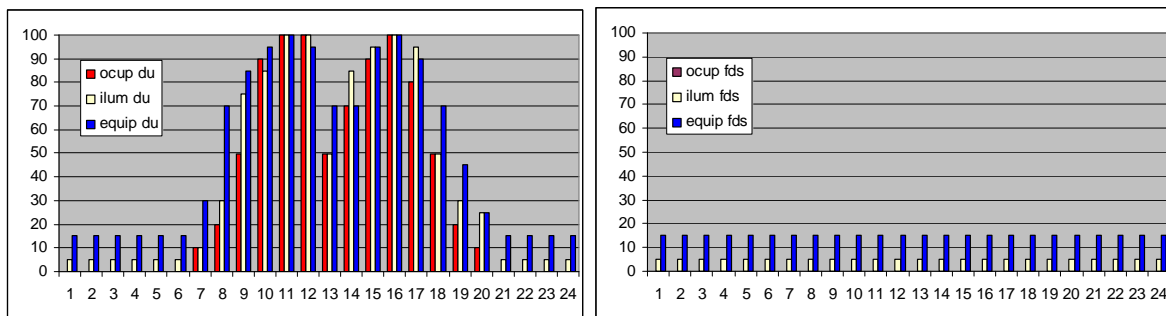


Figura 2.16– Perfil de utilização de edifícios de escritórios RSECE, 2006

Admitindo uma potência de iluminação de  $10 \text{ W/m}^2$ , para o perfil nominal de utilização do RSECE estima-se um consumo anual de energia eléctrica de  $79 \text{ kWh/m}^2$  para iluminação e equipamentos. Tendo em conta o indicador de eficiência energética (IEE) para edifícios de escritórios novos, se for admitido um equipamento de climatização do tipo bomba de calor com COP de 3, para ser verificado o RSECE (2006) as necessidades térmicas de climatização (aquecimento e arrefecimento) dos edifícios devem ser inferiores a  $125 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$ , para a zona climática I1,V1, Figura 2.17. Na Figura 2.17 apresentam-se também os resultados resultantes das auditorias efectuadas a edifícios de escritórios pelo CCE(DGE, 1994), admitindo apenas o consumo de energia eléctrica.

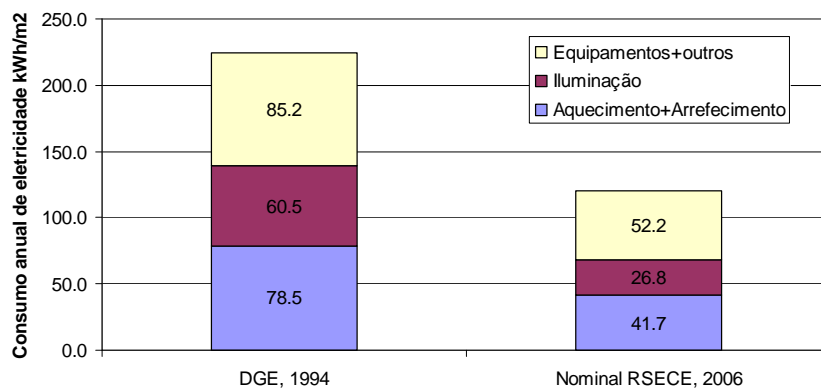


Figura 2.17– Distribuição do consumo de energia em edifícios de escritórios (DGE, 1994)

Deste modo, a legislação de 2006 (RSECE, 2006) define como limiar de eficiência energética para os edifícios de escritórios sensivelmente 50% do valor determinado em auditorias em 1994 (DGE, 1994). A componente da climatização é cerca de 35% do consumo de energia do edifício, a iluminação 22% e outros 43%.



O consumo de energia em edifícios de escritórios na Europa pode variar entre 6 kWh/m<sup>2</sup>/ano a 2100 kWh/m<sup>2</sup>/ano (Santamouris, 1996), referindo um consumo de 226 kWh/m<sup>2</sup>/ano em edifícios de escritórios com AC (ar condicionado) situados na Grécia e de 179 kWh/m<sup>2</sup>/ano em edifícios sem AC, evidenciando o impacto do AC no consumo de energia. Cerca de 40% dos escritórios analisados (quer com AC, quer sem AC) apresentam um consumo inferior a 100 kWh/m<sup>2</sup>/ano e cerca de 75% apresentam um consumo inferior a 200 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Um edifício de escritórios eficiente na Grécia apresenta necessidades energéticas anuais de 25 kWh/m<sup>2</sup>/ano, pois na fase de projecto foram minimizadas as necessidades térmicas (aquecimento de 35 kWh/m<sup>2</sup>/ano e de arrefecimento 9 kWh/m<sup>2</sup>/ano) e de iluminação artificial 12 kWh/m<sup>2</sup>/ano (potência instalada de 8 W/m<sup>2</sup> e sensores de controlo), Esbensen, 1998. Para os outros equipamentos foi considerada uma potência de 15 W/m<sup>2</sup>.

Para três casos piloto de edifícios de escritórios com a qualificação HQE (*Haute Qualité Environnementale*) o consumo de energia anual é respectivamente 57 kWh/m<sup>2</sup>/ano (8 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>), 90 kWh/m<sup>2</sup>/ano (15 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) e 121 kWh/m<sup>2</sup> (14 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>), ADEME (2006). A ADEME refere um consumo médio em edifícios de escritórios de 150 kWh/m<sup>2</sup>/ano. No Reino Unido o consumo de energia típico de edifícios de escritórios, varia entre 110 kWh/m<sup>2</sup>/ano a 450 kWh/m<sup>2</sup>/ano, consoante se tratem de edifícios apenas com ventilação natural e aquecimento e boas práticas ou com AC e de prestígio, Figura 2.18, Knight (2005). O AC aumenta o consumo de energia em sensivelmente 60 kWh/m<sup>2</sup>/ano para a situação BOM e 110 kWh/m<sup>2</sup>/ano para a típica. Nessa figura é perceptível a relevância do aquecimento e AQS.

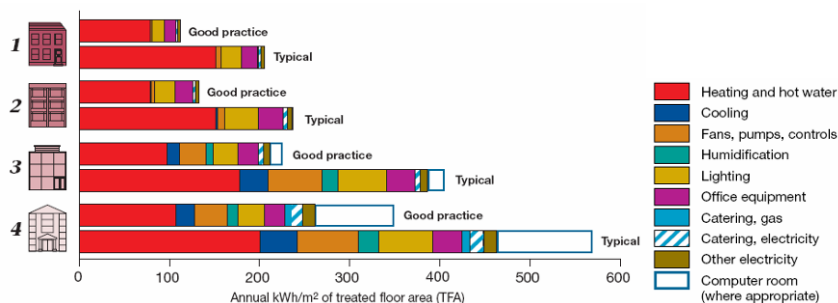


Figura 2.18– Consumo de energia primária em edifícios de escritórios UK<sup>1</sup>

Deste modo, conclui-se que apesar da maior amenidade do clima Português face ao clima Francês ou Inglês e à maior disponibilidade de luz natural, o limite de RSECE, 2006 (120 kWh/m<sup>2</sup>) enquadra-se na gama dos valores médios de França e dos edifícios do UK com ventilação natural, mostrando que um maior investimento na arquitectura bioclimática poderá permitir reduzir de forma significativa a energia de climatização e de iluminação nas zonas que se situam a uma profundidade inferior a 3 vezes o ponto mais alto dos envidraçados.

No UK para reduzir o consumo de energia de iluminação artificial é preconizado que a área do vidro seja de 20% da área da parede (para vidro duplo incolor ou baixo emissivo) ou de  $16/\tau_v^2$  para outros vidros e que a iluminação artificial seja controlada com: interruptor manual, *dimming* ou sensores fotoeléctricos, Slater (1999) e que sejam utilizadas lâmpadas e luminárias eficientes. O regulamento Francês prevê um valor de referência para a potência de iluminação de 16 W/m<sup>2</sup> para edifícios de escritórios, ou 3 W/m<sup>2</sup>/100 lux. (Arrêté, 2000).

<sup>1</sup> Knight (2005)

<sup>2</sup>  $\tau_v$  é a transmitância visível para direcção normal

Nos edifícios com AVAC, o consumo de energia de ventilação apresenta uma importância significativa, podendo em edifícios de escritórios corresponder a um consumo específico de 1,5 a 3,6 W/(m<sup>3</sup>/h), mas nos edifícios com sistemas de elevada eficiência esse consumo pode ser reduzido para 0,30 W/(m<sup>3</sup>/h), Roulet (2006) e Tipvent, 2000. Dos dados do relatório síntese (DGE, 1994) é estimado um consumo de energia de ventilação de 4,5 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Este é um aspecto específico que encontra-se regulamentado no UK e em França, sendo previstos no UK limites para a potência de ventilação de 0,56 W/(m<sup>3</sup>/h) em edifícios novos e 0,83 W/(m<sup>3</sup>/h) para instalações novas em edifícios reabilitados (DEWO, 2000) e em França são preconizado limites de 0,20 a 0,70 W/(m<sup>3</sup>/h) consoante o sistema (Arrêté, 2000). Em Portugal este aspecto da potência de ventilação não se encontra especificado no RSECE, 2006.

Na Figura 2.19 apresenta-se uma estimativa do consumo de energia eléctrica para um caudal de ventilação de 35 m<sup>3</sup>/h/pessoa. São apresentados valores assumindo um período de funcionamento de 10 horas por dia útil e para a condição de funcionamento 24 horas por dia e 365 dias por ano. Para uma potência instalada de 0,25 W/m<sup>3</sup>/h, estima-se um consumo de energia máximo de 2,3 kWh/m<sup>2</sup>/ano (funcionamento 10 h) e de 7,7 /m<sup>2</sup>/ano (funcionamento 24 h/dia), para 10 m<sup>2</sup>/pessoa. Apesar de tudo, em sistemas bem dimensionados e mantidos, a energia da ventilação mecânica pode ser uma parcela relativamente pequena no balanço de edifícios correntes (120 kWh/m<sup>2</sup>/ano) e mesmo da classe A+ (74 kWh/m<sup>2</sup>/ano), sendo contudo uma parcela relevante em edifícios de baixo consumo (25 kWh/m<sup>2</sup>/ano).

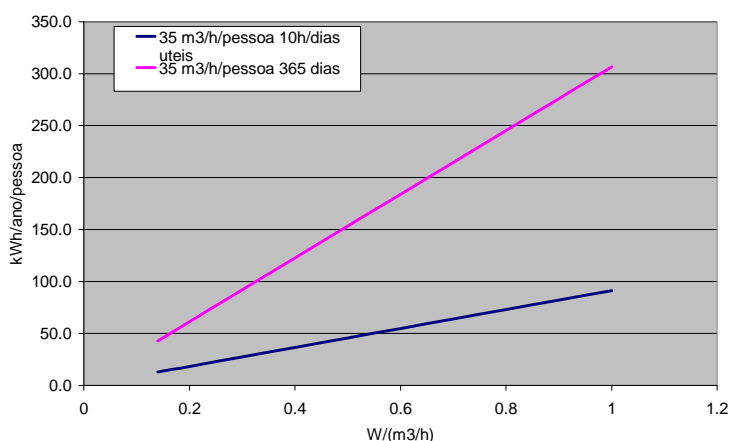


Figura 2.19– Consumo de energia da ventilação para renovação do ar

Em função do conhecimento actual pode concluir-se que nos edifícios de escritórios existe uma parcela de consumo de energia que está relacionada com as actividades desenvolvidas de aproximadamente 52 kWh/m<sup>2</sup>/ano, sendo contudo possível minimizar os consumos de energia de iluminação (27 kWh/m<sup>2</sup>/ano) e de climatização (42 kWh/m<sup>2</sup>/ano).

No perfil de utilização nominal do RSECE 2006 encontram-se incluídos todos os consumos de energia de um edifícios de escritórios. Para analisar as condições de conforto e as necessidades energéticas de gabinetes considerou-se necessário conhecer um consumo de energia por posto de trabalho constituído, por exemplo, por um computador e uma impressora, pois existem outros equipamentos que normalmente se encontram centralizados, como as fotocopiadoras, FAX, trituradores de papel, etc. Estes equipamentos (fotocopiadoras, etc.) devem estar centralizados não só por reduzirem a “potencia eléctrica

instalada” mas também por possibilitarem criar uma zona confinada com uma ventilação “independente” que permite a remoção local dos diversos poluentes emitidos para o ar (O<sub>3</sub>, VOC), bem como remover de forma mais eficaz o calor dissipado.

### Consumo de energia médio de um posto de trabalho de escritório

No documento da ASHRAE, 1997, são propostos ganhos térmicos internos de 5,4 W/m<sup>2</sup> para escritórios com baixa densidade de ocupação (1 pessoa/15,5 m<sup>2</sup>) a 21,5 W/m<sup>2</sup> (1 pessoa/ 7,8 m<sup>2</sup>) para uma elevada densidade de ocupação. Uma fotocopiadora e um FAX partilhados podem corresponder a uma potência média diária adicional de 410 W (FAX 30 W e uma fotocopiadora 300 W em *stand-by* e 1100 W em funcionamento durante 1 h). Se for admitida a partilha desse equipamento por 20 pessoas estima-se um valor de 20 W por posto de trabalho.

Efectuando a medição do consumo de energia de dois postos de trabalho constituídos por um computador e por uma impressora, um computador com um monitor TFT e outro com um monitor CRT, obtiveram-se os resultados indicados no Quadro 2.23. Estes valores do consumo de energia são substancialmente inferiores ao valor de 15 W/m<sup>2</sup> do RSECE (2006), pois não incluem outros equipamento, sendo concordantes com o valor da ASHRAE, 1997 anteriormente referido.

Nesse sentido, para avaliar o comportamento térmico de um gabinete é considerado o perfil da Figura 2.20 e um consumo de 100 W por posto de trabalho correspondente ao consumo de energia de um computador, de uma impressora (67 W Quadro 2.23), do FAX e da fotocopiadora partilhada (20 W), com uma margem de 13 W para eventuais outros acessórios.

Quadro 2.23 – Resultados da medição do consumo de energia de um posto de trabalho

	PC com monitor TFT	PC com monitor CRT
Período de utilização	55,8 Horas	57,4 horas
Consumo	3,75 kWh	6,70 kWh
Estimativa da Potência (média diária)	67 W (5,0 W/m <sup>2</sup> *)	117 W (8,7 W/m <sup>2</sup> *)

\* considerando uma área de 13,5 m<sup>2</sup> por posto de trabalho

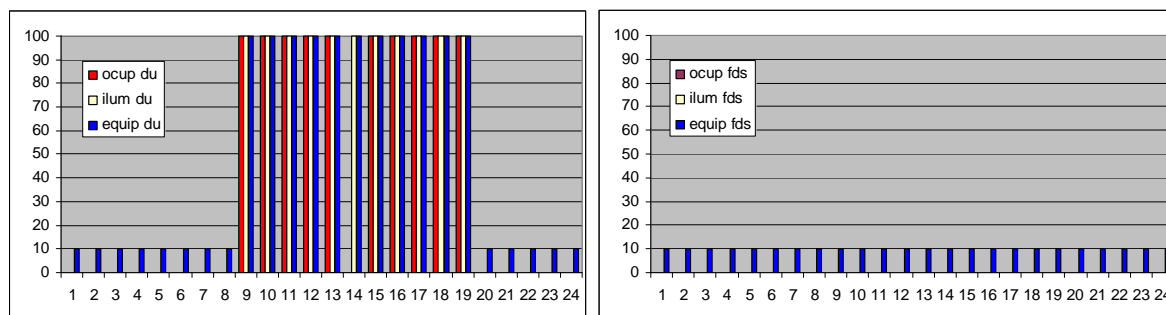


Figura 2.20– Perfil de utilização de um gabinete

### 2.6.3 - Edifícios de habitação

O consumo de energia no sector doméstico é extremamente variável e depende em grande parte do rendimento económico das famílias, taxas de equipamentos e dos seus hábitos. O consumo de energia no sector doméstico pode ser desagregado em consumo

para: águas quentes sanitárias, preparação de refeições, consumo de energia em electrodomésticos e iluminação, bem como em energia para climatização.

O consumo de energia final no sector doméstico tem vindo a aumentar continuamente, registando-se um aumento no consumo de energia eléctrica de sensivelmente 26 ktep/ano e no consumo total de petróleo “energético”, gás natural e gás de cidade de 19 ktep/na (DGGE, 2004).

Com o consumo de energia no sector doméstico (DGGE, 2004) e o número de fogos correspondentes a alojamentos habituais (CENSOS, 2001) é possível estimar o consumo médio de um alojamento (Quadro 2.24) de 0,401 tep em 1991 e 0,506 tep em 2001<sup>1</sup>. Entre 1991 e 2001 o consumo de energia eléctrica aumentou 40%, enquanto o consumo de petróleo e gás cresceu 15%, muito próximo do incremento do número de alojamentos, que nesse período foi de 16%.

Quadro 2.24 – Informação estatística do sector doméstico

	1991	2001
Nº de alojamentos habituais	3.053.920	3.551.229
Habitantes	9.867.147	10.356.117
<b>Consumo de energia</b>		
Petróleo e gás (tep)	661.565	882.249
Electricidade (tep)	564.011	913.710
Lenha (tep)	1.227.126	1.130.000
Total doméstico (tep)	2.452.702	2.925.959
Total nacional (tep)	12.731.505	18.740.534

Em 2001 cerca de 50% do consumo corresponde a energia eléctrica, ou seja 2990 kWh/ano/aloja. e 0,248 tep/ano/aloja. para a energia com base no petróleo e gás.

Na Figura 2.21 apresenta-se a distribuição de equipamentos do parque habitacional nacional, com base nos índices de conforto (CENSOS, 2001). Face a estes valores, infere-se que o número de equipamento de ar condicionado é relativamente pequeno, enquanto os equipamentos de aquecimento central já existem em sensivelmente 20% das habitações, pelo que o aumento do consumo de energia eléctrica se deveu em grande parte ao incremento de equipamentos por fogo e com a sua maior utilização.

<sup>1</sup> Nesta análise não foi considerado o contributo da lenha como fonte de energia

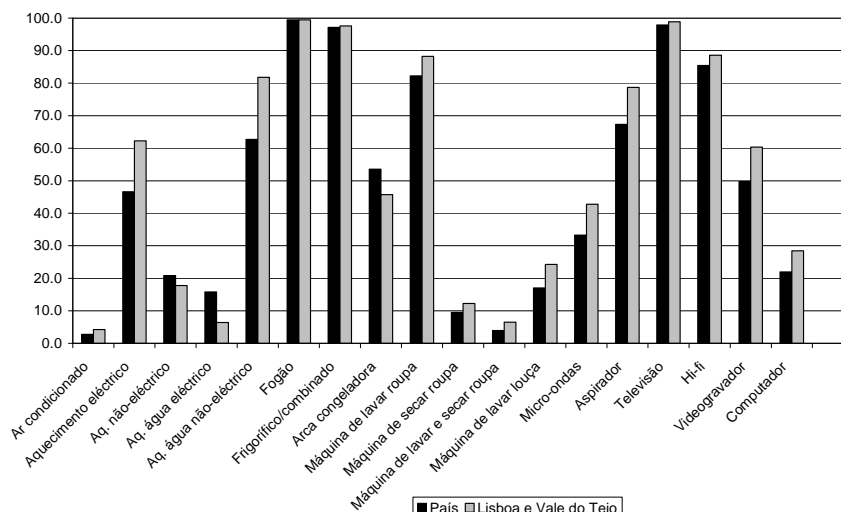


Figura 2.21 – Taxa de equipamentos por fogo

No decurso da monitorização dos consumos de energia eléctrica de 150 alojamentos foi estimado o consumo pelos diferentes usos finais, Figura 2.22, ADENE (2005). Contudo, nessa desagregação do consumo de energia encontram-se incluídos electrodomésticos que são pouco habituais nos alojamentos portugueses, como seja a máquina de secar roupa, arca congeladora, por esse facto a desagregação não deve corresponder à média nacional. Por exemplo, o consumo médio da máquina de lavar loiça é de 3% e o da máquina da roupa é de apenas 5%, apesar de terem consumos por ciclo de funcionamento idênticos e da máquina de lavar roupa existir em cerca de 90% dos alojamento enquanto a máquina de lavar loiça existir em apenas em 30%! Nesse sentido, para efectuar a ACV de edifícios de habitação foram estabelecidos os perfis de consumo indicado no Quadro 2.25, com o qual se estima um consumo anual médio de electricidade de 2290 kWh/ano/alajamento. Por outro lado foi considerada a possibilidade de serem utilizados electrodomésticos de maior eficiência e lâmpadas de baixo consumo (família ECO). A este consumo acresce ainda o consumo de energia destinado à ventilação e climatização.

Littlefair (1999) refere que a substituição de lâmpadas incandescentes de 60 W por lâmpadas fluorescentes compactas de 13 W podem reduzir o consumo anual de energia de 55 kWh, admitindo um período de funcionamento de 1275 h. Littlefair (1999) também refere que no sector doméstico o impacte da iluminação natural na conservação de energia é menos evidente que nos edifícios de escritórios, pois grande parte do consumo é realizado no período nocturno, pelo que existirá menos pressão para o aumento da área envidraçada.

Da estimativa do consumo de energia eléctrica e petróleo por alojamento resulta um consumo anual médio de energia de 0,529 tep/alajamento para a família standard, Figura 2.23. No alojamento standard considera-se o nível de equipamento indicado no Quadro 2.25 e considera-se a produção de AQS com produtos derivados de petróleo ou gás natural. Este valor de 0,529 tep/alajamento, apesar das várias aproximações, é relativamente próximo do valor 0,502 tep previsto com base nas estatísticas nacionais para o ano 2001.

Quadro 2.25 – Potência eléctrica dos electrodoméstico e padrão de utilização

Designação	Horas de funcionamento/dia	Família Standard	Família ECO
<b>Cozinha</b>			
Frigorífico	24 h/dia	60 W	30 W
Maquina da roupa	1 lavagem/2 dia	1,1 kWh/ciclo	0,9 kWh/ciclo
Máquina da loiça	1 lavagem/2 dia	1,6 kWh/ciclo	1,2 kWh/ciclo
Forno/grelhador	3 h/semana	1,17 kW	0,9 kW
Microondas	15 min/dia	900 W	900 W
Máq. Café	10 min/dia	1 kW	1 kW
Torradeira	5 min/dia	1 kW	1 kW
Ferro engomar	15 min/dia	1,5 kW	1,5 kW
Aspirador	20 min/semana	2,3 kW	2,3 kW
Iluminação	4 h/dia	40 W	40 W
<b>Instalação sanitária</b>			
Iluminação	1 h/dia	40 W	20 W
<b>Sala</b>			
TV	3 h/dia	75 W	75 W
Hifi	3 h/dia	75 W	75 W
Iluminação	4 h/dia	150 W	40 W
<b>Quarto casal</b>			
Iluminação	2 h/dia	60 W	20 W
<b>Quarto individual</b>			
Iluminação	3 h/dia	60 W	20 W
PC	2 h/dia	150 W	75 W
<b>Consumo anual (kWh)</b>	<b>365 dias</b>	<b>2290</b>	<b>1520</b>

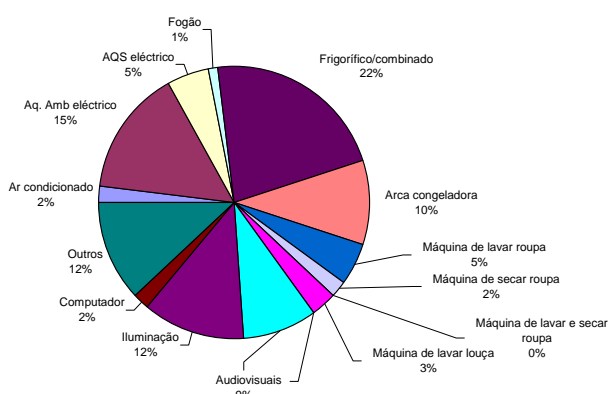


Figura 2.22 – Desagregação do consumo de energia eléctrica no sector doméstico média nacional (ADENE, 2002)

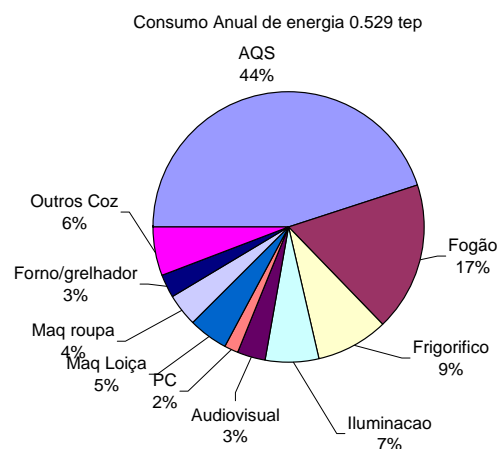


Figura 2.23 – Consumo anual de energia no alojamento Standard

Da Figura 2.23, é evidente a enorme importância do consumo de energia para a produção de AQS. A adopção de electrodomésticos e iluminação mais eficiente (família ECO), podem reduzir o consumo anual de energia em 13%, para 0,462 tep/ano.

Na Figura 2.24 indicam-se os consumos de energia anuais reais de habitações, que incluem os consumos de energia associados ao aquecimento ambiente (pois não estão dotadas de sistema de arrefecimento). Para facilitar a comparação apresenta-se também os resultados referentes às estatísticas nacionais e ao perfil da família Standard e ECO.

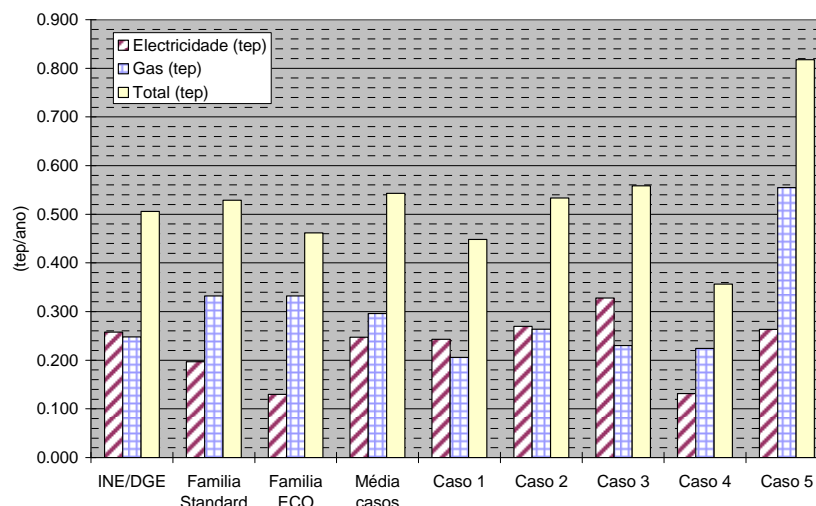


Figura 2.24 – Consumo anual de energia primária

Em face dos resultados obtidos, verifica-se que o consumo de gás da família Standard e ECO (0,332 tep) é próximo do valor médio dos casos analisados (0,296 tep), apesar da abordagem ligeiramente conservativa (banho de 40 l/dia/pessoa, 365 dias/ano) que conduz a uma ligeira majoração do consumo. Os valores do consumo de energia eléctrica dos casos reais são de uma forma geral superiores aos correspondentes ao alojamento standard, pois, nos valores reais apresentados encontra-se incluída a parcela correspondente à energia eléctrica para aquecimento ambiente. Além disso, nas habitações estudadas existem padrões de utilização dos equipamentos diferentes dos considerados, bem como equipamentos que não são considerados no Quadro 2.25, principalmente no caso 3 onde o alojamento tem ocupação contínua (em oposição à ocupação intermitente assumida), dispõe de duas televisões, de uma arca congeladora (consumo anual estimado de 600 kWh) e na sala de estar a potência de iluminação instalada é de 300 W a qual pode ser responsável por um acréscimo de consumo de 220 kWh/ano face ao consumo correspondente à potência de referência instalada de 150 W considerada no alojamento standard.

Em relação à energia para climatização o RCCTE (2006) define limites para as necessidades térmicas nominais ( $N_i$  - aquecimento e  $N_v$  - arrefecimento) indicados na Figura 2.25, função da zona climática e do factor de forma do edifício, determinadas com base numa temperatura interior de 20°C no inverno e de 25°C no verão. Contudo, refere que devido aos padrões usuais de utilização da climatização as necessidades de aquecimento e arrefecimento são apenas 10% dos valores  $N_i$  e  $N_v$ , ou seja, 4,0 a 21,6 kWh/m<sup>2</sup> para as necessidades de aquecimento e 1,6 a 3,2 kWh/m<sup>2</sup> para as necessidades de arrefecimento. Admitindo que estas necessidades de climatização são suprimidas com os sistemas por defeito do RCCTE (2006) tal traduz-se em necessidades de energia primárias de 1,3 a 6,6 kgep/m<sup>2</sup>/ano, ou seja, 14% a 45% das necessidades de energia primária da habitação<sup>1</sup>!

Estas necessidades nominais permitem satisfazer aos requisitos de um “edifício sustentável” na Suécia (38 kWh/m<sup>2</sup>) e das habitações de baixo consumo energético (*Low energy house*) ou habitações passivas (*Passive house*) na Alemanha (55 a 65 kWh/m<sup>2</sup>/ano).

<sup>1</sup> Os cálculos foram efectuados para o consumo de energia primária da família standard 529 kgep/ano e uma área de 67m<sup>2</sup>.

Contudo, atendendo à maior amenidade do clima Português, o nível de exigência poderia ser estabelecido para reduzir o número de horas previsível de desconforto e desta forma ter pelo menos necessidades de arrefecimento 0 kWh/m<sup>2</sup>.

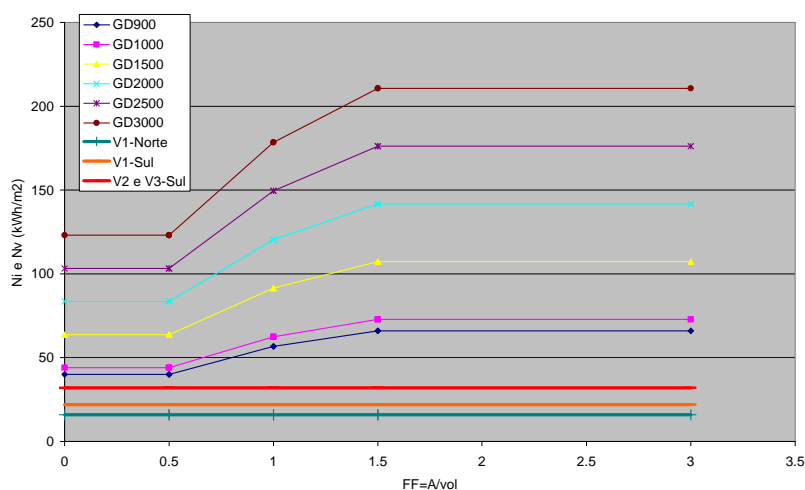


Figura 2.25 – Limite das necessidades térmicas nominais RCCTE

Além dos consumos de energia nas habitações na fase de utilização existe um consumo de água de 160 l/dia/p e a emissão de sensivelmente 1 kg/dia/p de resíduos doméstico.

## 2.7 - MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS

Para incentivar a implementação dos princípios da construção sustentável foram desenvolvidos sistemas de certificação ambiental de edifícios que permitem incorporar algumas das preocupações ambientais desde a fase de projecto, dando indicações/preferências em relação a algumas opções. Estes modelos simplificados cobrem aspectos desde o impacte ambiental a nível local até ao global, sendo abrangidos, por exemplo, os seguintes aspectos:

- Existência de sistema de gestão ambiental (definição de política ambiental, gestão de energia, gestão da manutenção, gestão de resíduos, etc.)
- Minimização das emissões de GEE e melhoria da eficiência energética do edifício
- Minimização de emissão de substâncias que empobrecem a camada de ozono, minimização de substâncias que contribuem para a chuva ácida
- Qualidade do ambiente interior, abrangendo a qualidade do ar, conforto térmico, acústico e luminoso
- Reciclagem e reutilização de materiais
- Utilização do solo e ecologia da envolvente
- Conservação de água
- Ruído para o exterior
- Contaminação microbiológica
- Materiais contendo substâncias perigosas
- Impacte do transporte dos ocupantes



De uma forma geral os aspectos social e económico da sustentabilidade encontram-se disseminados pelos diversos requisitos, nomeadamente nos relacionados com as condições de conforto, acessibilidades, amenidades, transporte e integração urbana.

Para ser possível uma apreciação integrada das diversos aspectos, nestes sistemas usualmente é efectuada uma ponderação das várias categorias analisadas, em que o resultado final pode ser: passa, bom, muito bom e excelente; certificado, prata, ouro, platina. Na Figura 2.26 apresenta-se a importância relativa das categorias de avaliação para a qualificação ambiental de edifícios nos sistemas, BREEAM - offices, BREEAM - homes, LEED e Lidera, onde se verifica o peso preponderante da categoria “Energia”.

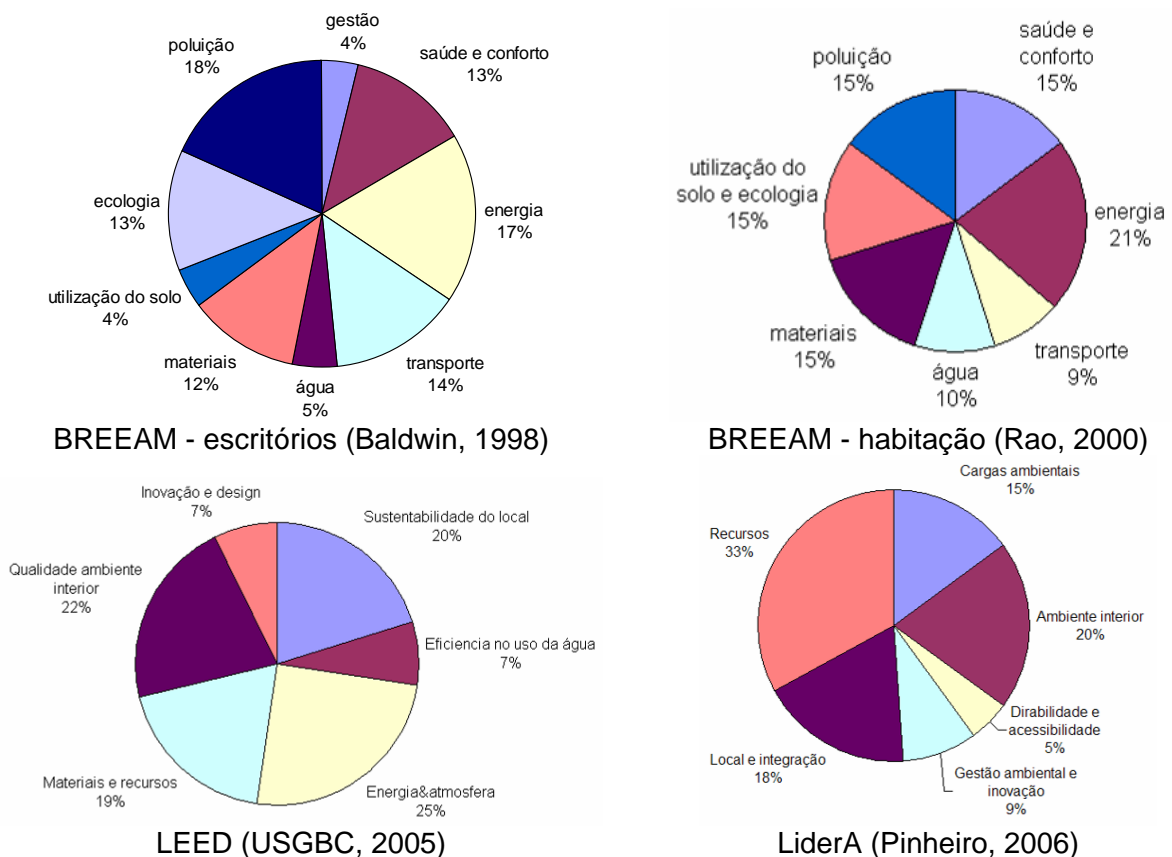


Figura 2.26 - Peso relativo das categorias para o desempenho do edifício

No sistema de avaliação BREEAM iniciado em 1990 (Baldwin, 1998), o impacto associado à carga ambiental dos materiais corresponde a um peso de 15% nas habitações e 12% nos escritórios. No âmbito do processo de qualificação LEED o contributo directo dos materiais é de 19%.

No modelo francês HQE (Certivea, 2006) a avaliação é “qualificado”/”não qualificado” através da avaliação da qualidade ambiental com 14 temas, agrupados em 4 famílias (Eco-construção, Eco-gestão, Conforto e Saúde) e 2 domínios (ambiente exterior e ambiente interior). Para cada uma das categorias o desempenho é classificado em:

- **Base:** nível correspondente ao desempenho mínimo aceitável para uma qualificação HQE. Pode corresponder ao cumprimento da regulamentação ou à prática corrente de construção.
- **Satisfatório:** nível correspondente às boas praticas.

- **Elevado:** nível equiparado aos desempenhos máximos verificadas nas operações de elevada qualidade ambiental, assegurando-se que é exequível.

Para um edifício obter a certificação HQE deve obter em 3 categorias ambientais pelo menos um nível de “elevado desempenho” e um “desempenho satisfatório” em 4 categorias ambientais e um nível base para as restantes 7 categorias. Para os edifícios sujeitos à regulamentação térmica, a categoria “4 - Gestão de energia” deve ter um “desempenho satisfatório ou elevado”.

Quando o edifício cumpre os requisitos mínimos é apresentado um perfil ambiental, Figura 2.27, não lhe sendo atribuída uma classificação. Salienta-se que para um edifício ser qualificado HQE existe um enorme enfoque na gestão durante a utilização.

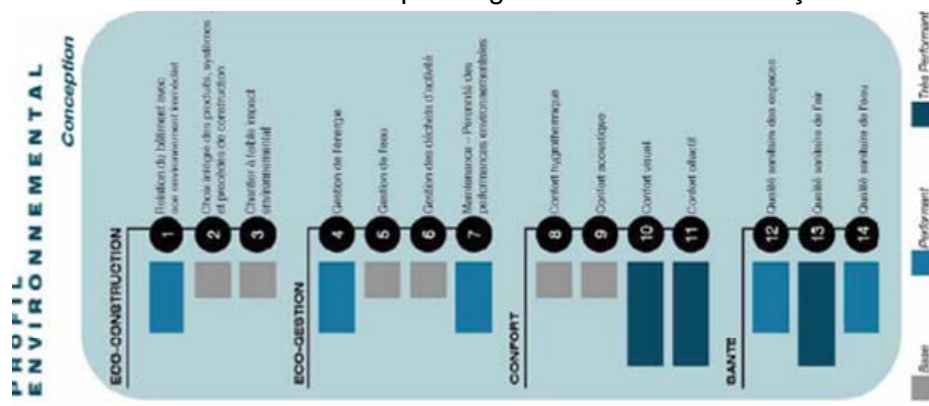


Figura 2.27 - Exemplo de perfil ambiental de um edifício HQE

No que diz respeito à categoria “2- Seleção integrada de produtos, sistemas e processos de construção” é recomendado prever uma construção durável e adaptável, na qual sejam previstos meios para a manutenção (acessos), seleccionados produtos de construção com baixo impacto ambiental e que limitem problemas de saúde no interior. Nesses dois últimos aspectos, a avaliação HQE aponta essencialmente no sentido de se conhecer o impacto ambiental dos produtos (declaração ambiental) e as suas potenciais emissões de formaldeído ou VOC, em vez de impor limites. No âmbito desta avaliação não estão incluídos os sistemas AVAC, pois consideram ainda não existir informação suficiente. Como período de vida útil das construções consideram vida curta (10 anos), média (25 anos), normal (50 anos) ou longa (100 anos).

No que se refere à gestão da energia, no sistema HQE são incentivadas as soluções passivas e está previsto o “desempenho satisfatório” quando o edifício apresenta necessidades energéticas (aquecimento, arrefecimento, iluminação, AQS e ventilação) de 0,90 das necessidades regulamentares e “desempenho elevado” quando são inferiores a 0,8 das necessidades regulamentares. No que diz respeito ao conforto térmico para edifícios de escritórios prevê que seja considerada uma temperatura operativa de 19 °C no Inverno e 26 °C no verão, considerando uma temperatura de 28 °C para edifícios sem arrefecimento.

Em Portugal encontra-se numa fase inicial de aplicação o sistema LiderA desenvolvido por Pinheiro, que segue uma abordagem semelhante à dos sistemas BREEAM e LEED, em que são adoptados 6 vertentes, 22 áreas e 50 critérios na qualificação ambiental dos edifícios.

Apesar da relevância destes sistemas de certificação para a promoção da construção sustentável, contudo, existem ainda alguns aspectos a melhorar. Por exemplo,

(Shaviv, 2008) refere que no caso do sistema LEED os edifícios bioclimáticos que não requeiram sistemas mecânicos para aquecimento ou arrefecimento não podem ser avaliados pelos sistema LEED. Esta situação é equiparável ao sistema LiderA no qual o item energia se baseia na classe energética do edifício obtida no âmbito do SCE. Como no SCE as necessidades de climatização são determinadas para as condições nominais de 20°C e 25°C, não atendendo aos critério do conforto adaptativo, e se considera que a climatização é efectuada com sistemas de climatização por defeito, estão a ser criadas (empoladas) necessidades de climatização que não existem, penalizando o desempenho do edifícios independentemente das preocupações de arquitectura. Saliente-se que este aspecto se encontra acautelado no sistema HQE.

## **2.8 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA**

Nesta tese pretende-se avaliar a importância da carga ambiental incorporada na construção face aos impactes ambientais relacionados principalmente com a energia da fase de utilização do edifício, nomeadamente com a energia para climatização.

Atendendo à informação disponível e ao estado do conhecimento, a metodologia adoptada para avaliar a eficiência energética e ambiental de edifícios numa perspectiva de ciclo de vida (Figura 1.8) é baseada nas seguintes fases:

- Fase 1 - Estabelecer o método de ACV com base nos princípios da norma ISO 14000 e definir o método de cálculo do indicador ambiental único que permita avaliar em termos relativos diferentes perfis ambientais;
- Fase 2 - Estabelecer os princípios sobre as condições de conforto e de utilização dos edifícios que são usados para determinar o consumo de recurso materiais, de equipamentos e de energia durante o ciclo de vida;
- Fase 3 - Efectuar o inventário de materiais de construção e de recursos materiais consumidos no ciclo de vida dos edifícios;
- Fase 4 - Estudar em maior detalhe as implicações dos envidraçados no desempenho energético e ambiental dos edifícios;
- Fase 5 - Estudar em maior detalhe as implicações da permeabilidade ao ar e da ventilação no desempenho energético e ambiental dos edifícios;
- Fase 6 - Aplicar o método de ACV a 3 edifícios de forma a avaliar propostas para uma construção mais sustentável e a inferir sobre a importância relativa da fase de construção face à de utilização.

### Fase 1

O método de ACV utilizado neste trabalho baseia-se nos princípios da norma ISO 14000. Para o objectivo do estudo salienta-se como contribuições o método de normalização e de cálculo do indicador ambiental único. Toda a análise subsequente é baseada no facto dos edifícios manterem condições de habitabilidade satisfatórias durante o período de vida útil.

### Fase 2

Na definição do método de ACV descrevem-se as condições de conforto e utilização dos edifícios. Com base nas normas internacionais e documentos de referência são estabelecidas as condições de conforto para os edifícios climatizados e não-climatizados e um critério que se destina a avaliar a possibilidade de não utilizar sistemas activos de climatização.

Face à especificidade dos envidraçados no conforto térmico discutem-se as implicações no conforto global e local de vários tipos de vidros no clima Português. Em face das diferentes recomendações existentes para a ventilação de habitações, foi efectuada uma análise teórica e experimental dos caudais de ventilação recomendáveis.

### Fase 3

A avaliação do impacte ambiental dos materiais de construção foi apoiada numa base de dados internacional (Simapro 5.0). Contudo, a informação dessa base de dados foi adaptada e completada com dados da indústria da construção nacional. Com essa informação de base e a informação à cerca do transporte e manutenção, foram então constituídas as soluções construtivas e por fim o edifício e os seus sistemas, de forma a possibilitar a análise do impacte ambiental associado à fase de construção, manutenção e desconstrução.

### Fase 4

Os envidraçados são um elemento da envolvente com um elevado impacto nas necessidades energéticas dos edifícios, na arquitectura e na sensação de conforto dos ocupantes. Nesse sentido foi efectuada um estudo paramétrico de forma a avaliar dimensões das áreas envidraçadas que minimizam as necessidades energéticas (aquecimento, arrefecimento e iluminação) anuais para edifícios com ocupação de escritórios e ocupação contínua e para os envidraçados correntes com protecções solares interiores, exteriores e entre vidros e para a utilização de fachadas dupla pele envidraçadas.

*Para as soluções envidraçadas convencionais e em particular para os vidros, existem métodos de ensaio normalizados que se podem realizar sobre os materiais, No entanto a avaliação experimental das propriedades térmicas de vidros conjugados com protecções solares apresenta maiores dificuldades de caracterização em laboratório ou com base em métodos normalizados. Em vários países são utilizadas células de teste com um elevado grau de sofisticação e dispendiosas. Nesta tese procurou-se desenvolver uma metodologia experimental destinada a caracterizar o comportamento de soluções envidraçadas com base na monitorização de células de testes “passivas” e na modelação do comportamento térmico das células Apesar dos resultados não terem sido tão satisfatório quanto inicialmente se supunha permitiram, contudo, validar o utilizador e o programa de simulação térmica de edifícios adoptado nos casos de estudo e estabelecer uma opinião crítica quanto às validações experimentais.*

### Fase 5

Neste trabalho foi realizada a avaliação experimental da permeabilidade ao ar de alguns edifícios e de alguns componentes de edifícios. Com base nessa informação experimental foi estimado o impacto das infiltrações de ar na taxa de renovação de ar e nas consequentes perdas térmicas, para avaliar se este é um parâmetro relevante para a construção nacional. Em face dessa informação, foi efectuada um estudo com um modelo de simulação térmica em regime dinâmico destinado a estabelecer recomendações para limitar a permeabilidade ao ar da envolvente, que atenda aos requisitos de conservação de energia e à prática da construção nacional. Para satisfazer aos requisitos de ventilação são consideradas as soluções de ventilação natural, de ventilação mecânica e de soluções mistas. Nesse sentido, foi caracterizado com recurso a ensaio de alguns componentes dos sistemas de ventilação natural, tendo havido a necessidade de implementar no modelo de

simulação térmica um componente correspondente ao ventilador estático do topo das chaminés que contemplasse não só os efeitos de sucção (na ausência de caudal de ar) e de perda de carga (na ausência de vento), mas também a redução do caudal de ar associada à interacção da extracção de ar na presença de vento.

### Fase 6

Com base na informação tratada nas fases anteriores são utilizados 3 edifícios, uma habitação multifamiliar, uma habitação unifamiliar e um edifício de escritórios, para aplicar o método de ACV para avaliar as hipóteses, nomeadamente:

- Analisar a carga ambiental incorporada na fase de construção face à correspondente à fase de utilização;
- Analisar a redução de impacte ambiental se for possível construir para a reutilização e reciclagem dos elementos estruturais mais pesados;
- Analisar o efeito de uma alteração da estrutura de produção de energia eléctrica;
- Analisar o efeito da alteração do isolamento térmico dos elementos opacos;
- Analisar o efeito da alteração do isolamento térmico dos envidraçados;
- Analisar o efeito da aplicação de materiais que não sejam classificados como de baixa emissão para o ar interior;
- Analisar o efeito da temperatura interior de conforto.

A informação sobre os edifícios foi obtida nos dados de projecto e no caso do edifício de serviços foram incluídos os dados de uma auditoria energética. O estudo dos edifícios de habitação foram realizados para 3 climáticas (Faro, Lisboa e Bragança), enquanto o estudo do edifício de serviços foi efectuado apenas para o clima de Lisboa onde este se situa.



### 3 - MÉTODO DE ACV ADOPTADO

Para ser possível estimar o impacte ambiental do edifício ao longo do seu ciclo de vida é necessário conhecer as quantidades de materiais consumidas, a energia, a água e as emissões para o ar, água e solo, desde a extracção das matérias-primas até ao destino final na fase de fim-de-vida. O método apresentado neste capítulo estabelece os princípios seguidos na ACV do edifício (Figura 3.1). A método utilizado encontra-se baseado na norma ISO 14040, 2006, na qual estão definidas 4 fases para a avaliação do ciclo de vida e que são detalhadas nas secções seguintes 3.1 a 3.4.

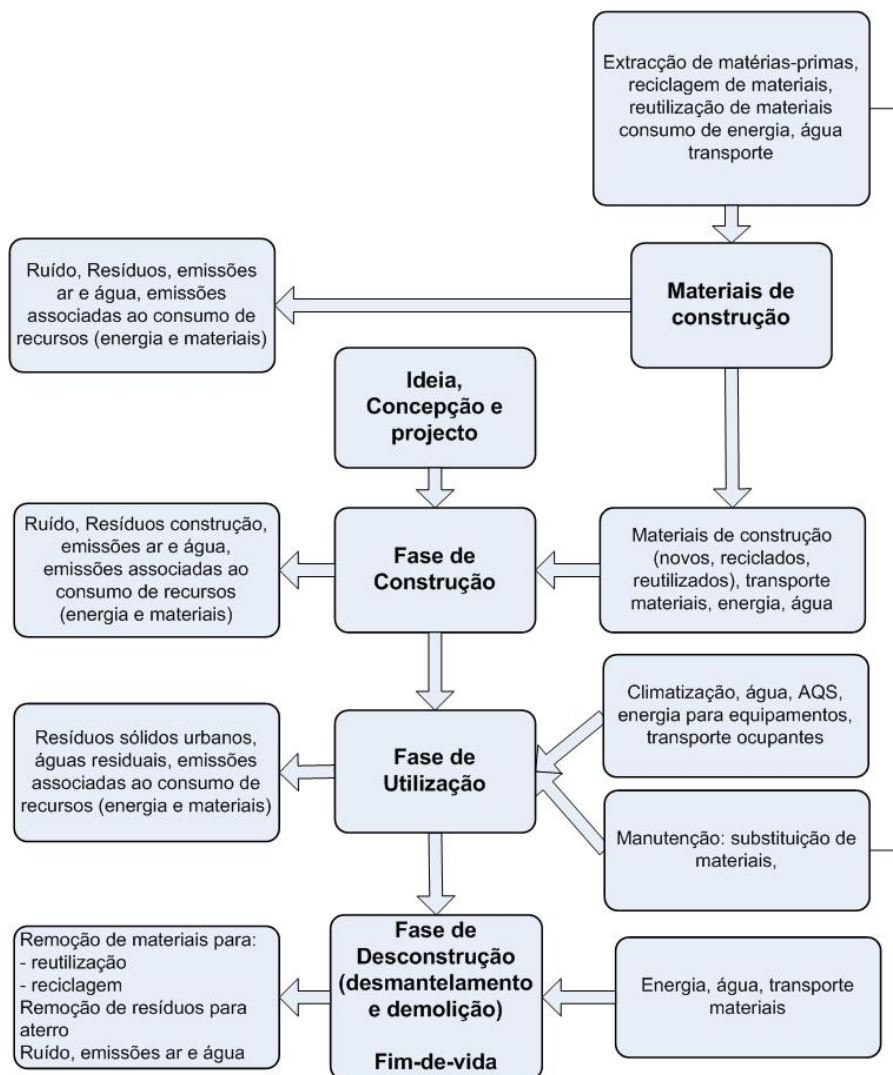


Figura 3.1 - Representação esquemática do ciclo de vida do edifício

#### 3.1- DEFINIÇÃO DO OBJECTIVO E DO ÂMBITO DA ANÁLISE

O objecto da análise é o edifício com o objectivo de avaliar o impacte ambiental de diferentes soluções de construção (nomeadamente isolamento térmico e sistemas de ventilação e climatização) no ciclo de vida, desde a extracção das matérias-primas até ao destino final dos resíduos.

Para permitir a comparação de desempenho de edifícios com a mesma função (habitação, escritórios, etc) considera-se como unidade funcional o m<sup>2</sup> de área de construção que reúne condições de conforto e segurança, durante um período de vida útil de 50 anos. Para permitir a comparação de resultados, os produtos ou edifícios devem satisfazer ao mesmo conjunto de funções. Caso os edifícios satisfaçam várias funções, será necessário distinguir entre os diferentes tipos de funções e realizar uma ponderação.

Nesta avaliação considera-se que os edifícios se encontram ocupados durante a vida útil e é assumido um ambiente interior confortável, contemplando principalmente a manutenção da temperatura interior e do caudal de ventilação, conforme é referido na secção 3.2. Deste modo na ACV dos edifícios utiliza-se a unidade funcional:

**m<sup>2</sup> de construção com condições de conforto mantidas durante um período de 50 anos**

Nesta definição da unidade funcional não se incluiu o item adaptabilidade da TC 350, devido à dificuldade inerente para a sua aplicação por exemplo a uma habitação. No caso de edifícios de serviços, será mais fácil contemplar este aspecto ao prever-se tectos e pavimentos falsos, divisórias amovíveis e condições para a adaptação das instalações.

### **Materiais e componentes**

Para a ACV do edifício, este é desagregado nos seus componentes elementares (Figura 3.3) e nos respectivos materiais. A ACV dos materiais mais representativos do edifício será efectuada com base em informação existente, principalmente na base de dados (Goedkoop, 2001) e em dados da indústria. Nesta análise será efectuada uma quantificação dos resultados da ACV dos materiais tendo em conta: fase de fabrico, fase de transporte, colocação em obra, utilização (manutenção) e a fase final de desconstrução e destino final dos resíduos.

A ACV dos materiais de construção será efectuada tendo por base o kg, m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup> de material, dependendo das suas características e funções, para um período de vida útil de 50 anos.

### **3.2 - CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO E DE QUALIDADE DO AR INTERIOR**

As condições de conforto térmico são centrais no projecto de edifícios e na análise da sustentabilidade da construção pois permitem analisar as necessidades energéticas de climatização dos edifícios e valorizar adequadamente a arquitectura bioclimática, evidenciando se é possível dispensar a climatização com meios mecânicos, nomeadamente o arrefecimento. Este último aspecto é crucial, pois desta forma são reduzidos os impactes na construção e pode ser eliminada a instalação de equipamentos consumidores de energia, eliminando os consumos de energia de arrefecimento ou confinando estes equipamentos a compartimentos específicos.

A qualidade do ar interior desempenha também um papel importante para a construção sustentável, pois é necessário assegurar uma ambiente interior que seja sentido fresco e agradável e que não seja causa de doenças.

Neste estudo foram consideradas as condições de conforto térmico estáticas aplicáveis aos edifícios climatizados e as temperaturas de conforto adaptativo para os edifícios não arrefecidos indicadas no Quadro 3.1 e previstas de acordo com a norma ASHRAE 55, 2004 (eq. 2.1 para 80%).



Nos edifícios de serviços para cálculo das necessidades térmicas de aquecimento foi considerada uma temperatura interior de 20°C e para determinar as necessidades de arrefecimento uma temperatura interior de 25 °C. Nos edifícios de habitação, para uniformizar a avaliação, para estimar as necessidades de climatização foi considerada uma temperatura de 18°C no inverno e de 27°C no verão.

Para se analisar a possibilidade de dispensar a utilização de sistemas mecânicos de climatização considera-se o critério de não ser excedida em mais de 2,5% do período de ocupação dos espaço a temperatura máxima de conforto adaptativo acrescida de 2°C (Kurvers, 2006 e Brohus, 2006), ou seja, que a temperatura operativa interior de 30°C<sup>1</sup> não seja excedida em mais de 30 h em escritórios e 75 h em habitações. Em relação ao mesmo critério para o inverno isso conduz à temperatura interior não ser inferior a 16°C em mais 60 h/ano nos escritórios e 150 h em habitações.

Quadro 3.1 - Temperatura operativa de conforto

	Ventilação natural	Climatizado
<b>Aquecimento</b>	21,3±3,5°C	22,0±2,0°C
<b>Arrefecimento</b> (zonas climáticas, RCCTE, 2006)		
V1N; V2N	23,7±3,5°C (27,2 °C/29,2 °C)	24,5±1,5°C
V1S, Açores, Madeira	24,3±3,5°C (27,8 °C/29,8 °C)	
V3N	24,6±3,5°C (28,1 °C/30,1 °C)	
V2S, V3S	24,9±3,5°C (28,4 °C/30,4 °C)	

Os valores entre parêntesis correspondem à temperatura máxima de conforto e à temperatura máxima de conforto acrescida de 2°C para analisar a possibilidade de dispensar o sistema de arrefecimento.

Para assegurar a qualidade do ar interior em edifícios de escritórios consideram-se os caudais de ventilação obtidos pela eq. 2.6. Para um gabinete com uma pessoa e 13,5 m<sup>2</sup> de pavimento é estimado um caudal de 35 m<sup>3</sup>/h/p para espaço com materiais de baixa emissão de poluentes e 70 m<sup>3</sup>/h/p nos restantes casos. Para os edifícios de habitação consideram-se os caudais de ventilação que resultaram do estudo apresentado no anexo B e que se resumem no Quadro 3.2 e Quadro 3.3.

Quadro 3.2 - Caudais de base de ventilação de habitações:

Espaço	Materiais pouco poluentes	Materiais não pouco poluentes
Quartos	MAX(5 l/s/p; 0,5 rph)	MAX(5 l/s/p; 1 rph)
Sala	MAX (6 l/s/p; 0,5 rph)	MAX (6 l/s/p; 1 rph)
Instalações sanitárias	MAX (4 rph; 12,5 l/s)	MAX (4 rph; 12,5 l/s)
Cozinha	2 rph	2 rph

Quadro 3.3 - Caudais de ponta nos compartimentos de serviço:

Espaço/equipamento	Caudal mínimo a evacuar
Hote do fogão:	MAX(50 l/s ou 60l/s/m de largura do fogão)
Locais com aparelhos a gás do tipo B	
Esquentador:	1,2×Pn (l/s)
Caldeira:	1,4×Pn (l/s)

Pn é a potência nominal do aparelho em kW.

<sup>1</sup> Em algumas zonas climáticas do país poderá ser de 30,4 °C.

### **3.3 - FASE DE INVENTÁRIO**

Na fase de inventário são avaliados todas as entradas e saídas no ciclo de vida do edifício ou material tendo em conta as fronteiras da análise. Da fase de inventário resulta essencialmente a tabela de inventário com todas as entradas e saídas relevantes de substâncias e de energia no ciclo de vida do edifício ou do material.

Nesta fase são incorporadas as previsões quanto ao ciclo de vida do edifício e dos materiais, nomeadamente quanto à utilização, à manutenção, etc, conforme é detalhado no capítulo 4.

#### **3.3.1 - Fronteiras da análise**

As fronteiras da análise definem os limites para a quantificação dos fluxos (ex. materiais, energia, emissões, etc) que são tidos em conta na ACV.

Neste estudo são consideradas as intervenções que ocorrem no interior da fronteira do edifício, bem como as intervenções que ocorrem no exterior e que estão relacionadas com as primeiras. Por exemplo, os processos que ocorrem no interior da fronteira do edifício são a construção, o consumo de energia, as intervenções de limpeza, manutenção etc. As intervenções externas que se relacionam com essas intervenções internas são, por exemplo, a produção de energia, o fabrico dos materiais de construção, o seu transporte para a obra, a reciclagem, o tratamento de resíduos e o seu transporte para o edifício. Neste trabalho não são considerados os impactes associados aos equipamentos domésticos, de escritório, etc. Como fronteira temporal considera-se o período de vida útil do edifício.

Neste estudo são considerados os impactes associados ao edifício (construção, manutenção, energia, etc.), mas não são considerados os impactes associados à criação das infra-estruturas que produzem esses materiais. Por exemplo, é considerado o impacte associado ao transporte de materiais, mas não é considerado o impacte associado ao fabrico do camião que transporta os materiais.

O transporte diário dos ocupantes do edifício e o tratamento dos Resíduos Sólidos urbanos podem ser incluídos na ACV dos edifícios dependendo do objectivo do estudo, por exemplo, na comparação de locais de construção ou processos de recolha e tratamento de RSU. Neste estudo estes aspectos não são considerados.

#### **3.3.2 - Dados de origem, regras de corte e imputação**

Na ACV de edifícios existem incertezas e limitações quanto aos dados de inventário e aos diversos cenários ao longo da vida do edifício, por exemplo, devido ao longo período de vida útil das construções.

No âmbito deste estudo serão adoptados valores disponíveis em bases de dados reconhecidas e idóneas, sendo alguns desses dados corrigidos com valores nacionais conforme se indica no capítulo 4.

Tendo em conta a pequena massa e impacte ambiental de alguns materiais estes poderão não ser considerado na ACV. Nesse sentido, considera-se como regra de corte um valor inferior a 2% dos fluxos de massa, exceptuando substâncias perigosas.

Tendo em conta que um processo pode envolver vários materiais na entrada ou na saída (por exemplo a incineração de vários resíduos, a extrusão de perfis numa fabrica de alumínio para a construção e para a industria automóvel), devem ser consideradas como regras de imputação por ordem preferencial (Ferrão, 1998; Guinée, 2001; Howard, 1999 e UEAtc, 2005):

- evitar a necessidade de imputação, através da divisão do processo em subprocessos;
- imputação baseada na expansão de sistemas;
- imputação através da subtracção de sistemas;
- imputação com base na proporção de massa, energia, valor económico ou outra grandeza relevante.

### 3.3.3 - Fim-de-vida - tratamento de resíduos

No fim-de-vida do edifício poderá ocorrer a reabilitação do edifício, o desmantelamento ou a sua demolição. Se esta fase não for prevista na fase de projecto, de uma forma geral, os RCD irão essencialmente para aterro, sem uma adequada valorização. No caso de ser realizada uma desmantelamento selectivo existem alguns matérias que poderão ser valorizados como as carpintarias, caixilharias, instalação eléctrica, canalizações. Tendo em conta as técnicas de construção actuais considera-se por defeito a solução de demolição.

A reciclagem de produtos reduz os impactes ambientais, nomeadamente, devido à redução da extracção de matérias-primas e à redução de resíduos. Por exemplo, a reciclagem de betão pode permitir substituir os inertes naturais, reduzindo a necessidade da sua extracção. A reciclagem de aço, permite reduzir a extracção de minério e o aço reciclado necessita cerca de metade da energia do aço virgem para ser produzido, conduzindo também a metade das emissões de CO<sub>2</sub>.

A reciclagem dos materiais pode conduzir a materiais:

- Com a mesma finalidade do original (reciclagem *closed-loop*) (ex, reciclagem de aço);
- Para outras aplicações (reciclagem *open-loop*), podendo ser aplicado em utilizações de menor valor (*down-cycle*) (ex. reciclagem de betão para inertes).

Na ACV a integração de materiais reciclados é incluída na fase de construção, sendo neste caso a carga ambiental do material substancialmente inferior à dos materiais novos/virgens. Na fase de fim-de-vida é incluído na reciclagem o transporte do material, o impacte ambiental da reciclagem e é deduzida a carga ambiental do material que esse produto reciclado substituí. Em relação ao material substituído pode ser considerado que este substitui a utilização de material virgem (*closed-loop*) ou que substitui um material reciclado (*open-loop*), o que pode conduzir a resultados da ACV substancialmente diferentes dependendo do valor do impacte ambiental da produção de material virgem (X1) e do material reciclado (X4), Figura 3.2.

Se for considerada a utilização de materiais reciclados e que a sua reciclagem no fim-de-vida substitui material virgem pode-se obter um valor negativo na ACV, caso típico do alumínio, em que o impacte ambiental do alumínio reciclado é sensivelmente 1/5 do alumínio virgem. Esta é uma situação limite na qual se pode concluir que se melhora o ambiente apesar do consumo de um material! Neste trabalho, apesar desta incoerência, na análise da reciclagem sempre que seja razoável considera-se que no fim-de-vida o material

reciclado substitui material virgem, pois de uma forma geral não existe excesso de material para reciclagem e continuam a ser extraídos e produzidos materiais virgens. A reutilização de materiais, situação na qual os produtos não são transformados entre dois ciclos, para efeitos de ACV é tratada como a reciclagem em *closed-loop*. A reutilização consiste essencialmente na remoção selectiva dos componentes da construção, num processo de limpeza, acabamento e nova aplicação. Este processo pode ser aplicado, por exemplo, a janelas, telhas, etc.

Tendo em conta a grande quantidade de resíduos gerada na actividade de construção, neste estudo é considerada por defeito uma taxa média de reciclagem de 50% para os materiais inertes correntes e uma taxa de 80% para os materiais metálicos atendendo ao seu valor económico.

O tratamento dos resíduos domésticos não é tratado neste trabalho, pois em Portugal é baixa a prática de integração nos edifícios de sistemas de recolha de lixo doméstico, com excepção da zona de intervenção da expo. Contudo, se no edifício forem previstos sistemas para a separação de resíduos isso terá efeito na quantidade de resíduos indiferenciados e na quantidade de resíduos reciclados. Pelo que o impacte ambiental dos materiais de construção do sistema de recolha de resíduos doméstico poderia ser apreciado tendo em conta esse efeito benéfico.

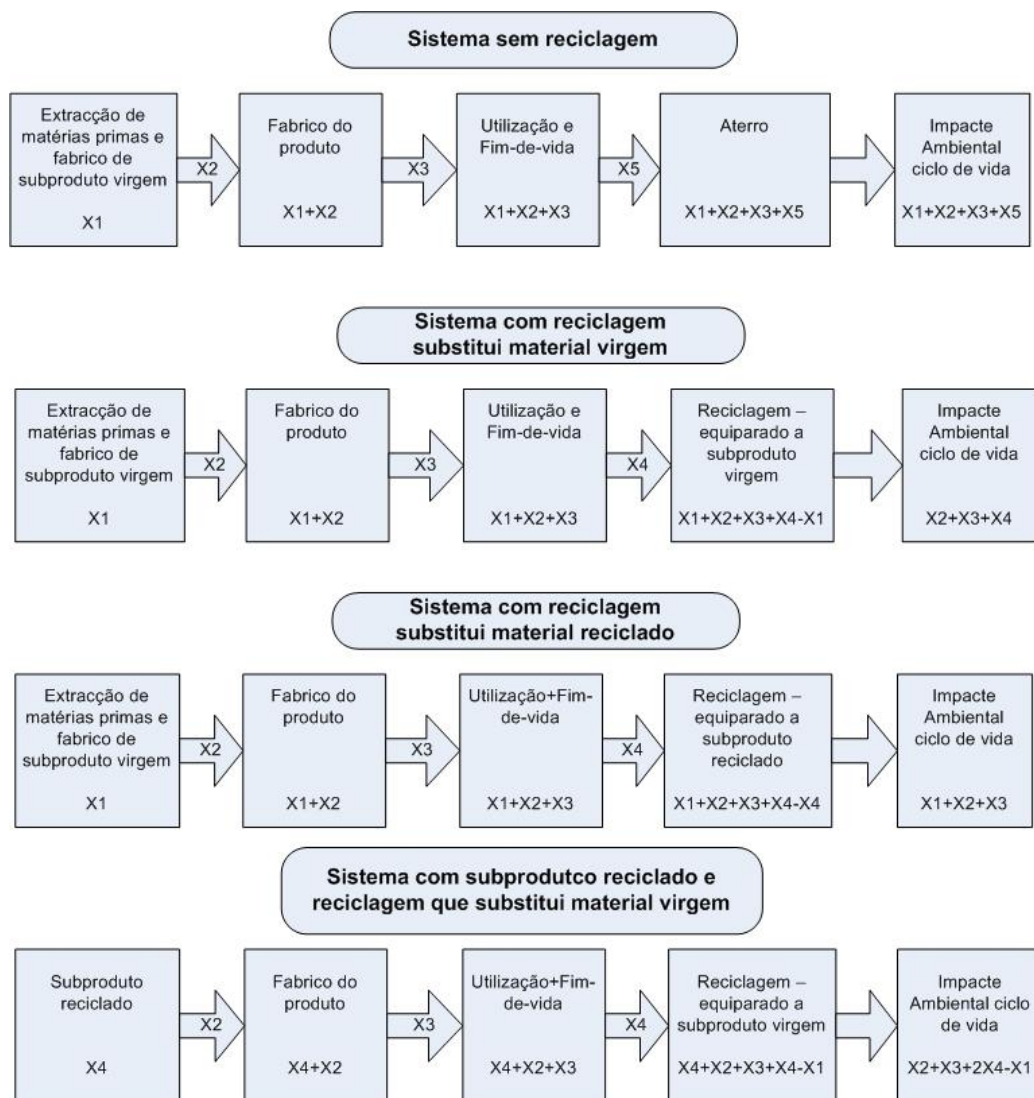


Figura 3.2 - Tratamento da reciclagem na fase de fim-de-vida

### **3.3.4 - Transporte**

No ciclo de vida do edifício há que considerar o transporte dos materiais entre a extracção das matérias primas e o fabrico do material, o transporte deste para as unidades de transformação e para a obra, bem como o transporte da obra para o destino final (aterro, incineração, etc).

Para o transporte de materiais é possível adoptar os quatro meios de transporte disponíveis, rodoviário, ferroviário, marítimo ou aéreo. Em Portugal, de uma forma geral, o meio de transporte mais utilizado é o rodoviário, pelo que neste estudo será este o meio de transporte considerado por defeito.

Como os materiais de construção apresentam densidades muito variáveis, na determinação da carga do meio de transporte é considerado o volume ou a massa da carga, consoante o que corresponder à solução mais restritiva. No que diz respeito ao transporte de materiais de construção e RCD em veículos pesados, considera-se o seguinte:

- Transporte de materiais para a obra: viagem de ida com o veículo carregado em 70% e viagem de retorno com o veículo vazio.
- Transporte de resíduos da obra: para a obra a viagem é realizada com o veículo vazio e da obra para o destino final dos resíduos é considerado que o veículo se encontra 70% carregado.

Na determinação do impacto dos restantes meios de transporte pode ser considerado que as carruagens de comboio, navio ou avião fazem uma viagem para entregar os bens e que regressam com outras cargas e, portanto, o impacto do retorno não é considerado.

### **3.3.5- Inventário dos recursos materiais**

Na ACV do edifício e dos correspondentes materiais é adoptada a seguinte desagregação (Figura 3.3):

- Fundações;
- Estrutura;
- Paredes (envolvente) exteriores incluindo portas e janelas;
- Cobertura, incluindo janelas de cobertura;
- Lajes e revestimento de piso e tecto;
- Paredes interiores, divisórias e caixilharia;
- Instalações de AVAC, AQS, abastecimento e drenagem de água.

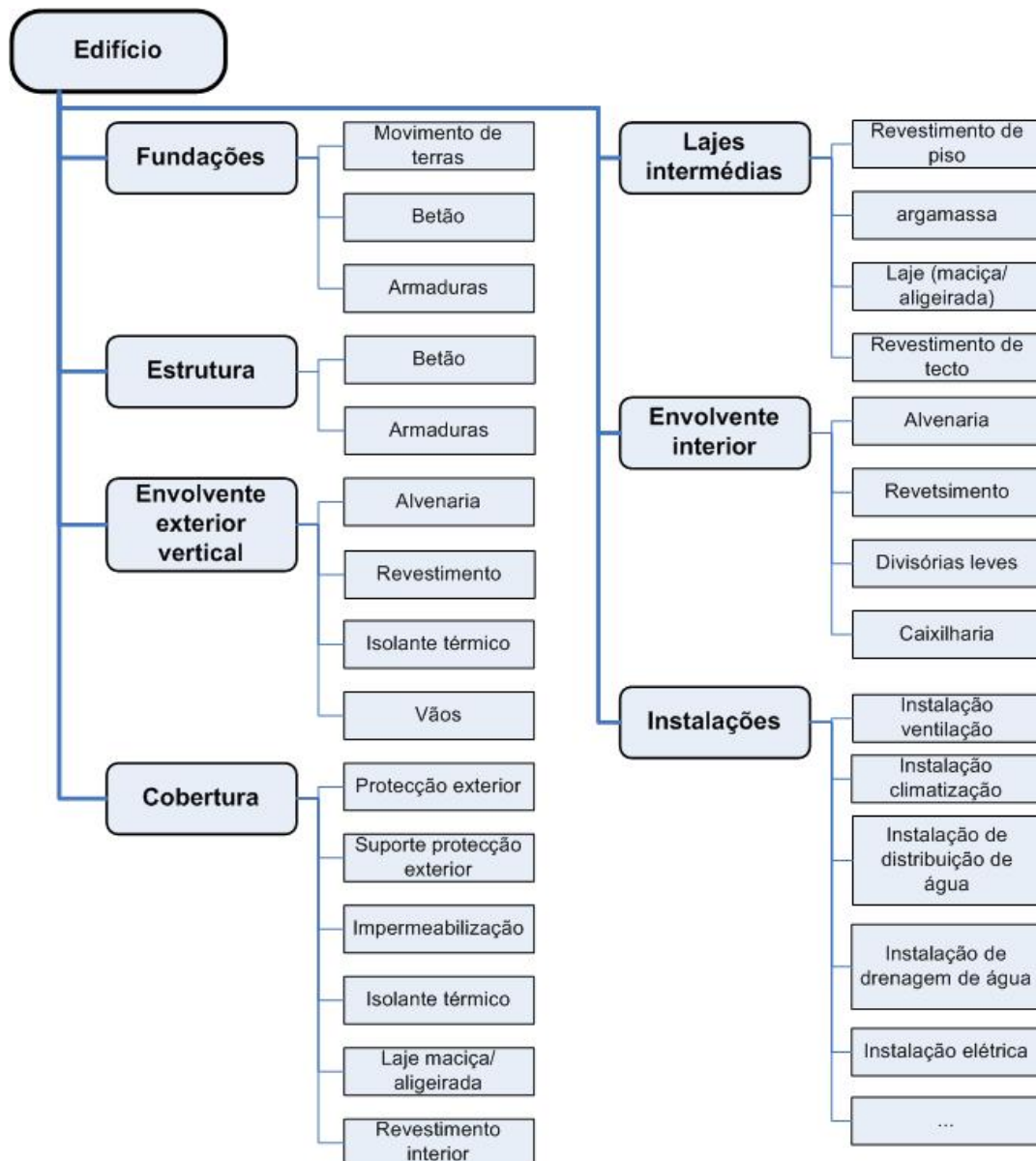


Figura 3.3 - Esquema de desagregação do edifício

Tendo em conta as múltiplas possibilidades de materiais de construção, neste estudo na constituição dos elementos atrás referidos serão consideradas as soluções mais correntes, em que os diversos elementos do edifício são desagregados nos seguintes materiais/substâncias de base:

1. Aço (para armadura, canalizações, para estrutura de suporte de divisórias e revestimentos)
2. Aço inoxidável (para canalizações)
3. Aglomerado de cortiça (isolamento térmico, revestimento de piso)
4. Aglomerados de madeira (para realização de portas, divisórias interiores)
5. Água
6. Alumínio (perfis de janelas, revestimento exterior)
7. Areia (para argamassa, betão)
8. Borrachas de vedação (EPDM)
9. Cerâmica vidrada (revestimento de piso ou paredes)

10. Cerâmico (tijolo)
11. Cimento (para argamassa, betão)
12. Cobre (instalação eléctrica, AVAC)
13. EPS (material de isolante térmico)
14. Gesso (estruque tradicional, estuque projectado)
15. Granito (revestimento exterior, piso)
16. Mármore (revestimento exterior, piso)
17. Gravelha (inertes para betão)
18. Lã de rocha (material de isolamento térmico)
19. Lã de vidro (material de isolante térmico)
20. Latão (ferragens)
21. Linóleo (revestimento de piso)
22. Madeira (revestimento de piso de pavimentos, caixilharia, portas)
23. Mástique de silicone
24. Placa de gesso cartonado (divisórias interiores)
25. Poliamida 66 (perfis de corte térmico de janelas)
26. Poliuretano (isolante térmico, material de selagem)
27. PVC (perfis de janelas, tubagens)
28. Silicone (vedação de caixilharia, vidros duplos)
29. Telas de impermeabilização (asfalto, membranas flexíveis PVC 40% de plastificante)
30. Tinta de base aquosa
31. Vidro (caixilharia, divisórias interiores)
32. XPS (material de isolamento térmico)

O inventário dos materiais e componentes envolvidos no edifício ao longo da vida é efectuado com base na análise do projecto.

### **3.3.6 - Inventário dos recursos energéticos**

O consumo de energia ocorre em todas as fases do ciclo de vida do edifício e sendo calculados os fluxos das diversas fontes e formas de energia envolvidas nas várias fases da vida do edifício.

No fabrico dos materiais a energia eléctrica é calculada considerando o mix europeu do ano 2000, devido à diversidade de proveniências dos materiais de construção. O impacte do consumo de energia eléctrica na fase de utilização será calculado considerando o mix energético nacional de 2000, apesar de ao longo da vida dos edifícios ser provável uma contribuição cada vez maior das fontes de energia renováveis.<sup>1</sup> Pontualmente, de forma complementar, será avaliado o impacte assumindo que a produção de energia eléctrica é efectuada apenas com fontes renováveis. No capítulo 4 é apresentado o impacte ambiental associado à energia eléctrica.

---

<sup>1</sup> No UK para determinar as emissões de CO<sub>2</sub> é utilizado o mix energético de cada ano e para a ACV dos edifícios é considerada a estrutura de produção que prevêm a longo prazo, por exemplo emissões em 2006, 0,563 kgCO<sub>2</sub>/kWh e a longo prazo 0,43 kgCO<sub>2</sub>/kWh.

No caso de ocorrer a incineração de resíduos de construção é possível recuperar parte da energia incorporada para a produção de electricidade ou calor. Deste modo este benefício energético, bem como os impactes da incineração, serão atribuídos ao edifício analisado.

Com os dados da construção, com os requisitos de conforto (ver secção 3.2) e com os perfis de utilização dos edifícios é efectuada a estimativa dos consumos de energia na fase de utilização. As necessidades energéticas de climatização são determinadas com o modelo de simulação térmica de edifícios em regime dinâmico ESP-r. É através da satisfação destas condições que se estabelece a relação com os recursos consumidos na fase de construção. Seguidamente enunciam-se os perfis de utilização considerados neste estudo.

### 3.3.6.1 - Perfil de utilização de edifícios de escritórios para ACV

Para análise da fase de utilização em edifício de escritórios admite-se o perfil de ocupação indicado na Figura 3.4, que corresponde a uma ocupação entre as 9h e as 19 h, com período de almoço entre as 13h e as 14h. Admite-se uma potência de iluminação instalada de 10 W/m<sup>2</sup>, uma potência de equipamentos de 100 W por posto de trabalho (70 W para PC com monitor TFT e impressora, 20 W para FAX e fotocopiadora partilhada e 10 W outros acessórios), como foi determinado na secção 2.6.2. Admitindo 1 pessoa por 13,5 m<sup>2</sup> (gabinete individual) obtém-se as potências específicas indicadas no Quadro 3.4.

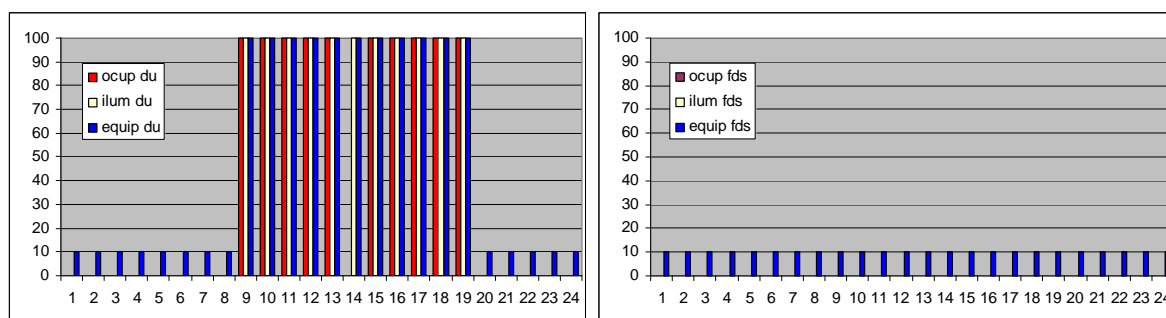


Figura 3.4– Perfil de utilização de um edifícios de escritórios adoptado neste estudo

Quadro 3.4 – Potências específicas de ganhos térmicos e de necessidades de energia para edifícios de escritórios

	W/pessoa ou posto trabalho	W/m <sup>2</sup>
Ocupante	75 W calor sensível 45 W calor latente	5,6 3,3
Iluminação	135	10,0
Equipamento	100	7,4
<b>TOTAL</b>	<b>310</b>	<b>23,0</b>

Com este perfil de utilização e com as potências referidas estimam-se necessidades energéticas anuais de 25,6 kWh/m<sup>2</sup>/ano para equipamentos e 28,7 kWh/m<sup>2</sup>/ano para o funcionamento contínuo da iluminação.



### 3.3.6.2 - Perfil de utilização de edifícios de Habitações

As cargas térmicas internas a considerar na modelação do comportamento térmico dos edifícios de habitação são obtidas tendo em conta o consumo de energia dos electrodomésticos indicados no Quadro 2.25.

Para maximizar a eficiência energética nos edifícios deve ser minimizado o consumo dos electrodomésticos, pelo que na estimativa das necessidades térmicas e energéticas é considerada a potência dos equipamentos da família ECO. Nas figuras seguintes detalham-se os perfis de utilização considerados. Os ganhos térmicos de ocupação correspondem a 2 ocupantes para as tipologias T0 e T1 e mais um ocupante por cada quarto adicional. A taxa de ocupação da sala corresponde à soma dos ocupantes dos quartos. No cálculo dos ganhos térmicos das máquinas de lavar roupa e loiça considerou-se apenas 50% do seu consumo de energia, pois admite-se que cerca de 50% da energia é perdida devido à drenagem da água quente. O calor dissipado no fogão e no aparelho de aquecimento de água não são considerados como ganhos térmicos internos, pois admite-se que esse calor é removido pela exaustão local.

A título de exemplo apresenta-se na Figura 3.10 o perfil de ganhos térmicos totais num fogo de tipologia T2 ( $4,9 \text{ W/m}^2$ ) e na Figura 3.11 para um fogo de tipologia T3 ( $4,6 \text{ W/m}^2$ ).

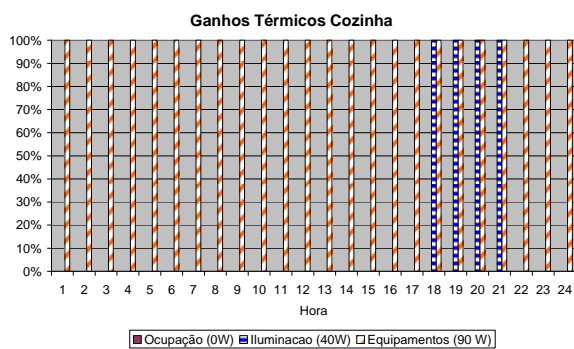


Figura 3.5 – Ganhos térmicos na cozinha

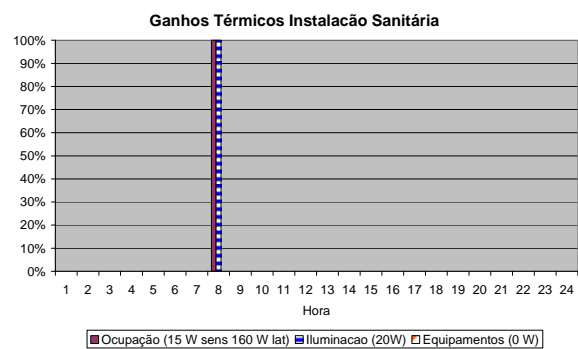


Figura 3.6 – Ganhos térmicos na instalação sanitária

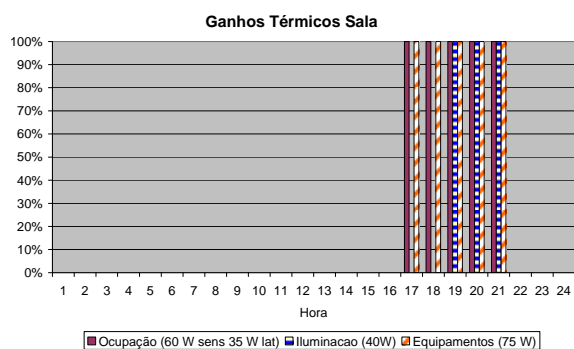


Figura 3.7 – Ganhos térmicos na sala

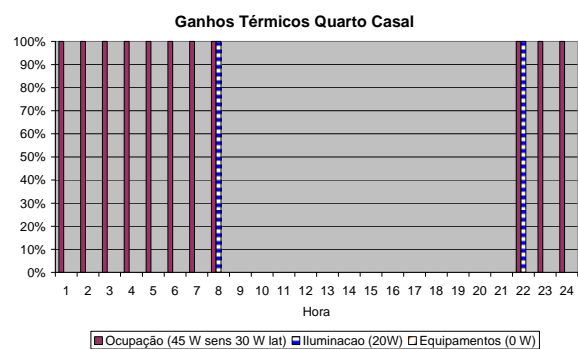


Figura 3.8 – Ganhos térmicos no quarto de casal

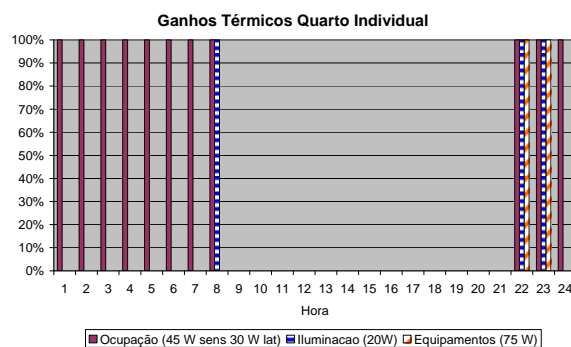


Figura 3.9 – Ganhos térmicos no quarto individual

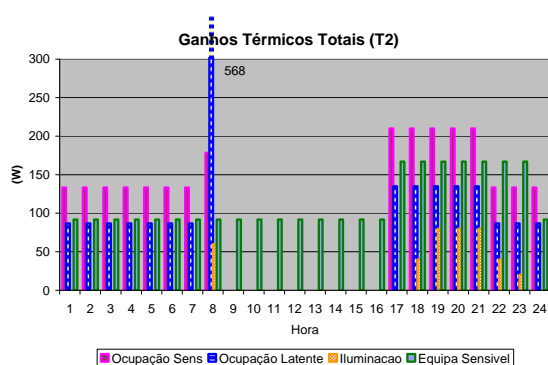


Figura 3.10 – Ganhos térmicos totais num alojamento de tipologia T2

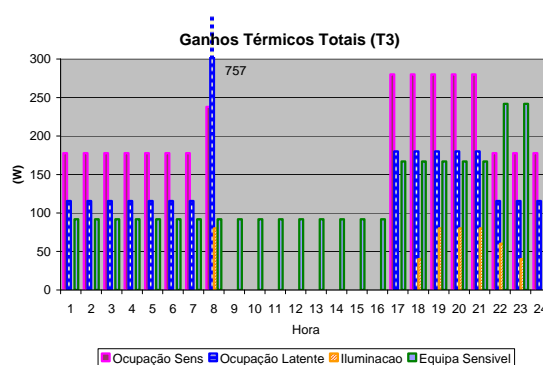


Figura 3.11 – Ganhos térmicos totais num alojamento de tipologia T3

### 3.4- AVALIAÇÃO DOS IMPACTES AMBIENTAIS

#### 3.4.1 - Perfil ambiental

Na selecção das categorias de impacte ambiental foram ponderadas as categorias adoptadas nos diversos estudos (Quadro 2.1), bem como foram tidos em conta os constrangimentos associados à normalização e ponderação do indicador ambiental único do UK (Quadro 2.5). No Quadro 3.1 apresenta-se a ponderação do indicador ambiental único adoptado nos ecopontos UK e os factores de normalização do UK e os baseados num cidadão europeu.

Neste estudo são consideradas apenas as categorias de impacte ambiental A a F do Quadro 3.1, que correspondem a sensivelmente 70% do valor do indicador ecopontos UK. Efectivamente, estas são as categorias de impacte ambiental mais utilizadas em diferentes estudos (Quadro 2.). Para essas categorias de impacte ambiental não se regista uma diferença muito significativa entre o cidadão UK e o Europeu (com excepção da categoria “deposição de resíduos”), pelo que a normalização e a ponderação das categorias de impacte ambiental do UK serão adoptadas como representativas da média Europeia.

As restantes categorias não foram consideradas pela ausência de factores de normalização para o cidadão europeu e porque de estudos prévio verificou-se que as categorias de impacte ambiental G e H apresentam um baixo impacto para os materiais do sector edifícios. Em relação à “categoria transporte” esta não é considerada, pois os seus principais impactes ambientais encontram-se incluídos na categoria “Consumo de combustíveis fósseis” e “alterações climáticas”. Para as categorias de impacte ambiental (J, K, L e M) não existe informação que permita estabelecer valores de normalização do

cidadão médio Europeu, bem como correspondem a sensivelmente 15% do indicador ambiental único, pelo que não serão considerados neste estudo, apesar da relevância da categoria “Extracção de minerais”.

Quadro 3.1 - Categorias de impacte ambiental e ponderação ecopontos UK

Categoria	Unidade	Ponderação	Normalização cidadão UK	Normalização Europa 1995
<b>A Aquecimento global</b>	<b>kg CO<sub>2eq</sub>100</b>	<b>35</b>	<b>12269</b>	<b>14600 (a)</b>
<b>B Diminuição da camada de ozono</b>	<b>kg CFC11<sub>eq</sub></b>	<b>8</b>	<b>0,3</b>	<b>0,256(a)</b>
<b>C Acidificação</b>	<b>kg SO<sub>2eq</sub></b>	<b>5</b>	<b>58,9</b>	<b>84,2(a)</b>
<b>D Consumo de combustíveis fósseis</b>	<b>tep</b>	<b>11</b>	<b>4,09</b>	<b>3,67(b)</b>
<b>E Consumo de água</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>5</b>	<b>418</b>	<b>530 (c)</b>
<b>F Deposição de resíduos</b>	<b>ton</b>	<b>6</b>	<b>7,2</b>	<b>3,5 (d)</b>
G Poluição da água (eutrofização)	kg PO <sub>4</sub> eq	4	8,0	38,4
H Poluição do ar (criação de ozono)	kg eteno eq (POCP)	3,5	32,2	25,4
I Transporte	Ton km	7	4141	3100(b)
J Extracção de minerais	Ton	3	5,0	(e)
K Poluição do ar (toxicidade humana)	kg tox	6,5	90,7	(e)
L Poluição da água (toxicidade humana)	kg tox	2	0,01	(e)
M Poluição da água (ecotoxicidade)	m <sup>3</sup> tox	4	177948	(e)

(a) (Guinée, 2001)

(b) valores determinados com base na informação do ano de 1995 (Eursotat, 2003)

(c) valores determinados com base na informação do ano de 1990 da AEA e Eurostat

(d) valores determinados com base na informação do ano de 1995 da AEA e Eurostat

(e) dados não disponíveis

A generalidade das categorias de impacte ambiental baseia-se na abordagem CML 2-2000 da universidade de Leiden (Guinée, 2001). Nas secções seguintes apresenta-se um breve resumo de cada uma das categorias de impacte ambiental consideradas, remetendo-se para a publicação (Guinée, 2001) os coeficientes aplicáveis na conversão das intervenções ambientais em categorias de impacte ambiental.

### Aquecimento global

A categoria de impacte ambiental “Aquecimento global” é por vezes também referida como “Alterações climáticas” e encontra-se associada à emissão para atmosfera de gases que promovem o efeito de estufa (gases que absorvem radiação infravermelha de grande comprimento de onda) como: CO<sub>2</sub>, vapor de água, metano, CFC, HCFC, etc. As alterações climáticas têm como consequência o aumento do fenómeno da desertificação, subida do nível da água do mar, existindo uma forte consciência e pressão da Europa na limitação da emissão dos Gases de Efeito de Estufa. A quantificação da categoria “Aquecimento Global” é efectuada através do Potencial de Aquecimento global (PAG)<sup>1</sup> expresso em kgCO<sub>2</sub> eq, ou seja o efeito das diferentes substâncias emitidas é comparado com o efeito de 1 kgCO<sub>2</sub>. Como existem substâncias que se decompõem gradualmente, acabando por atingir um estado de inactividade, o cálculo de PAG pode ser efectuada para períodos de 20, 100 ou 500 anos. No cálculo do indicador PAG é adoptado o CO<sub>2</sub> equivalente ao fim de 100 anos

<sup>1</sup> GWP - global warming potential

(Guinée, 2001) que está de acordo com a metodologia IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Por exemplo 1 kgCFC11 apresenta um PAG<sub>100</sub> de 4000 kgCO<sub>2</sub>.

$$\text{PAG (kgCO}_2) = \text{PAG}_{100} \times \text{Emissão para o ar (kg)}$$

### Diminuição da camada de ozono

O ozono é um composto que se forma na estratosfera quando o oxigénio gasoso é exposto à radiação ultravioleta. A emissão para a atmosfera de alguns gases causa a diminuição da camada de ozono estratosférico, que é responsável por filtrar parte da radiação UV-B. À redução da camada de ozono e ao conseqüente aumento da radiação ultravioleta que atinge a terra estão relacionados um aumento de melanomas, doenças em animais, afectação de ecossistemas terrestres e aquáticos e degradação de materiais.

Os CFC, HCFC e são gases estáveis que atingem a estratosfera podem reduzir a camada de ozono. Nesse sentido a produção de CFC foi banida a partir de 2000 e a produção de HCFC será banida a partir de 2015. Para quantificar o potencial de destruição da camada de ozono PDO<sup>1</sup>, utiliza-se como referência o CFC-11, sendo o efeito dos restantes gases comparado com o efeito deste (Guinée, 2001). Por exemplo o HCFC 22 apresenta um PDO de 0,034.

$$\text{Diminuição da camada de ozono (kg CFC-11)} = \text{PDO} \times \text{Emissão para o ar (kg)}$$

### Acidificação

A deposição acida resulta da reacção do SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub> com o vapor de água, que dão origem aos ácidos sulfúrico e nítrico e às chuvas acidas, que se podem depositar no solo e na água. Este fenómeno de acidificação pode afectar o solo, as águas subterrâneas, as águas superficiais, organismos, ecossistemas e materiais de edifícios. O efeito da acidificação também dependerá da capacidade de neutralização dos meios, por exemplo solos calcários terão maior capacidade de neutralização, do que solos graníticos.

O potencial de acidificação (PA) é expresso relativamente ao efeito de acidificação do SO<sub>2</sub>, para o qual se assume o valor 1. Por exemplo a 1 kgNO<sub>2</sub> corresponde um PA de 0,7 kgSO<sub>2</sub>.

$$\text{Acidificação (kg SO}_2) = \text{PA} \times \text{Emissão para o ar (kg)}.$$

### Energia primária

A energia primária é uma unidade de energia que integra o consumo final de energia, bem como as perdas no transporte e na produção. Usualmente a unidade de energia adoptada é o tep. Neste trabalho utiliza-se a unidade do sistema internacional o J. No Quadro 3.2 encontram-se valores de factores de conversão (FC<sub>tep</sub> e J) para diferentes fontes de energia. Os factores de conversão são calculados com base no poder calorífico superior de cada combustível em relação ao do petróleo, que é de 10800 kcal/kg.

$$\text{Energia primária (J)} = \text{FC J} \times \text{Consumo de energia}$$

---

<sup>1</sup> ODP ozone depletion potential

Quadro 3.2 - Factores de conversão da energia primária

	Factor conversão (tep)	Factor conversão (J)
1 GWh eléctrico, balanço energético DGE	86 tep	3 598 GJ
1 GWh eléctrico (RCCTE, 2006)	290 tep	12 134 GJ
Energia nuclear	0,0239 kgep/MJ	1,00 GJ/MJ
Combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos 1 GWh (RCCTE, 2006)	86 tep	3 598 GJ
Petróleo bruto (CCE, 1995)	1,007 tep/t	42,1 GJ/t
Gasolina (1000 l= 0,750 t) (CCE, 1995)	1,073 tep/t	44,9 GJ/t
Gasóleo (1000 l= 0,835 t) (CCE, 1995)	1,045 tep/t	43,7 GJ/t
Gases de petróleo liquefeito, propano (CCE, 1995)	1,140 tep/t (1,099 UE)	47,7 GJ/t
Gás natural (CCE, 1995)	$0,82 \times 10^{-3}$ tep/m <sup>3</sup>	0,0343 GJ/m <sup>3</sup>
Botija de 13 kg de butano	0,014 tep	0,59 GJ
Thick fuelóleo	0,969 tep/t	40,5 GJ/t
Thin fuelóleo	0,984 tep/t	41,2 GJ/t
Carvão (hard coal)	0,411 a 0,733 kgep/kg	17,2 a 30,7 GJ/kg
Carvão (brown coal)	0,134 a 0,251 kgep/kg	5,61 a 10,5 GJ/kg
Crude	0,994 a 1,022 kgep/kg	41,6 a 42,8 GJ/kg
Lubrificantes	1,010 kgep/kg	42,3 GJ/kg
Betume	0,900 kgep/kg	37,7 GJ/kg

1 tep = 10<sup>7</sup> kcal = 41,84 GJ = 11,6 MWh

### Consumo de água

Tendo em conta as preocupações com o consumo e abastecimento de água, considera-se pertinente incluir o consumo de água como uma categoria ambiental. Nesse sentido nesta categoria de impacte ambiental encontra-se incluído o consumo total de água expresso em m<sup>3</sup>.

$$\text{Água (m}^3\text{)} = \text{Consumo de água (m}^3\text{)}$$

### Resíduos sólidos

A categoria resíduos sólidos caracteriza as emissões sólidas resultantes do fabrico de materiais e edifícios que não são valorizadas e vão para aterro, tentando caracterizar o impacte na gestão dos aterros. Os resíduos sólidos são quantificados em kg de resíduos.

$$\text{Resíduos sólidos (kg)} = \text{Emissões sólidas não valorizadas (kg)}$$

Quando existirem medidas destinadas a reutilizar, reciclar ou valorizar energeticamente os resíduos estas quantidades poderão ser indicadas. A sua valorização na ACV do edifício ou do material obedecer ao princípio definido na secção 3.3.3.

### **3.4.2 - Caracterização**

Na caracterização ambiental os dados das diversas intervenções ambientais são multiplicados pelos factores de classificação obtendo-se o perfil ambiental do produto. Com este perfil é possível obter um indicador para cada uma das categorias ambientais. Nesta fase termina a ACV com base científica, as secções de normalização e indicador único são opcionais.

### 3.5 - NORMALIZAÇÃO E INDICADOR AMBIENTAL ÚNICO

Embora a apresentação do perfil ambiental em valores absolutos permita a comparação entre duas alternativas, tal não traduz a importância relativa dos impactos ambientais em causa, cuja obtenção implicaria a comparação com valores de referência.

Neste trabalho a normalização é efectuada com base no impacto ambiental médio anual de um cidadão do UK que é próximo do cidadão médio europeu, como se mostrou no Quadro 3.4. A ponderação para determinar o indicador ambiental único é efectuada com base na ponderação dos ecopontos UK, Quadro 3.4. No Quadro 3.3 apresentam-se os valores adoptados neste estudo. A poluição média anual de um cidadão corresponde a 100 ecopontos.

Quadro 3.3 - Factores de normalização e ponderação para determinar indicador ambiental único (Ecopontos)

<b>Categoria</b>	<b>Unidades</b>	<b>Factor de normalização</b>	<b>Factor de ponderação</b>
Aquecimento global	<i>Kg CO<sub>2</sub> 100 anos</i>	12269	50
Diminuição da camada de ozono	<i>Kg CFC-11</i>	0,3	11
Acidificação	<i>Kg SO<sub>2</sub></i>	58,9	7
Energia primária	<i>GJ<sub>ep</sub></i>	171	16
Água	<i>m<sup>3</sup></i>	418	7
Resíduos sólidos	<i>ton</i>	7,2	9

Em relação ao perfil de normalização utilizado este corresponde a um impacto ambiental significativamente superior ao de um cidadão Português (46 ecopontos). Efectivamente, em 1995, em Portugal, foram consumidos 86 GJ<sub>ep</sub>/pessoa/ano, 715 m<sup>3</sup> de água por pessoa (apenas 57 m<sup>3</sup>/pessoa de consumo urbano) e foram produzidos sensivelmente 0,43 ton RSU/p/ano e sensivelmente 2,0 ton/p/ano de resíduos industriais. De acordo com dados de 2006, em Portugal, foram emitidos cerca de 5750 kgCO<sub>2</sub>/ano/p.

## 4 - ANÁLISE DE FACTORES CRÍTICOS PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E AMBIENTAL DOS EDIFÍCIOS

### 4.1 - CONSTRUÇÃO E DESCONSTRUÇÃO

#### 4.1.1 - Aspectos gerais

Nesta secção é apresentada a ACV dos materiais e componentes de construção, excluindo as suas consequências no consumo de energia de climatização na fase de utilização dos edifícios, de acordo com a metodologia definida no capítulo 2.

Tendo em conta a desagregação do edifício proposta na figura 2.2, apresentam-se neste capítulo os resultados da determinação dos perfis ambientais de alguns materiais base e de alguns elementos de construção.

Neste capítulo, numa primeira fase são apresentados os perfis ambientais referentes à energia, aos transportes e ao período de manutenção, sendo apresentado na secção 4.1.5 o impacto relacionado com alguns materiais de base e na secção 4.1.6 são determinados os perfis ambientais de alguns elementos de construção e de instalações dos edifícios.

Os valores agora determinados são baseados nos dados do modelo Simapro 5.1 (PRé Consultants, 2003). Os resultados obtidos são comparados com valores de energia incorporada apresentados no quadro 2.6 e com alguns estudos já realizados sobre alguns materiais. Para obter o perfil ambiental proposto no capítulo 2, o mesmo foi implementado na base de dados Simapro.

#### 4.1.2 - Energia

Na modelação da ACV são considerados os consumos de combustível e de electricidade. Tendo em conta que as matérias-primas têm proveniências muito diversas, na ACV dos materiais adopta-se o modelo UCPTe, Buwal, ETH (PRé Consultants, 2003) para a produção de electricidade. No que concerne à fase de construção, utilização e fim-de-vida em Portugal, considera-se o modelo referente ao mix energético nacional do ano 2000, Figura 4.1 (DGE, 2001). O mix energético do ano 2000 é relativamente próximo do mix médio entre 1994 e 2005.

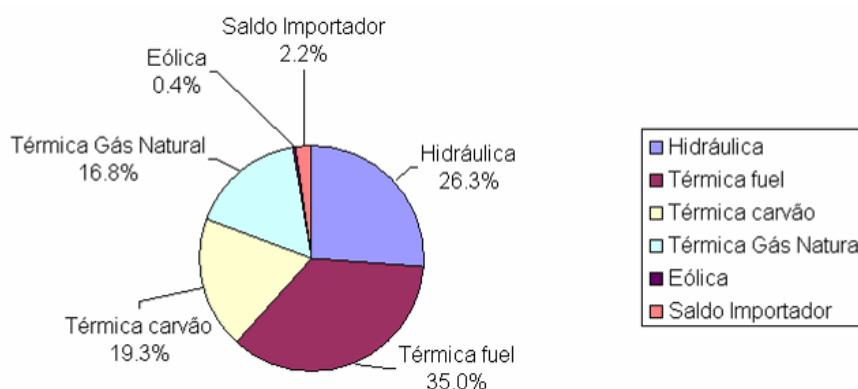


Figura 4.1 - Distribuição da produção de energia eléctrica em Portugal no ano 2000

O mix energético na ACV a 50 anos é extremamente incerto, tendo em conta a variação ao longo do tempo das estruturas de produção e o aparecimento de novas tecnologias.

Em Portugal existem perdas no transporte e na distribuição de electricidade de sensivelmente 10%, de acordo com a informação da DGE (2001).

Na base de dados B250 (PRé Consultants, 2003) a produção de energia eléctrica de Portugal refere-se ao ano de 1995, apresentando uma estrutura de produção de 43% em centrais a fuel, 36% em centrais a carvão, 0,4% em central a gás natural e 17% em hidroeléctricas. Tendo em conta o desfaseamento desse perfil de produção de energia eléctrica, este foi substituído pelo perfil indicado na Figura 4.1.

No Quadro 4.1, apresenta-se o impacto ambiental associado à produção de energia eléctrica em diferentes centrais térmicas e em barragens incluídos na base de dados B250 (PRé Consultants, 2003) e na informação facultada pela EDP (2005) e DGE (2001). Da análise dos valores do Quadro 4.1, registam-se diferenças significativas, devido às evoluções tecnológicas introduzidas nas centrais térmicas, sendo a conversão da energia eléctrica em Portugal (AP B250) no ano 2000 mais eficiente que a incorporada na base de dados (B250) de 1996.

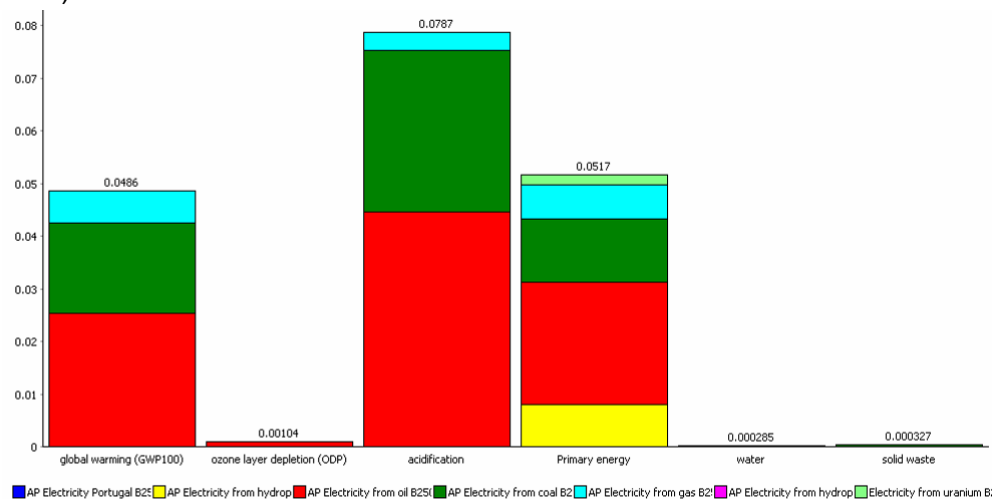


Figura 4.2 - Valores normalizados do impacto ambiental da produção da energia eléctrica (1 MWh) em Portugal

Quadro 4.1 - Agravamento do consumo de energia primária existente na informação da base de dados Buwal para algumas centrais de produção de electricidade

		<b>Carvão</b>	<b>Gás natural</b>	<b>Hidroeléctrica</b>	<b>Fuel</b>	<b>Portugal</b>
B250	gep/kWh	0,406	0,284	0,112	0,299	0,306
AP B250	gep/kWh	0,231	0,139	0,112	0,244	0,211
B250	gCO <sub>2</sub> /kWh	1070	806	0	909	796
AP B250	gCO <sub>2</sub> /kWh	987	398	0	797	596
B250	Ecopontos/kWh	0,0067	0,0045	0,0004	0,0064	0,0054
AP B250	Ecopontos/kWh	0,0060	0,0023	0,0004	0,0050	0,0038

1 tep = 10<sup>7</sup> kcal = 41,84 GJ

#### 4.1.3 - Transporte

Na ausência de informação específica, para o transporte de materiais considera-se uma distância média de 100 km (100 km de ida e 100 km de regresso), por exemplo entre a produção e a entrega na obra. Efectivamente em 2001 foram transportados 137,6 ton, sendo



estimado 14500 t.km (Eurostat, 2003), pelo que se obtém uma distância média de 105 km. Existem vários veículos de carga com diferentes capacidades para o transporte de materiais de construção, Quadro 4.2. Neste trabalho considera-se o transporte de materiais em veículos de 24 ton (carga máxima de 15 ton), com um consumo de gasóleo de 38 l/100 km com carga e um consumo de 25 l/100km para a viagem descarregado. No Quadro 4.3 apresenta-se uma estimativa do consumo de energia e do impacte ambiental que foi implementado na base de dados Simapro para três tipos de carga: 15 ton - areia, inertes, pedras, cimento; 10 ton - vidro e produtos cerâmicos, outros materiais; 5 ton - restantes materiais indicados no Quadro 4.2. Nestes cálculos considera-se que na viagem com carga é transportada apenas 70% da carga máxima e encontra-se incluída a viagem de ida e de regresso, conforme definido no capítulo 2.

Quadro 4.2 - Cargas típicas de transporte de materiais de construção em veículos pesados

Material	Camião rígido				Camião articulado			
	<7,5t	7,5-14t	14-17t	17-25t	>25t	< 30t	30-33t	>33t
Madeira ou cortiça	1,8	2,7	5,3	<b>4,8</b>	9,9	8,4	10,4	19,3
Metálico transformado	1,5	2,5	4,7	<b>5,4</b>	6,3	5,2	8,7	12,8
Metal não ferroso	1,6	3,9	4,4	<b>5,8</b>	4,3	5,4	7,8	19,5
Areia, inertes	2,5	3,7	8,8	<b>14,8</b>	18,8	10,0	16,1	23,7
Pedras e minerais	2,2	3,8	8,0	<b>14,9</b>	18,5	Na	13,6	23,8
Cimento e lime	4,9	4,1	5,9	<b>12,1</b>	15,0	na	18,2	23,6
Vidro e produtos cerâmicos	1,9	2,3	4,3	<b>6,8</b>	9,4	6,4	11,1	16,8
Gesso	1,4	na	1,7	<b>10,9</b>	na	na	na	22,2
Outros materiais manufacturado	1,4	2,4	5,2	<b>9,4</b>	15,3	6,1	10,8	19,4

Quadro 4.3 - Impacte ambiental de veiculo de 24 ton

Carga	5 ton	10 ton	15 ton
MJep/t/km	9,17	4,95	3,55
gCO <sub>2</sub> /t/km	687	371	266
Ecopontos/t/km	0,00453	0,00245	0,00175

#### 4.1.4 - Vida útil e manutenção

Com o objectivo de avaliar o ciclo de vida é importante conhecer a durabilidade típica dos materiais e as suas necessidades de manutenção. Apesar da especificidade de alguns dos produtos existem algumas recomendações gerais que é possível compilar a estabelecer períodos típicos.

##### 4.1.4.1 - Vida útil

A vida útil da construção e dos seus componentes é central na ACV. Neste estudo foi assumida uma vida útil de 50 anos. Existem estudos em que se aponta no sentido de aumentar a vida útil das construções para minimizar o impacte ambiental. Contudo, também existem alguns casos em que os edifícios ficam obsoletos em poucas dezenas de anos devido à evolução tecnológica e à alteração das necessidades, pelo que se considera a período de 50 anos como razoável. Na apreciação da vida útil dos componentes da construção devem ser tido em conta a possibilidade de acesso para manutenção e eventual substituição dos componentes. Os componentes reparáveis e facilmente acessíveis podem ter

uma vida útil de 10 anos, os componentes menos acessíveis devem ter uma vida útil de pelo menos de 25 anos. Na ACV considerou-se os períodos de vida útil indicados no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Período de vida útil considerado para diferentes materiais ou componentes

Componente	Suzuki, 1998	Mithraratne, 2004	Scheuer, 2002	VU
<b>Fundações e Estrutura</b>				
Pilar, lajes, etc		> 50	75	50
Sistema de impermeabilização das fundações			75	50
Escadas (aço, betão)			75	50
<b>Cobertura</b>				
Impermeabilização com membrana betuminosa	25			25
Impermeabilização com membrana PVC	15			15
Ladrilhos de protecção	30			30
Sistema de drenagem (caleiras, etc)		20		20
<b>Envolvente exterior vertical</b>				
Parede tijolo, argamassa, rebocos, etc		>50	75	50
Pintura exterior	20			20
Fachada cortina - perfis e painéis de alumínio				50
Janelas - perfis de alumínio			40	50
Janelas		>50		50
Vidro simples				50
Vidro duplo				30
Cortinas		8		10
Pintura interior		10	5	10
Portas interiores de madeira ou metal			50	50*
Painel de madeira interior			75	50*
Isolamento térmico			75	50
<b>Revestimento de piso</b>				
PVC	20	17	18	20
Madeira, parquet		50		50
Cerâmico		30	75	25
Pedra			75	50
Carpetes		12	12	12
<b>Electrodomésticos</b>				
Forno		15		15
Microondas		12		12
Frigorífico		17		17
Máquina de lavar		14		14
Mobiliário		25		25
<b>Água</b>				
Sistema de água quente		16		16
Loiça sanitários		30		30
Canalização de cobre, PVC		50		50
Sistema de drenagem			20	50
<b>Instalação eléctrica</b>				
Subestação eléctrica: Transformador, disjuntores, condensadores	20			20
Baterias (chumbo, alcalinas, carregador de baterias)	15			
Cabos (RN,BN, CV 6.6/3.3 kV, CV 600V, VV 600 V)	20			
Iluminação (lâmpada fluorescente, incandescente, mercúrio)	15			15
Instalação domestica, cabos, interruptores				50
elevadores			40	40
<b>Sistema de bombagem</b>				
Bomba de sistema de drenagem	20			20
Bomba de sistema de drenagem imersa	10			10
Bomba de sistema de abastecimento de água	25			25
Bomba de sistema de combate a incêndio	30			30
Motor	20			20
Canalização de aço galvanizado a quente - abastecimento água	20			20
Canalização de aço galvanizado a quente - drenagem	20			20

<b>Componente</b>	<b>Suzuki, 1998</b>	<b>Mithraratne, 2004</b>	<b>Scheuer, 2002</b>	<b>VU</b>
de água				
Válvulas	20			20
Termoacumulador a gás	8			8
Caldeira/Esquentador	7			7
Sistema sprinklers			50	50
Sprinklers			25	25
<b>Chiller</b>				
Centrifugo	20			20
Acessórios	20			20
Absorção	20			20
Ventilador	20			20
<b>Sistema de climatização</b>				
Unidade autónoma, unidade autónoma cobertura	20		20	20
Torre de arrefecimento (ventilador, motor, envoltório)	15			15
UTA (ventilador, baterias de aquecimento e de arrefecimento)	15		20	20
Unidades compactas (compressor, ventilador, serpentinas)	20			20
Ventilo convector (fan coil)			20	20
Ventilação (ventiladores, motores)	25			25
Bombas de calor	25			25
Condutas de chapa de aço			75	50
Tubos de cobre			75	50
Tubos de aço preto			50	50
Tubos de ferro fundido			50	50
Tubos de PVC			50	50

#### 4.1.4.2 - Manutenção

No Quadro 4.5 apresentam-se a compilação das intervenções de manutenção e que se adoptaram neste estudo para as intervenções de limpeza. Nas actividades de limpeza é previsto o consumo de recursos indicado no Quadro 4.6.

Quadro 4.5 - Actividades de manutenção adoptadas na ACV

<b>Elementos</b>	<b>Actividade e frequência (actividades/ano)</b>
<i>Superfícies exteriores</i>	
Vidro	Lavar - 12
Fachadas-cortina	Lavar - 1, Selar (1 vez cada 15 anos)
Janelas - Perfil madeira	Lavar - 4
Janelas - Perfil de aço	Lavar - 4
Janelas - Perfil de alumínio	Lavar - 4
<i>Revestimento de piso</i>	
Ladrilho de Pedra	Varrer - 100, Lavar - 50, Aspirar - 100
Ladrilho de Plástico, linóleo e borracha	Limpar com pano-100, Lavar - 50, brilho - 5
Ladrilho de cortiça	Varrer - 100, Aspirar - 50, brilho - 50
Pavimento de madeira	Varrer - 100, Aspirar-50, encerar - 12
Carpete de lã	Aspirar-100, Limpeza vapor - 1
Carpete de nylon	Aspirar-100, Limpeza vapor - 1
<i>Superfícies interiores verticais</i>	
Vidro interior janelas	Lavar - 12
Vidro - divisórias/outros	Lavar - 50
Parede revestida a ladrilho	Lavar - 25
<i>Superfícies interiores tecto pintado</i>	
Tecto revestido a ladrilhos	Lavar - 12

Quadro 4.6 - Recursos consumidos na limpeza de 1 m<sup>2</sup>

Actividade	Água (l)	Electricidade (kWh)	Detergente (kg)
Lavar	0,5	0	0,003
Limpar com pano	0,25	0	0,003
Varrer	0	0	0
Aspirar	0	0,020	0
Polir, encerrar, brilho	0	0,040	0
Limpeza vapor	1,1	0,075	0,010

#### 4.1.5 - Materiais

##### 4.1.5.1 - Cimento, betão e argamassas

##### 4.1.5.1.1 - Cimento

O cimento é um aglomerante (ligante) de origem mineral constituído essencialmente por silicatos e aluminatos de cálcio que se apresenta sob a forma de pó. Devido à sua natureza hidráulica, quando amassado com água forma uma pasta que faz presa e endurece.

O processo de produção do cimento encontra-se representado na Figura 4.3, sendo composto pelas seguintes fases principais (Gäbel, 2004): extracção de calcário e argilas, britagem, preparação da matéria-prima com aditivos, moagem de cru, homogeneização e armazenamento de cru, adição de combustível, produção de clínquer no forno, preparação de aditivos do cimento, moagem de clínquer e dos aditivos para produção do cimento e colocação em silos do cimento. O cimento é um material bastante “energívor”, devido ao elevado consumo de energia no forno de produção de clínquer, onde são atingidas temperaturas de 900°C e 1450°C.



Figura 4.3 - Processo de manufactura de cimento

De acordo com IPPC (2001a) a indústria de cimento é uma indústria com elevada intensidade energética, sendo a energia responsável por cerca de 30 a 40% dos custos de produção, excluindo os custos de capital.

Para o processo de fabrico de cimento, nomeadamente para a produção de clínquer podem ser utilizados vários combustíveis, sendo em 1995 utilizados essencialmente petcoke (39%), carvão (36%), resíduos (10%), fuelóleo (7%), lignite (6%) e gás (2%) (IPPC, 2001a).

De acordo com a informação compilada no capítulo 2, a energia incorporada no cimento varia entre 3 e 6,3 MJep/kg. No RGCE, 1982 é apresentado um limite de 4,31 MJep/kg para a indústria de fabrico de cimento.

Na base de dados Simapro existem quatro processos de fabrico de cimento Portland com impactes ambientais significativamente diferentes. No Quadro 4.7 reúne-se a informação acerca do impacte ambiental do fabrico de cimento.

Quadro 4.7 - Informação do impacte ambiental de fabrico de cimento

Fonte	Consumo energia	Emissão CO <sub>2</sub>	Emissão SO <sub>2</sub>	Partículas
IPPC, 2001a	3,35 MJep/kg de clínquer As necessidades de energia eléctrica são de 90 a 130 kWh/kg de cimento	600 gCO <sub>2</sub> /750g clínquer (404 g libertadas pelas matérias primas e 196g no processo de combustão)		
Wu, 2005	consumo de carvão de 14 a 218 ton/ton cimento	emissões de CO <sub>2</sub> de 675 a 1042 gCO <sub>2</sub> eq/kg cimento	202 a 280 gSO <sub>2</sub> /ton cimento	
Portugal Cimpor, 2006	3,34 MJep/kg cimento (94 kWh electricidade/kg)	660 g/kg cimento	140 g/kg cimento	0,088 g/kg

Tendo em conta a informação anterior, na ACV será adoptada a informação da base de dados Simapro associada ao cimento “cement (Portland) I”, em que foram realizados ajustes nas emissões de CO<sub>2</sub>. O perfil ambiental encontra-se na Figura 4.4, sendo estimado para o indicador único 0,00322 Ecopontos/kg de cimento.

No processo de fabrico de clínquer, cerca de 70% das emissões de CO<sub>2</sub> provêm da reacção de calcinação ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ) e 30% da combustão.

O cimento é um material alcalino, pelo que a sua deposição no solo ou na água pode alterar o pH.

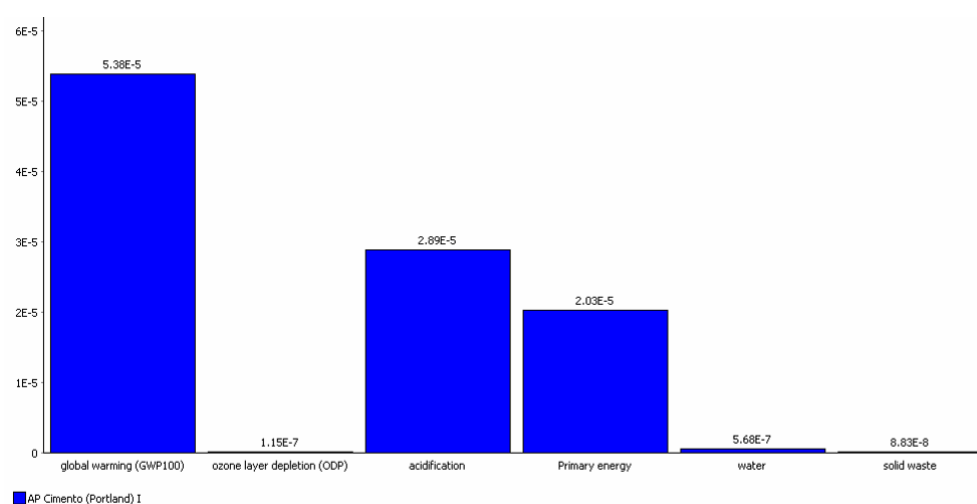


Figura 4.4 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de cimento

Para minimizar o impacte ambiental do fabrico do cimento existe a preocupação da substituição dos combustíveis através, por exemplo, da utilização de pneus usados, plásticos, solventes, óleos (Gäbel, 2004). Em 2003, na Noruega, existia o objectivo de substituir 40% dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos.

#### 4.1.5.1.2 - Betão

O betão é utilizado nos elementos estruturais da construção sendo constituído por cimento, inertes e eventualmente adjuvantes e aditivos. O betão armado, contém também uma “estrutura” interna de aço, de forma a aumentar a resistência mecânica.

Existem vários tipos de betões para a construção e neste trabalho considera-se que o betão é constituído por uma mistura com traço 1:2:3, ou seja:

- 300 kg de ligantes (cimento)/m<sup>3</sup> de betão
- 770 kg de areia/m<sup>3</sup> de betão
- 990 kg de calhau ou brita/m<sup>3</sup> de betão

- 180 kg de água/m<sup>3</sup> de betão (razão água/ligante de 0,6)

De acordo com informação da “*Fédération Internationale du Béton*” (FIB, 2003), na utilização de elementos pré-fabricados de betão existe:

- uma perda de material nas centrais de betão de sensivelmente 2 a 4% do material;
- um desperdício de sensivelmente de 100 kg/m<sup>3</sup> de betão;
- um consumo de energia em centrais de betão de 160 a 1700 MJep/m<sup>3</sup> de betão, excluindo energia de transporte de materiais;
- um consumo de sensivelmente 12 kg de madeira por m<sup>3</sup> de betão ou de 5 kg de contraplacado por m<sup>3</sup> de betão;
- um consumo de óleo de sensivelmente 0,5 kg/m<sup>3</sup> de betão, para facilitar a remoção da cofragem;
- uma emissão de 300 kg CO<sub>2</sub>/ton de cimento no betão devido ao fenómeno de carbonatação do betão (Suzuki, 1998).

Com base na informação anterior, ao processo “Concrete I” da base de dados foram acrescentados os consumos e as emissões anteriormente referidas, sendo obtido o perfil ambiental apresentado na Figura 4.5, para o qual se obtém 0,000993 Ecopontos/kg de betão. Para o betão armado, considera-se para a armadura 1% do volume, obtendo-se para o betão armado 0,00225 ecopontos/kg.

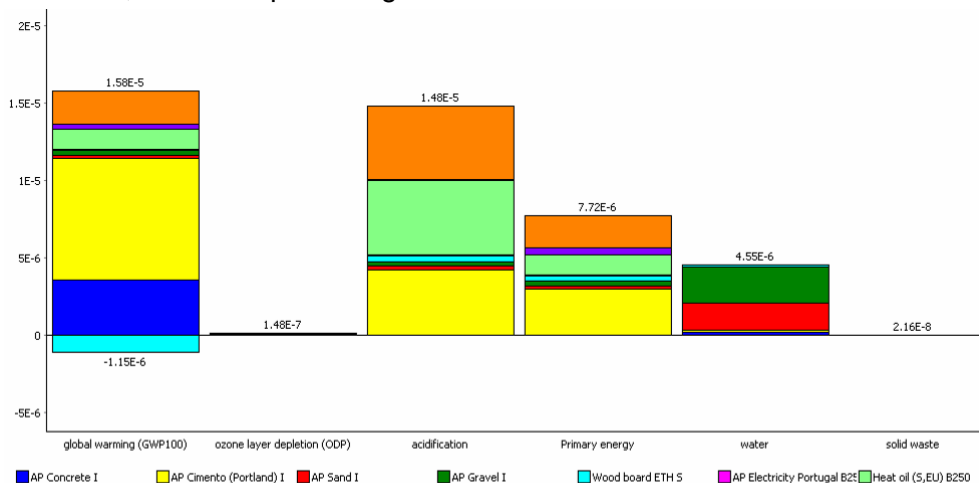


Figura 4.5 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de betão

Para minimizar o impacte ambiental do betão, no fim-de-vida deste ou as quantidades remanescentes do fabrico deste, podem ser trituradas e utilizadas como inertes em betão novo. Tendo em conta as razões de carácter estrutural, em alguns países é admitido que 20% dos inertes possam ser substituídos por betão reciclado (FIB, 2003). A remoção dos varões de aço do betão armado é facilmente executada na trituração dos elementos de betão, podendo o aço também ser reciclado. Uma solução de menor valor ambiental será a utilização dos resíduos de betão como inertes para aterro e camadas de sub base. Alternativamente, se os elementos estruturais de betão tiverem sido dimensionados e concebidos para serem desmontáveis estes podem ser reutilizados, constituindo a solução com menor impacte ambiental.

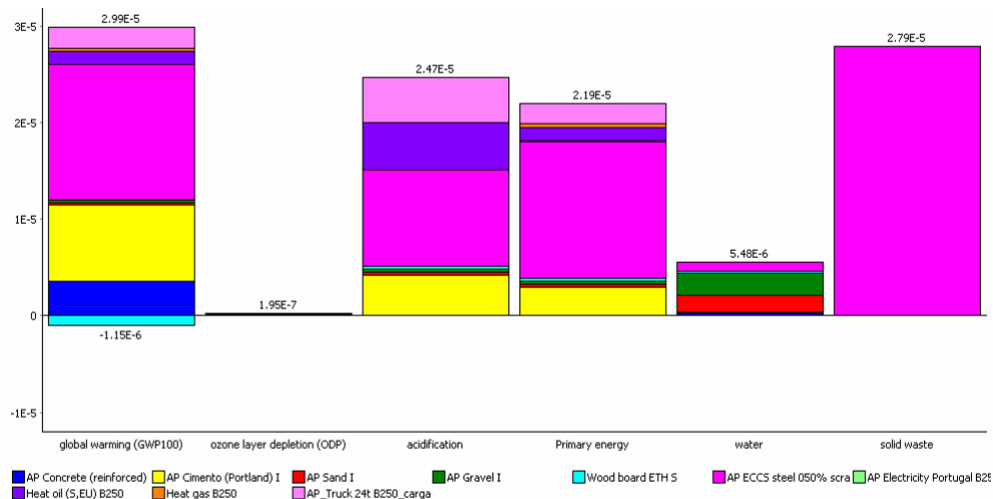


Figura 4.6 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de betão armado (1% de aço em volume)

A utilização de cofragem de madeira permite a sua utilização cerca de 20 a 50 vezes, enquanto a cofragem de aço é praticamente ilimitada, pelo que deverá ser privilegiada.

A utilização de elementos pré-fabricados de betão poderá permitir minimizar o impacte ambiental do betão no ciclo de vida do edifício pelo facto de serem minimizados os impactes ambientais na obra (emissão de poeiras, ruído, etc), serem reduzidos os desperdícios, bem como a utilização de elementos prefabricado reduz em sensivelmente 35% (em volume) a quantidade de resíduos gerados em obra, pois no relatório da FIB (2003) é referido que a quantidade de resíduos por apartamento foi reduzida de 28 m<sup>3</sup> para 18 m<sup>3</sup> devido à utilização de lementos pré-fabricados.

#### 4.1.5.1.3 - Argamassa

A argamassa de cimento é um material utilizado em diversas aplicações na construção, desde a ligação de tijolos, ao revestimento de paredes. A proporção de areia e cimento é variável consoante o destino da argamassa, sendo aconselhados traços de 1:2 a 1:7. Neste trabalho considera-se argamassa de cimento com traço 1:5, que corresponde à aplicação em rebocos, assentamento de alvenarias, enchimento, sendo uma argamassa ligeiramente mais rica em cimento do que as aplicadas em rebocos interiores. Para esta argamassa é estimado um impacte ambiental de 0,000898 ecopontos/kg, Figura 4.7.

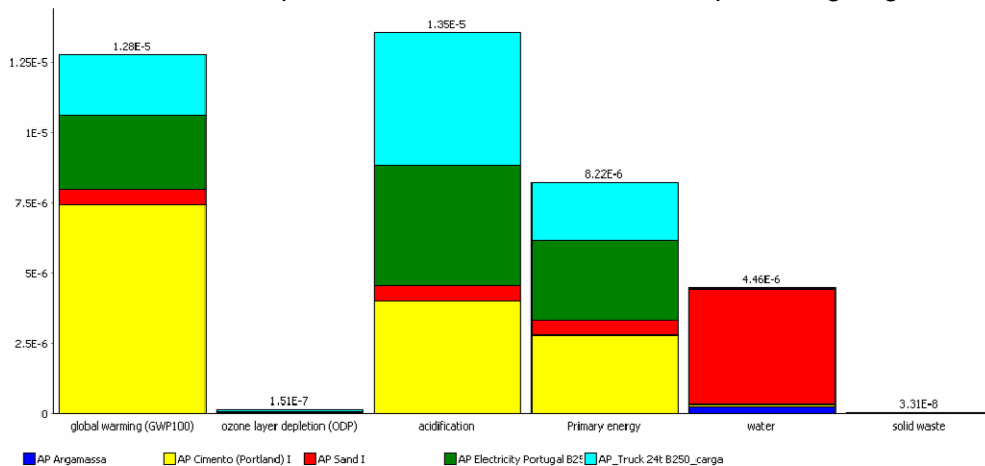


Figura 4.7 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de argamassa

#### 4.1.5.1.4 - Estuque

O estuque é um revestimento interior de ligantes minerais com base em gesso (Veiga, 1999). O gesso é um ligante hidráulico obtido pela cozedura de uma rocha sedimentar constituída essencialmente por sulfato de cálcio dihidratado  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  - pedra de gesso. Na obtenção de gesso é utilizado uma moagem e uma cozedura (calcinação) com uma temperatura da ordem de  $150^\circ\text{C}$  (podendo também ser utilizadas temperaturas de  $1700^\circ\text{C}$ ). Depois de cozido o gesso é moído em pó muito fino. As pedras de gesso provêm essencialmente de Espanha, pelo que deve ser considerada uma distância de transporte de 600 km. O gesso é utilizado com cal para minimizar os problemas de expansão da secagem do gesso.

O estuque projectado é realizado com gesso e eventualmente cal apagada, inertes minerais e adjuvantes. O estuque projectado é constituído por uma camada de regularização e por uma camada de acabamento. O revestimento de estuque apresenta uma espessura superior a 8 mm e neste trabalho é considerada um valor de 10 mm.

De acordo com a compilação efectuada no capítulo 2, na produção de 1 kg de estuque é incorporado 2 a 2,5 MJep/kg e para a cal apagada 5,27 MJep/kg. Com base na ACV efectuada é estimada uma energia incorporada de 6,55 MJep/kg (4,82 MJep/kg se fosse excluído o transporte das matérias primas para a fábrica), 0,00355 ecopontos/kg, Figura 4.8.

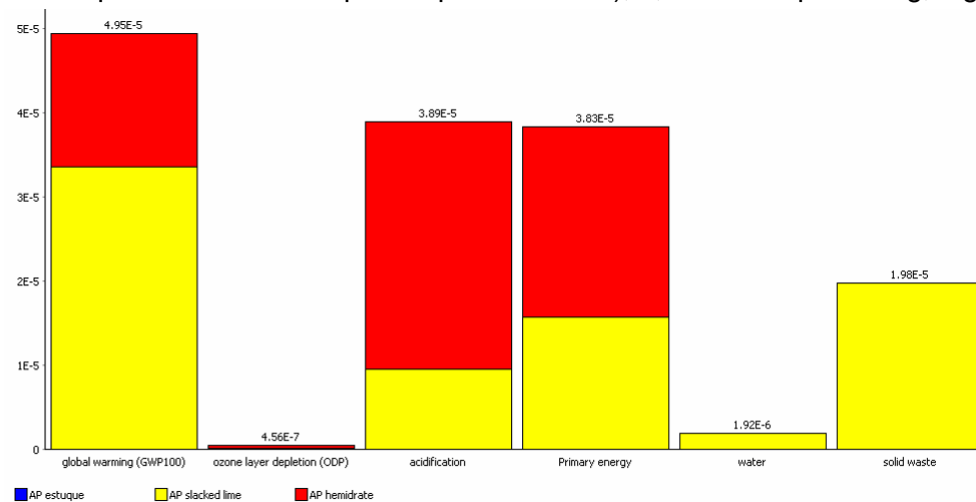


Figura 4.8 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de estuque (gesso e cal)

Regista-se que o estuque apresenta um impacte ambiental superior (0,00355 ecopontos/kg) à argamassa de cimento (0,000898 ecopontos/kg).

Na Figura 4.9 apresenta-se o perfil normalizado de uma placa de gesso cartonado, para a qual se obtém 0,00646 ecopontos/kg.



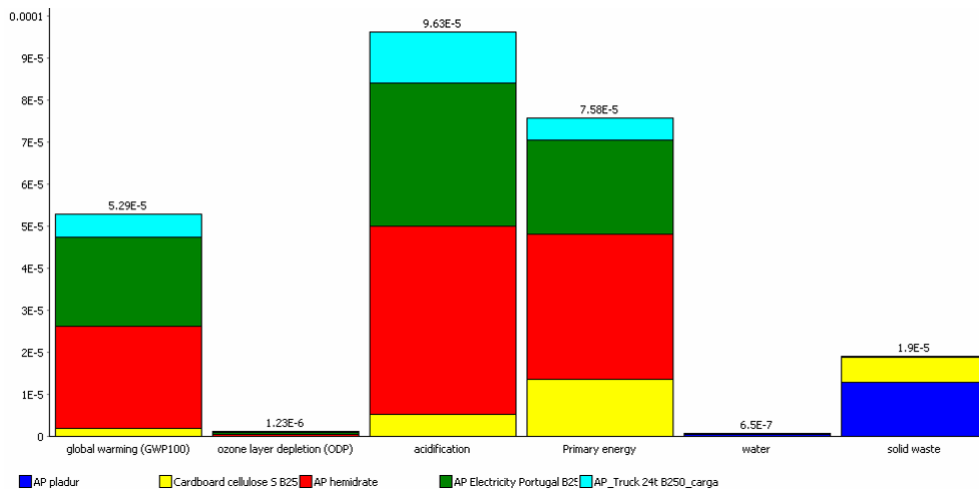


Figura 4.9 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de placa de gesso cartonado

#### 4.1.5.2 - Tijolos e abobadilhas

O tijolo é um dos principais materiais de construção nos edifícios. O tijolo é um produto derivado do barro. No fabrico do tijolo está envolvida a extracção do barro, a preparação deste, a extracção de ar, secagem acelerada e cozedura a sensivelmente 1400°C, sendo esta a fase com maior consumo de energia. No capítulo 2 são referidos consumos de energia de 3 a 4 MJep/kg, enquanto no RGCE (1982) são impostos limites de 1,88 MJep/kg (45 kgep/t). O principal impacte ambiental associado à produção de tijolo está relacionado com as emissões dos combustíveis fósseis, bem como ao impacte na zona de extracção do barro (Koroneos, 2007).

Koroneos (2007) efectuou a ACV de tijolos produzidos numa fábrica em que o consumo de energia é de 2,1 MJep/kg de tijolo, sendo estimado um potencial de aquecimento global de 0,22068 kgCO<sub>2</sub>/kg tijolo, 2.23E-3 kgSO<sub>4</sub>/kg tijolo e resíduos sólidos de 2,788E-3 kg/kg tijolo. Deste estudo é evidenciado que cerca de 95% do consumo de energia ocorre na cozedura e 4% no transporte das matérias-primas. Dados publicado pelo BRE para o fabrico de tijolo apontam para um consumo de energia primária de 5,9 MJep/kg.

De acordo com o estudo de Amaral (1999), 95% dos fabricantes nacionais de tijolo apresentam um consumo de energia inferior a 3,26 MJ/kg de tijolo, sendo indicado como valor de referência um consumo de 1,70 MJep/kg (40 kWh/kg de electricidade e 1,2 MJ/kg de energia térmica) e a emissão de 0,112 kgCO<sub>2</sub>/kg tijolo, portanto, um consumo substancialmente inferior ao indicado pelo BRE e Koroneos.

Da consulta da base de dados Simapro, as três soluções de tijolo disponíveis apresentam desvios importantes em relação a aos consumos de energia e às emissões de CO<sub>2</sub> registadas em Portugal, pelo que foi corrigida a informação do processo “Ceramics I”, para o perfil de consumo de energia indicado no estudo de Amaral (1999), sendo obtidos 0,000114 ecopontos/kg tijolo, Figura 4.10. No fabrico de azulejos e ladrilhos existe um consumo adicional de energia correspondente à vitrificação (4,6 MJep/kg), correspondendo a 0,00153 ecopontos/kg, Figura 4.11.

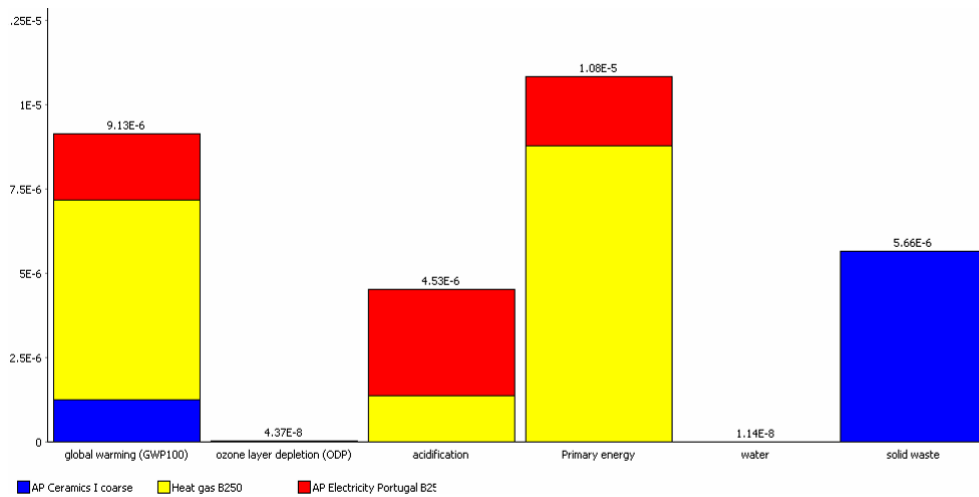


Figura 4.10 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de tijolo

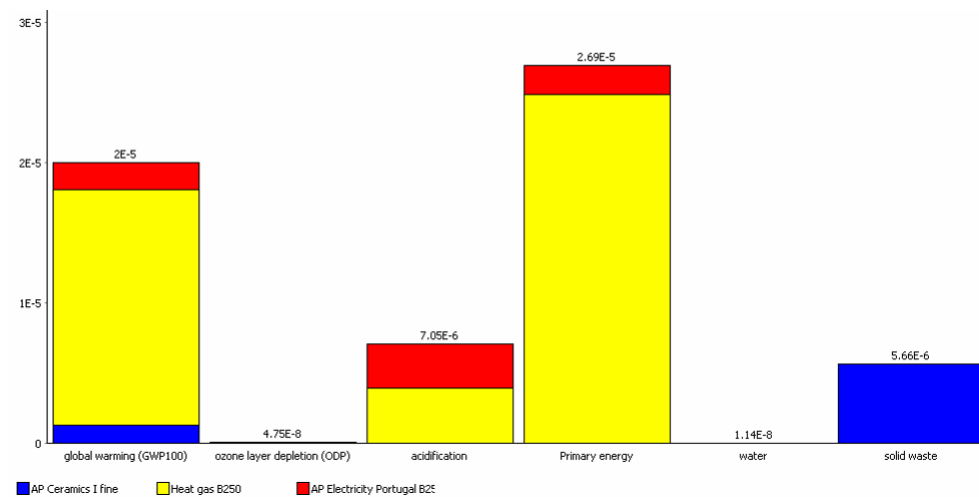


Figura 4.11 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de cerâmica fina - ladrilhos azulejos

#### 4.1.5.3- Madeira

Durante séculos a madeira foi um dos principais materiais de construção, actualmente a sua utilização em Portugal é mais limitada, destinando-se principalmente a revestimentos, caixilharia interior e em alguns casos a caixilharia exterior. Além da utilização de madeira, na construção são utilizados diversos materiais derivados de madeira, por exemplo

- placa de madeira maciça,
- madeira lamelada colada (LVL),
- contraplacado,
- aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas (OSB),
- placa de aglomerados de partículas de madeira ligadas por resinas,
- placa de aglomerado de partículas de madeira ligadas por cimento,
- placa de aglomerado de fibras de madeira (MDF).

A madeira é um material de origem natural, que tem o potencial de se renovar, é uma fonte abundante, absorve CO<sub>2</sub> na fase de crescimento das árvores, consome pouca

energia na transformação, é reciclável, é biodegradável e não é tóxica. A madeira apresenta um baixo valor de energia incorporada e a madeira local pode apresentar energia incorporada de 0,5 MJ<sub>ep</sub>/kg, atingindo valores de 24 MJ<sub>ep</sub>/kg para painéis de madeira, quadro 2.6. A madeira quando encarada como um combustível tem um poder calorífico de sensivelmente 15 MJ/kg.

Contudo, apesar destas vantagens, na prática regista-se que a floresta mundial está a desaparecer a um ritmo superior ao da sua substituição por meios naturais ou por plantação, colocando em causa a renovação e a manutenção da floresta. Nesse sentido, a madeira a utilizar deve ser proveniente de florestas exploradas de forma sustentada (por exemplo, ter certificação *Forest Stewardship Council*, *Pan-European Forest Certification Council*, *Convention on International Trade in Endangered species of wild fauna and flora*), para que o abate das árvores não comprometa a biodiversidade. Em Portugal, não existe ainda um sistema de qualificação ambiental da exploração da floresta e de qualificação da madeira, pelo que existe o risco de ao consumo de madeira estar associado a degradação da floresta e dos ecossistemas.

Existem também diversos tipos de madeira que não são duráveis naturalmente (NP EN 250-2, 2001) e que carecem de tratamentos de preservação para os ataques biológicos, podendo nesta fase ser incorporadas substâncias tóxicas (ex., sais de cobre, de crómio, de arsénico, creosoto). Nesse sentido, devem ser seleccionados os tipos de madeira adequados à sua utilização, preferencialmente madeiras duráveis naturalmente e caso seja necessários tratamentos de preservação estes devem ser efectuados, por exemplo, com borato de sódio e ácido bórico. De uma forma geral a madeira em contacto com água ou submetida a intensa radiação solar poderá carecer de uma manutenção mais intensa do que outros materiais, por exemplo alumínio, pedra, etc.

Petersen (2005), sintetiza mais de uma dezena de estudos de ACV onde se evidência a vantagem da utilização da madeira como material de construção estrutural (face ao aço e betão) e como material de revestimento (face a PVC, linóleo, alcatifa, pedra). Quando a madeira é utilizada como material estrutural Petersen refere que a construção de madeira apresenta 44 a 85% menos consumo de energia que uma construção semelhante de aço e 70 a 87% menos do que uma construção semelhante de betão. No entanto também existem estudos que evidenciam que as vantagens não são tão significativas.

De acordo com o referido por Peuportier (2001) na fotossíntese é absorvido cerca de 1,85 kg CO<sub>2</sub> para produzir 1 kg de madeira, enquanto no aterro de 1 kg de madeira é produzido cerca de 0,0036 kg CO<sub>2</sub> e metano, e na incineração são produzidos 1,47 kg CO<sub>2</sub>. Tendo em conta que este é o ciclo natural de carbono, este ciclo não é considerado neste estudo. Por outro lado, a madeira encarada como um combustível apresenta uma energia primária de 15,3 MJ/kg, sendo esta energia considerada no item “recursos energéticos” do método CML 92 e Ecoindicator95 implementado na base de dados Simapro, pelo que esta fracção será incluída no cálculo da categoria “energia primária”.

Neste trabalho considera-se a madeira maciça, o contraplacado e o aglomerado de madeira. De acordo com a informação do RGCE (1982) na produção de MDF deve ser consumido menos de 13 MJep/kg e de 3 MJep/kg na produção de contraplacado. No entanto, tendo por base o que é referido no estudo de ACV (CTBA, 2004) e no quadro 2.6, verifica-se que estes valores são relativamente baixos, pois são apresentados valores de 5 MJep/kg para madeira maciça, 8 a 19 MJep/kg de contraplacado e 12 a 24 MJep/kg na produção de MDF. Nas figuras seguintes (Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14) são

apresentados os valores normalizados para a madeira (0,00276 ecopontos/kg), contraplacado (0,0125 ecopontos/kg) e MDF (0,0119 ecopontos/kg). Em todos os casos não é considerado o impacte ambiental associado à desflorestação, que terá de ser acutelada pela certificação da exploração sustentada da floresta.

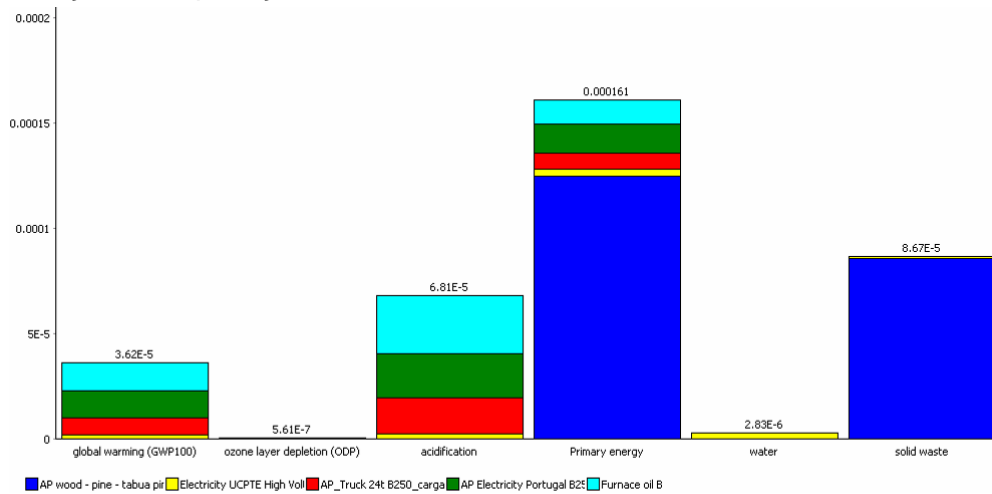


Figura 4.12 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de placa de madeira maciça

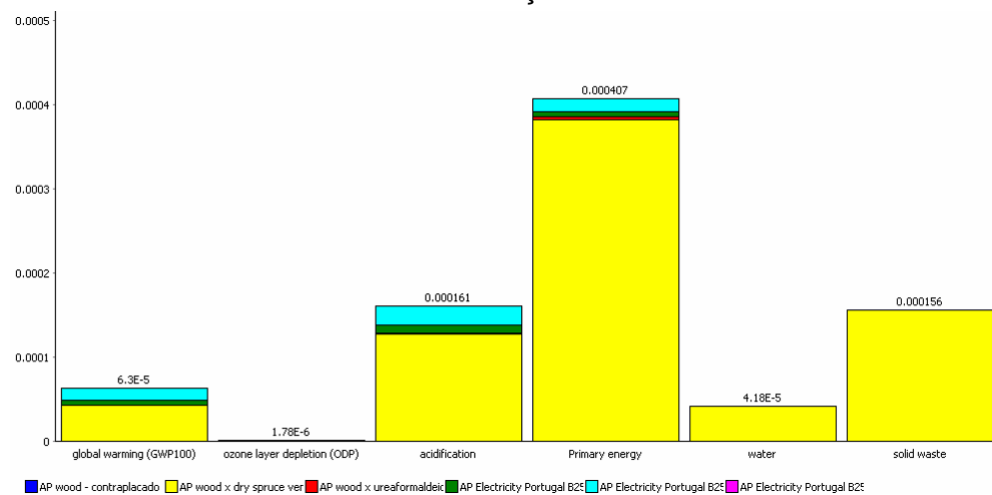


Figura 4.13 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de placa de contraplacado

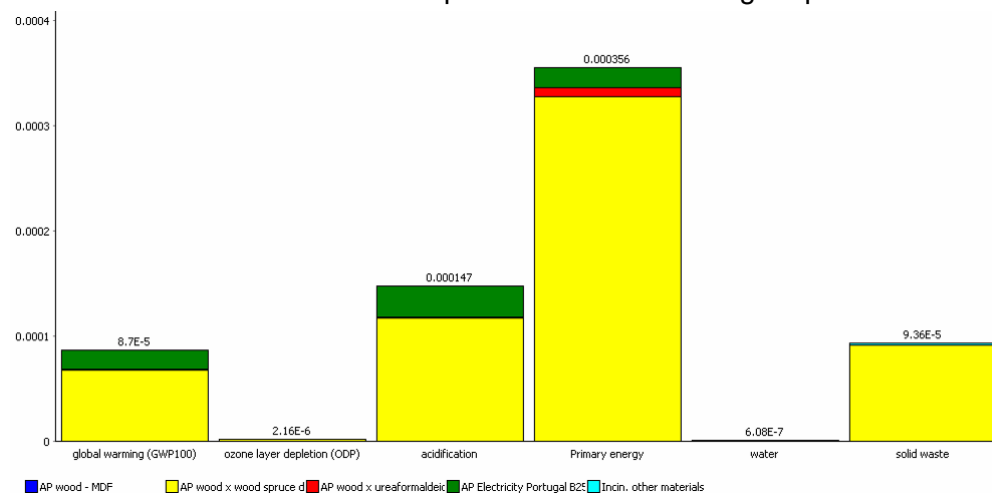


Figura 4.14 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de placa de aglomerados de fibras de madeira - MDF

O facto de se considerar o poder calorífico da madeira na categoria energia primária aumenta de forma significativa o valor da energia primária dos materiais de madeira, pois a energia primária da madeira maciça passa de 4,95 MJep/kg para 26,2 MJep/kg, no contraplacado de 12,3 MJep/kg para 69,6 MJep/kg e no MDF de 17,3 MJep/kg para 60,8 MJep/kg.

#### 4.1.5.4- Metais

##### 4.1.5.4.1 - Aço e aço inoxidável

Na construção o aço é utilizado em múltiplas aplicações, desde a estrutural (estrutura de aço, armadura no betão armado) a caixilharias, corrimões, calhas, tubagens, condutas, etc.

O aço é um material com uma energia incorporada importante devido ao seu processo de fabrico, apresentando valores de 25 a 40 MJep/kg (quadro 2.6 e Petersen, 2005), enquanto para aço reciclado são apresentados valores de 10 MJep/kg. Tendo em conta esta informação e as várias possibilidades existentes na base de dados Simapro, na avaliação do aço considera-se a informação da base de dados Buwal250. Para o aço obtém-se 0,0244 ecopontos/kg, enquanto para o aço 100% reciclado obtém-se 0,00787 ecopontos/kg.

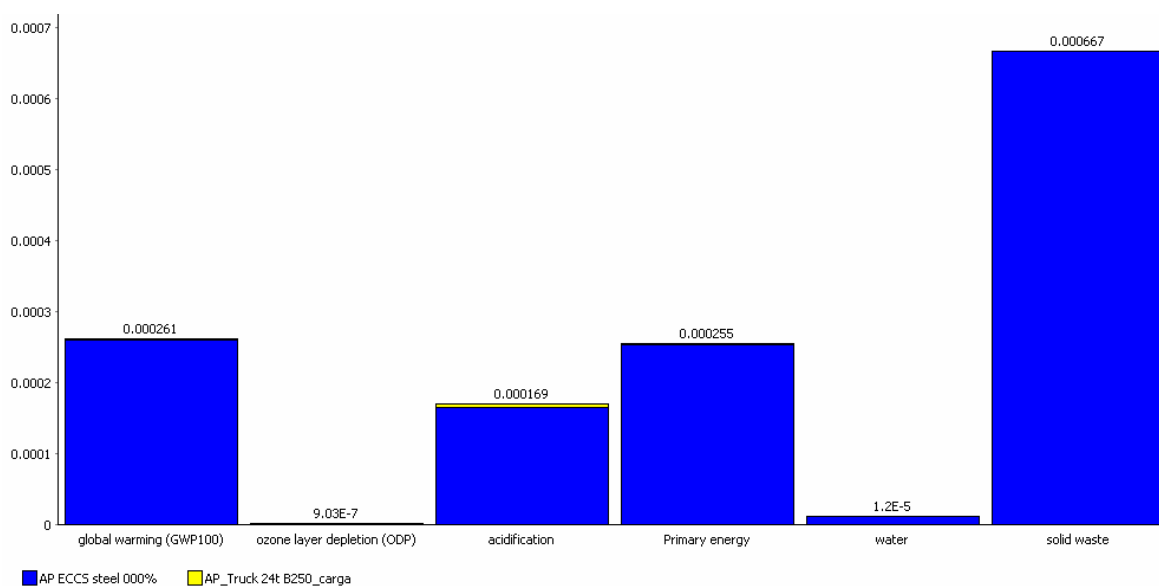


Figura 4.15 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de aço 0% reciclado

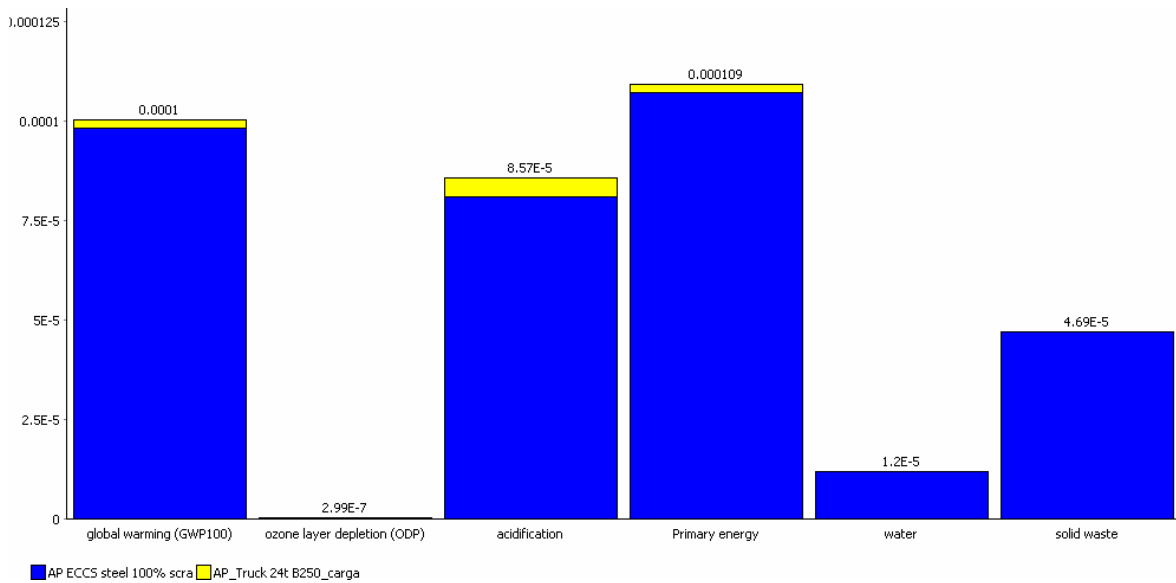


Figura 4.16 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de aço 100% reciclado

Na Figura 4.17 apresentam-se os valores normalizados do impacte ambiental associado ao aço inoxidável austenítico, para o qual se obtém 0,0367 ecopontos/kg devido, principalmente, ao impacte do elemento de liga níquel.

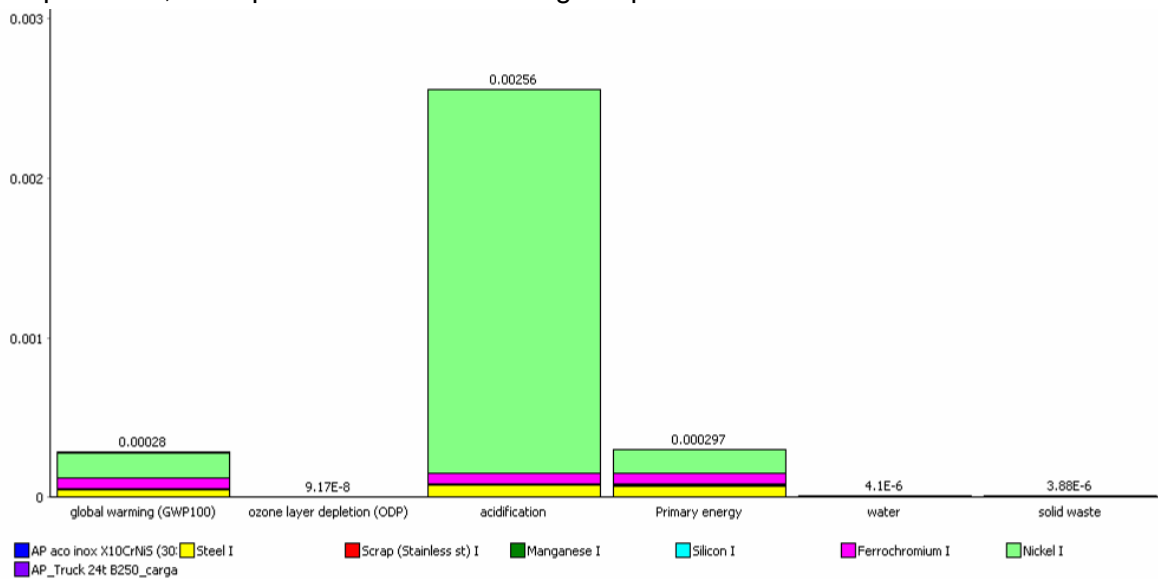


Figura 4.17 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de aço inoxidável (303)

#### 4.1.5.4.2 - Alumínio

O alumínio é um metal relativamente novo, pois sua utilização possui apenas 100 anos. Contudo, o alumínio actualmente é o segundo metal mais utilizado, perdendo apenas para o aço. A utilização do alumínio na construção é relativamente recente, encontrando-se aplicações em perfis de janelas, fachadas de alumínio e vidro, em perfis de persiana, encontrando-se actualmente uma utilização mais generalizada também em dispositivos de protecção solar e sistemas de fachadas opacas, painéis sanduíche, etc.

O alumínio é obtido a partir da bauxite, um mineral existente em abundância. Na produção de alumínio nos EUA, Canada e no Norte da Europa é utilizada bauxite proveniente, por exemplo, do Brasil, Suriname e Venezuela. No processo de fabrico existe

uma primeira fase de extracção do óxido de alumínio através de um aquecimento do minério até 1300°C e depois o processo de electrolise para extracção do alumínio puro, sendo emitidas elevadas quantidades de CO<sub>2</sub>, ácido sulfúrico e existe um elevado consumo de água. Por esse facto o alumínio apresenta um consumo de energia primária de 165 a 260 MJep/kg (Berge, 2005 e quadro 2.6). Na obtenção de alumínio por reciclagem existe um menor consumo de energia, pois neste caso existe um aquecimento da sucata até 650°C, sendo estimado um consumo de energia primária de 30 MJep/kg para alumínio 100% reciclado e 95 MJep/kg para alumínio com 50% de reciclagem (Berge, 2005). Tendo em conta este elevado potencial de poupança de energia (e de custos) associada à reciclagem de alumínio a associação de produtores de alumínio (IAI, 2005) refere que cerca de 75% do alumínio fabricado ainda se encontra em utilização. Na Figura 4.18 apresenta-se a evolução do consumo de alumínio “virgem” e de alumínio reciclado.

No ano 2000 o consumo de alumínio na construção correspondia sensivelmente a 25% do consumo global de alumínio (IAI, 2005). A reciclagem do alumínio apresenta ainda a vantagem da eliminação de resíduos, pois o alumínio é um material de difícil degradação pela natureza, podendo demorar entre 200 a 500 anos para se decompor no ambiente.

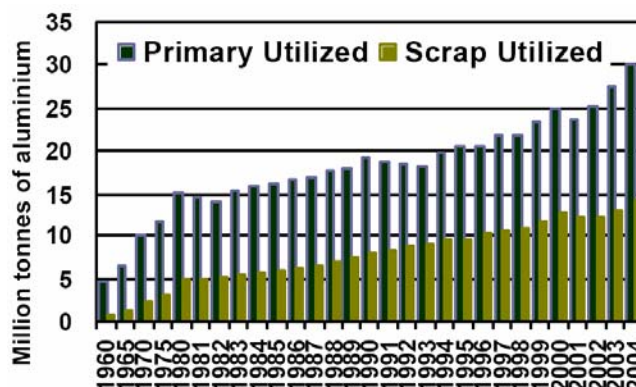


Figura 4.18 - Consumo de alumínio “virgem” e de alumínio reciclado (IAI, 2005)

Apesar desta mais-valia da utilização do alumínio reciclado, a grande maioria das extrusoras nacionais de fabrico de perfis de alumínio para arquitectura utiliza biletos de 1ª fusão, pois referem apresentar vantagens em relação à redução do número de perfis com defeitos e permite uma maior vida útil das matrizes de extrusão. Nesses fabricantes, a sucata de extrusão é reenviada para o fornecedor de biletos, integrando novos biletos de 1ª fusão, enquanto perfis com revestimento são enviados para reciclagem para outros fins. Assim, na ACV dos perfis de alumínio considera-se que 15% do alumínio provem de reciclagem (sucata de biletos de 1ª fusão sem contaminação) e que o restante corresponde a alumínio puro. O perfil ambiental normalizado está apresentado na Figura 4.19, sendo obtido um consumo de energia primária de 208 MJep/kg e 0,0848 ecopontos/kg. Para o alumínio 100% reciclado é estimada uma energia primária de 20 MJep/kg e 0,00761 ecopontos/kg.

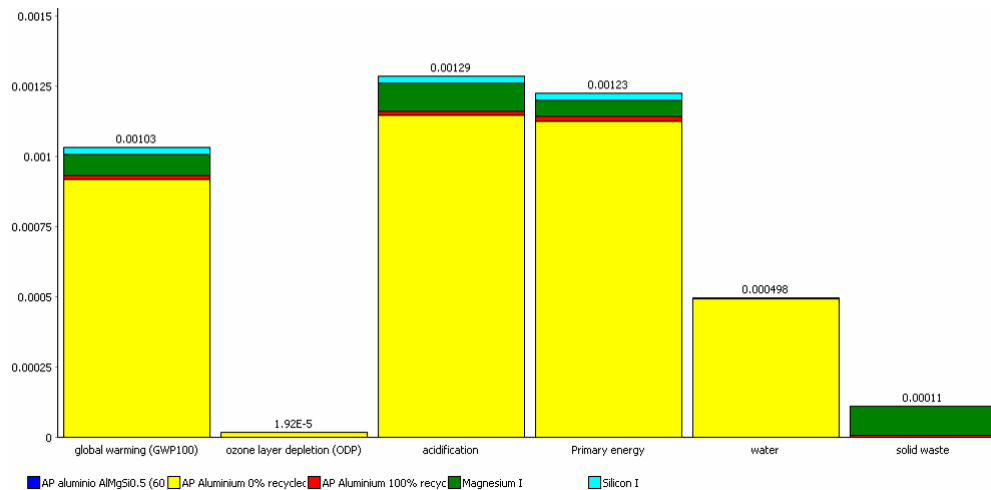


Figura 4.19 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de alumínio

#### 4.1.5.4.3 - Cobre

O cobre é utilizado frequentemente nas instalações eléctricas, nas instalações de gás e por vezes nas instalações de climatização e de distribuição de água. De acordo com a informação do quadro 2.6, a energia incorporada no cobre é de 50 a 100 MJep/kg. Na base de dados Simapro existe o material “Copper” que apresenta uma energia primária de 107 MJep/kg e que foi a solução adoptada. Na Figura 4.20 apresentam-se os valores normalizados das categorias de impacte ambiental a que correspondem 0,443 ecopontos/kg. Refere-se que o minério de cobre apresenta reservas limitadas, gerando uma grande quantidade de resíduos.

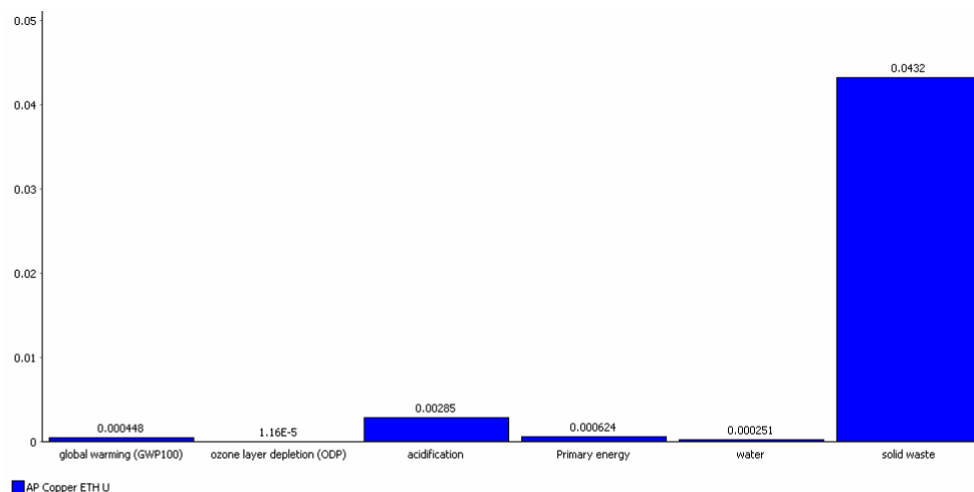


Figura 4.20 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de cobre

#### 4.1.5.5 - Materiais plásticos

Na construção são utilizados diversos materiais plásticos, por exemplo, para revestimento de pavimentos, tubagens, isolamento térmico, isolamento eléctrico, perfis de caixilharia.

Os materiais plásticos sendo derivados de petróleo, apresentam a limitação de serem provenientes de uma fonte limitada e de terem uma energia incorporada relativamente elevada. De uma forma geral para assegurar a durabilidade dos materiais



plásticos também são incorporados aditivos e estabilizantes, os quais são responsáveis por uma carga ambiental importante, bem como por emissões de poluentes para o ar interior ao longo da vida do produto.

Nos edifícios são utilizados diversos materiais plásticos e com várias aplicações, por exemplo:

**Termo-plásticos:**

- PVC: pode ser aplicado em caixilharia exterior, em tubagens de redes de água, caleiras, revestimento de pisos;
- Polietileno: tubagens de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais, película resiliente para isolamento sonoro em pavimento flutuante, material de embalagem de materiais;
- Polipropileno (PP): tubagens, alcatifas, instalação eléctrica (interruptores, isolamento cabos);
- Poliamida (PA): alcatifas, fita adesiva, instalação eléctrica (interruptores, isolamento), perfis de corte-térmico para janelas, fachadas e painéis;
- Policarbonato (PC): elemento transparente para coberturas;
- Poliestireno: isolamento térmico, isolamento eléctrico;
- PVCA: pintura, cola.

**Termo-endurecíveis:**

- Borracha de etileno propileno (EPDM): vedantes;
- Poliuretano: isolamento térmico, adesivo, acabamento.

De uma forma geral existe um potencial elevado de reciclagem dos materiais plásticos. Contudo, a reciclagem é limitada pela dificuldade de recuperação e separação da matéria-prima. Por outro lado, os produtos obtidos com material plástico reciclado, apesar de poderem apresentar o mesmo desempenho mecânico e durabilidade de produto novo, por vezes apresentam pequenos defeitos visuais, o que conduz a uma falta de aceitação dos utilizadores, reduzindo o seu potencial de reciclagem (Wright, 2005).

Seguidamente apresenta-se informação acerca do PVC, sendo apresentada na secção 4.1.5.7 a informação relacionado com os materiais de isolamento térmico.

**4.1.5.5.1 - PVC**

O PVC é um material objecto de grande controvérsia ao longo dos últimos anos, devido às suas vantagens (baixo custo, elevado isolamento térmico e eléctrico) e alguns inconvenientes (não ser biodegradável - mais de um século para se decompor, durabilidade, toxicidade em caso de incêndio, carga ambiental devido aos aditivos estabilizantes e plastificantes, quando colocado em aterro o risco de escorrimento de substâncias tóxicas como o cádmio, chumbo, prata, antimónio, etc).

Tendo em conta as limitações ambientais do PVC, a rede de investigação sobre a sustentabilidade do PVC (Wright, 2005), propôs várias acções nomeadamente:

- Um plano para substituição dos estabilizantes de chumbo até 2015, para além da substituição do cádmio;
- A reciclagem em 2010 de 200,000 tons de resíduos de PVC;

- A reciclagem de 50% do PVC recolhido de janelas, tubagens, membranas de cobertura e pavimento até 2008.

De acordo com o relatório (Wright, 2005) no ciclo de vida do PVC os aspectos ambientais mais relevantes são a extração do petróleo e a produção de estabilizantes e plastificantes. Os pigmentos de coloração apresentam um impacto ambiental baixo devido às baixas quantidades utilizadas. O PVC usualmente é depositado em aterro ou incinerado, podendo os metais pesados dos aditivos infiltrar-se no solo e águas subterrâneas e na sua incineração ser emitido cloro.

Em 1999 cerca de 57% do PVC fabricado era utilizado na indústria da construção, destinando-se cerca de 20% da produção total a tubagens de abastecimento e drenagem de água. As aplicações mais importantes do PVC na indústria da construção são: tubagens, janelas/persianas, pavimentos (Wright, 2005).

O PVC apresenta uma energia incorporada de 55 a 85 MJ/kg e emissões de 0,7 a 1,4 kgCO<sub>2</sub>/kg de acordo com a informação compilada no quadro 2.6 e com a informação do documento (Berge, 2005). Na ACV de tubos de abastecimento e drenagem de água efectuada em França (STR PVC, 2002) é estimado um consumo de energia primária de 65 MJep/kg, 2,12 kgCO<sub>2</sub>/kg e 1,79 kgSO<sub>2</sub>/kg.

De acordo com a base de dados Simapro, para o PVC são obtidos valores de 50 a 68 MJep/kg, 1,9 a 2,7 kgCO<sub>2</sub>/kg e 0,0014 a 0,0020 ecopontos/kg. Tendo em conta a informação disponível considera-se neste trabalho os processos baseados na informação da indústria, Figura 4.21 e Figura 4.22.

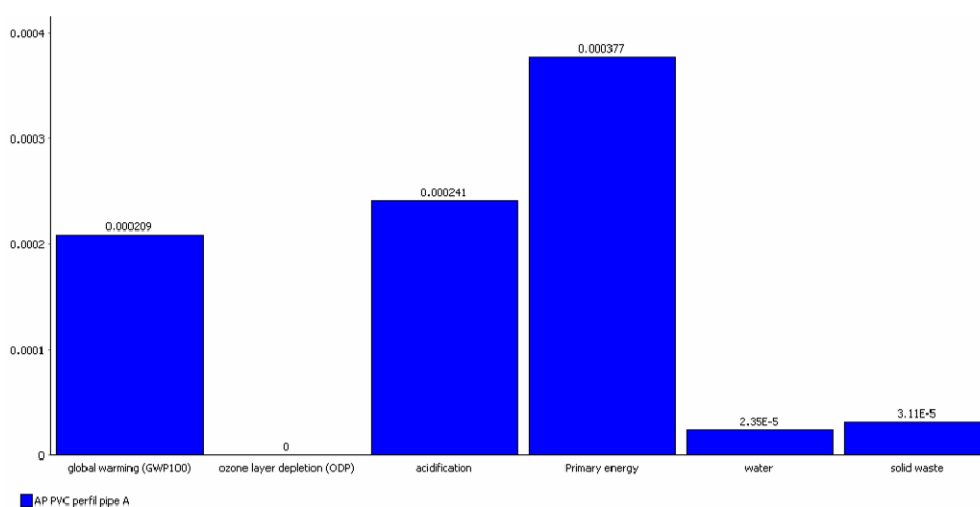


Figura 4.21 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de Tubo de PVC

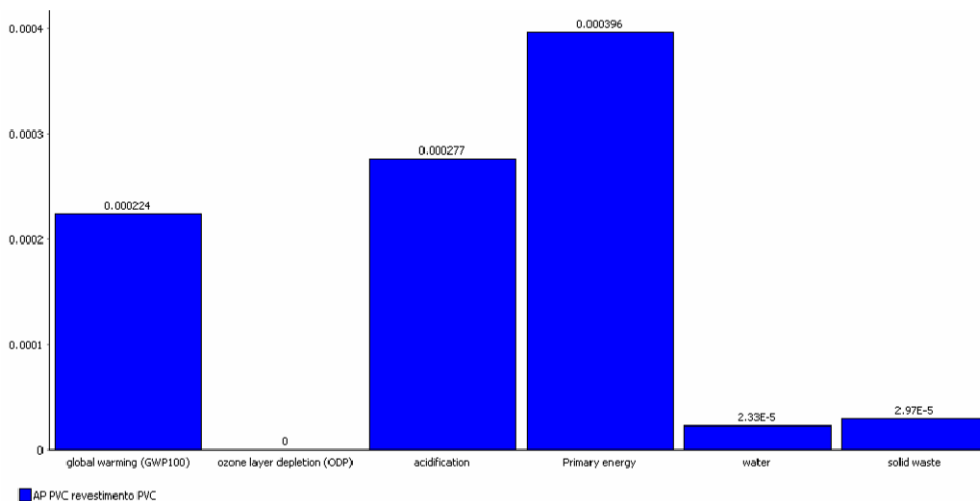


Figura 4.22 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de revestimento de PVC

#### 4.1.5.5.2 - Outros materiais plásticos

Para os restantes materiais plásticos também foi adoptada a informação proveniente da indústria, indicando-se no Quadro 4.8 os valores da energia primária, CO<sub>2</sub> e ecopontos.

Quadro 4.8 - Resumo da informação acerca do impacte ambiental de alguns materiais plásticos

Material	MJep/kg	kgCO <sub>2</sub> /kg	Ecopontos/kg	Exemplos de aplicação
Polietileno de alta densidade (HDPE)	80	1,87	0,0174	Tubagem de distribuição de água
Polietileno de baixa densidade (LDPE)	81	2,06	0,0173	
Película de polietileno	108	6,15	0,0426	Película de embalagens
Polipropileno (PP)	77	1,98	0,0327	Tubagens de distribuição de água
Espuma de Poliuretano	104	4,44	0,0173	Elemento de vedação e colagem de elementos de construção
Resina epoxíca	236	1,11	0,0269	

#### 4.1.5.6 - Vidro

O vidro é um material com utilização cada vez maior na construção. O vidro de construção é obtido principalmente pelo processo float, no qual são consumidas elevadas quantidades de energia. O vidro é um material obtido a partir da sílica que é um material abundante na natureza, apresentando o vidro incolor corrente um elevado potencial de reciclagem. Contudo, a utilização de vidros transformados, por exemplo, vidros com capas para melhorar o desempenho térmico, requerem a inclusão de óxidos metálicos que depois limitam o potencial de reciclagem. A película de butiral de polivinil dos vidros laminados utilizados principalmente por razões de segurança (Pinto, 2007) ou de isolamento sonoro, também limitam o potencial de reciclagem do vidro. Por outro lado, os elementos de selagem do vidro duplo, também necessitam de ser removidos para ser possível reciclar o vidro. Nestes casos a reciclagem do vidro será possível para utilizações de menor exigência como as embalagens.

A indústria da produção de vidro melhorou a eficiência energética do processo, tendo em 1995 reduzido em 30% o consumo de energia no forno face aos consumos de 1975,

estando o consumo agora na ordem de 5,5 a 8,0 MJep/kg (IPPC, 2001b). No quadro 2.6 são apresentados valores de 12 a 32 MJep/kg (em concordância com valores compilados por Kiani, 2001), sendo apresentado o limite de 9 MJep/kg no RGCE (1982). No RGCE não é efectuada distinção no RGCE entre o vidro incolor e o vidro colorido.

Na base de dados Simapro, para o vidro float incolor é estimada a energia de 16,2 MJep/kg, encontrando-se na gama de valores típicos indicados no quadro 2.6. No processo de fabrico do vidro é consumido 8,5 MJep/kg de vidro, existindo depois a incorporação da energia associada à extracção das matérias primas, transporte, etc. Na Figura 4.23 apresenta-se o perfil normalizado de um vidro simples para o qual é estimado 16,2 MJep/kg e 0,0062 ecopontos/kg e um vidro com revestimento para o qual é estimado 17,7 MJep/kg e 0,00674 ecopontos/kg.

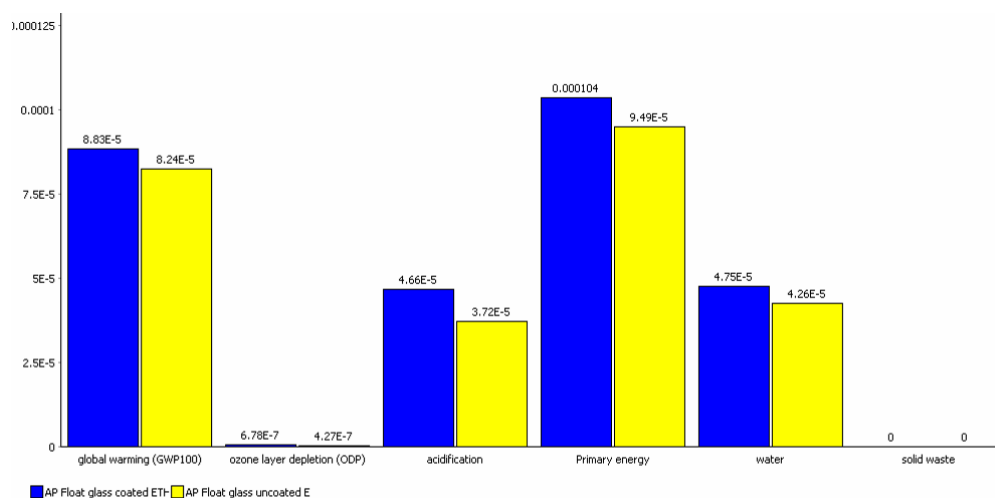


Figura 4.23 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 kg de vidro incolor

#### 4.1.5.7 - Isolantes térmicos

Os materiais de isolamento térmico podem apresentar-se em placas, mantas ou a granel, sendo utilizados os seguintes materiais:

- lã mineral (de rocha ou de vidro)
- poliestireno expandido moldado (EPS)
- poliestireno expandido extrudido (XPS)
- espuma rígida de poliuretano (PUR), que pode ser aplicada em placas, projectada
- espuma de polietileno expandido extrudido
- aglomerado de cortiça expandida
- aglomerado de cortiça natural com ligantes betuminosos ou sintéticos.

De acordo com Schmidt (2004) o isolamento térmico dos edifícios é realizado em 27% dos casos com lã de vidro, 30% com lã de rocha e em 40% dos casos com materiais plásticos. No Quadro 4.9 apresenta-se um resumo da informação acerca dos isolantes térmicos e de estudos de ACV ingleses.

Quadro 4.9 - Resumo das propriedades dos isolantes térmicos - bibliografia

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m°C)	kgCO <sub>2</sub>	kgSO <sub>2</sub>	kgCFC11	MJep	gPO4	l água	kg resíduos
Lã mineral (rocha)	35 a 100	0,040	1,3	0,0130	0	17,6	1,1	1,2	1,2
Lã mineral (vidro)	35 a 100	0,040	1,1	0,0095	0	21,3	0,82	4,3	0,081
EPS			6,0	0,0278	2,11E-6	93	2,74	489	0,0577
XPS	25 a 40	0,037	6,0	0,0300		72			
Poliuretano	35	0,040	4,8	0,0380		100			0,486
Aglomerado de cortiça expandida	90 a 140	0,045							
Aglomerado de cortiça natural com ligantes	100 a 150	0,050							
Espuma elastomérica flexível	60 a 80	0,050							
Papel reciclado						0,5 GJ/m <sup>3</sup>			

Na base de dados Simapro, existe informação acerca da produção de lã mineral, EPS, XPS e poliuretano. Os valores da base de dados Simapro são apresentados no Quadro 4.10 e são concordantes com os indicados no Quadro 4.9.

Da informação sobre o limite de consumo de energia para a produção de aglomerado negro de cortiça (RGCE, 1982) foi criado um processo para o material “aglomerado negro de cortiça expandida”, em que se admitiu um consumo de energia de gás de 25 MJep/kg para a produção de vapor de água e o transporte de 0,1 t.km da matéria-prima. Neste processo não foi obtida informação acerca do consumo de água e de produção de resíduos, os quais de uma forma geral são reutilizados na produção de calor para o processo de fabrico.

Quadro 4.10 - Resumo das propriedades dos isolantes utilizados neste estudo por kg

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m/K)	kgCO <sub>2</sub>	MJep	Ecopontos
Lã mineral	35 a 100	0,040	1,5	22	0,0122
EPS	>20	0,037	2,6	93	0,0212
XPS	25 a 40	0,037	3,6	104	0,0287
Poliuretano	35	0,040	4,0	100	0,0298
Aglomerado cortiça expandida	90 a 140	0,045	1,6	32	0,0098

Dos resultados do Quadro 4.10 regista-se que o aglomerado negro de cortiça e a lã mineral são os isolantes com menor impacte ambiental, apresentando cerca de metade do valor correspondente aos dos isolantes plásticos. De uma forma geral todos os isolantes térmicos referidos podem ser reciclados, podendo alguns deles ter valorização energética.

Na construção, alguns dos isolantes térmicos podem ter a sua aplicação limitada devido à baixa classe de reacção ao fogo como a cortiça, EPS, XPS, PUR (a não ser que sejam aplicados aditivos ignifugantes), bem como, devido à degradação com a água ou face à exposição solar ou a limitações de resistência mecânica (Santos, 1995).

#### 4.1.5.8 - Vários

No Quadro 4.11 apresentam-se os valores das categorias de impacte ambiental (energia primária e emissão de CO<sub>2</sub>) e do indicador único para alguns materiais utilizados na ACV dos edifícios que se encontram na base de dados Simapro e que foram adoptados neste estudo.

Quadro 4.11 - Valores do impacte ambiental de alguns materiais

	MJep	kgCO <sub>2</sub>	Ecopontos
Tinta ETH	35,1	1,78	0,013
Fluidos frigoríficos R134	40,1	21,8	0,0981
Silicone	34,4	1,27	0,00716
EPDM	104	3,2	0,0279
Poliamida 6.6 30% fibra de vidro	109	6,6	0,0418

#### 4.1.6 - Fase de construção

Na construção sustentável, os materiais e sistemas a adoptar devem:

- Minimizar o impacte ambiental na fase de construção (incluindo a extracção das matérias primas, a sua transformação e transporte): devendo privilegiar-se recursos endógenos, renováveis, abundantes na natureza, materiais e componentes reciclados, reutilizáveis ou recicláveis e minimizar os desperdícios e perdas de material.
- Minimizar os impactes durante a fase de exploração: escolhendo materiais com um longo período de vida útil, com baixa manutenção e que optimizem o desempenho térmico do edifício;
- Minimizar os impactes na fase de fim de vida: permitindo a sua reutilização ou reciclagem, que sejam biodegradáveis e que minimizem os impactes na fase de aterro.

Neste trabalho pretende-se obter uma estimativa do impacte ambiental global dos edifícios e em particular dos elementos da envolvente e a sua interacção com os sistemas de climatização. Nas secções seguintes é apresentada a avaliação ambiental de alguns elementos de construção com base na informação determinada nas secções anteriores.

##### 4.1.6.1 - Infra-estruturas e estrutura (fundações, betão armado)

Na realização das infra-estruturas existe uma primeira fase de preparação do terreno, com escavações, transporte de terras e resíduos. Estas quantidades dependem da dimensão do edifício e da existência de pisos enterrados. Depois de preparado o terreno, existe a realização das fundações e dos trabalhos de impermeabilização. Em relação ao impacte ambiental destas actividades, a informação é escassa. No quadro 2.6 é indicado um consumo de energia primária para as escavações de 0,042 MJ/m<sup>3</sup>. Esta massa de terra considera-se que é transportada 100 km, como foi referido no capítulo 2.

A estrutura considera-se que é realizada em betão armado com 1% em volume de aço, tendo as características apresentadas na Figura 4.6.

##### 4.1.6.2 - Paredes exteriores, interiores e revestimentos

###### 4.1.6.2.1 - Paredes exteriores

As paredes dos edifícios podem comportar várias soluções, nomeadamente as indicadas no Quadro 4.12 e no Quadro 4.13.

Legenda do Quadro 4.12 e do Quadro 4.13:

- 1 - Revestimento exterior (reboco, pedra)
- 2 - Pano de alvenaria (tijolo, blocos)
- 3 - Revestimento interior

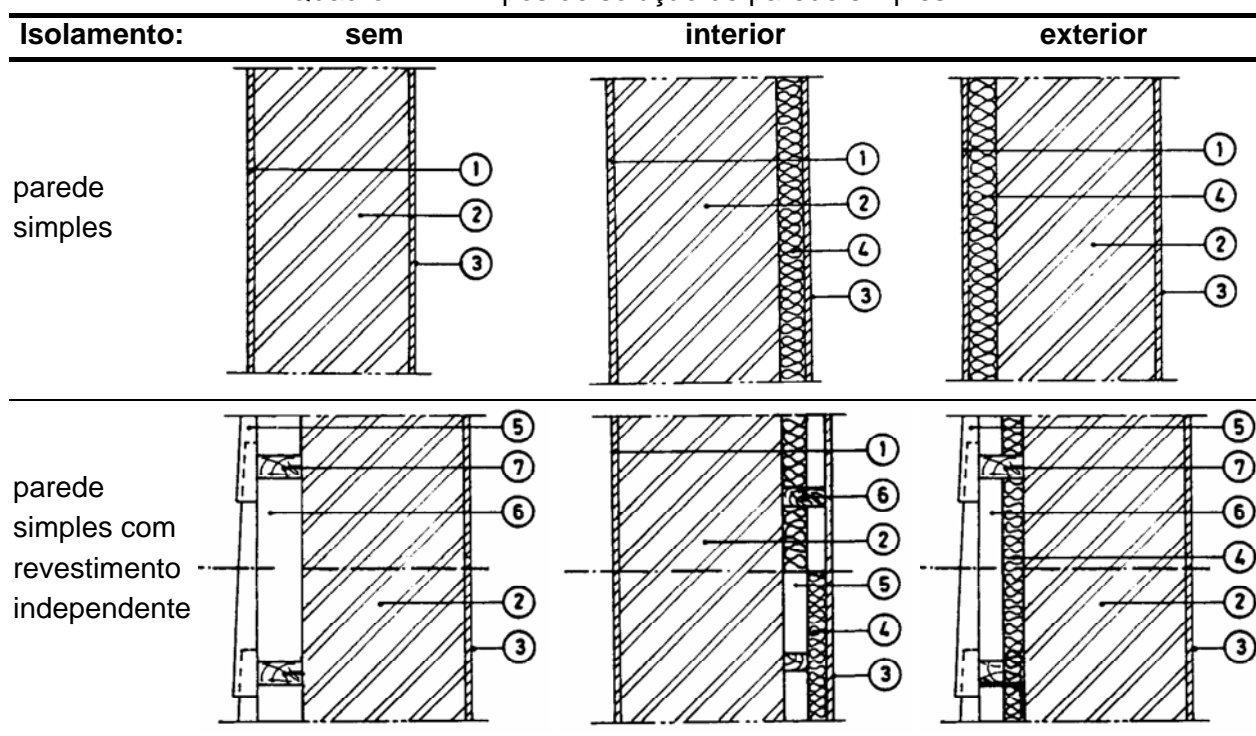
4 - Isolamento térmico

5 - Revestimento exterior independente (chapa de fibrocimento, alumínio, vidro, pedra, etc)

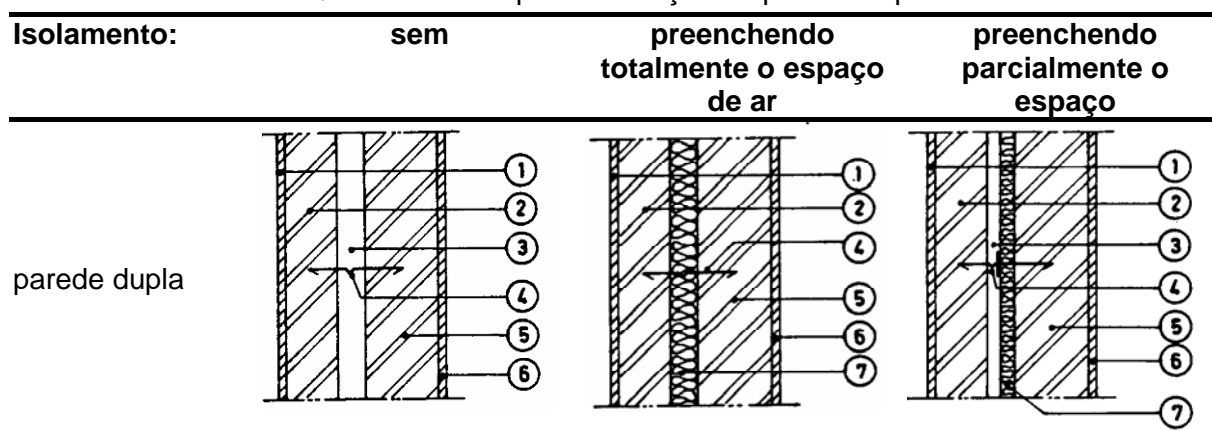
6 - Espaço de ar (ventilado ou não)

7 - Estrutura de suporte do revestimento exterior (madeira, alumínio, aço)

Quadro 4.12 - Tipos de solução de parede simples

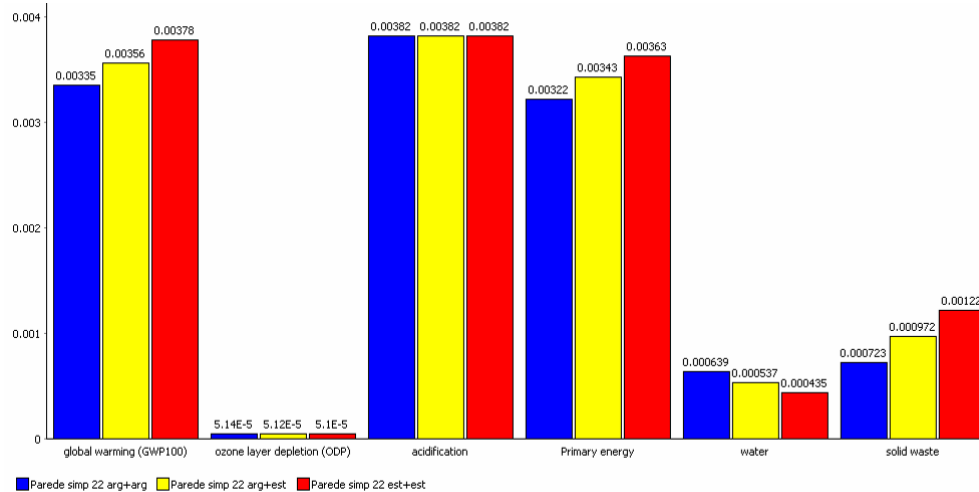


Quadro 4.13 - Tipos de solução de parede dupla



No mercado existem tijolos e blocos de vários tipos e dimensões (Santos, 1986a), o que perfaz um número relativamente elevado de soluções. Neste trabalho considera-se a aplicação de tijolo cerâmico furado de 22 cm para os panos de alvenaria simples exteriores e panos de alvenaria de tijolo 11+15 cm para as soluções de parede dupla. Para a envolvente interior, considera-se panos de alvenaria de tijolo de 11 cm para paredes de separação no interior da mesma fracção e paredes de tijolo de 22 cm quando essa parede separa fracções distintas.

Na Figura 4.24 apresenta-se a comparação do perfil ambiental normalizado da solução de parede simples com revestimento de reboco de ambos os lados, de reboco e estuque de cada um dos lados e uma terceira solução com estuque de ambos os lados. Na análise considera-se o período de vida útil de 50 anos e a parede revestida por pintura de ambos os lados. Na análise foi considerado o período de vida útil da pintura de 10 anos para o interior e de 20 anos para o exterior (Quadro 4.4). Foi considerado um desperdício de 10% na vida do tijolo e de 5% para a argamassa. Os resultados obtidos revelam que a adoção do reboco apresenta menor impacto ambiental, redução de sensivelmente 10%. Apesar desta diferença, para simplificar a análise subsequente considera-se que as paredes se encontram revestidas por reboco no lado exterior e por estuque no lado interior.



	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	Ecopontos/m <sup>2</sup>
Reboco+Reboco	41	551	0,257
Reboco+Estuque	44	586	0,273
Estuque+Estuque	46	621	0,288

Figura 4.24 - Comparação dos valores normalizados do impacto ambiental de 1 m<sup>2</sup> de parede de tijolo de 22 cm com diversos revestimentos

Tendo em conta o tipo de soluções de parede, foram analisadas paredes simples e paredes duplas, encontrando-se os resultados no Quadro 4.14. Na Figura 4.25 e na Figura 4.26 apresenta-se o impacto ambiental de 1 m<sup>2</sup> de parede com 60 mm de isolante térmico de XPS. Dessas figuras é possível inferir a importância do tijolo nas diferentes categorias de impacto ambiental. Na Figura 4.26 pode observar-se o perfil ambiental normalizado de 1 m<sup>2</sup> de parede (incluindo fase de fim-de-vida), sendo perceptível a relevância do tratamento dos RCD, devendo a minimização destes resíduos ser uma preocupação na concepção dos edifícios. Nesse cálculo admitiu-se que 50% dos resíduos são reciclados (para inertes) e 50% se destinam a aterro.

Para a solução com revestimento exterior em painéis de alumínio, foram analisados os casos em que esses painéis eram fabricados com alumínio de 1ª fusão e alumínio 100% reciclado. Em ambos os casos, considerou-se que no fim-de-vida 95% do alumínio volta a ser reciclado, dando origem a bilhetes de alumínio reciclado. Em relação ao painel sanduíche considerou-se a utilização de chapa de aço (40% de material reciclado) e que no fim-de-vida cerca de 80% do aço volta a ser reciclado dando origem a aço reciclado.

Das soluções de parede apresentadas no Quadro 4.14 regista-se que quanto maior a espessura de isolamento térmico maior a eficácia (ecopontos/resistência térmica).



Quadro 4.14 - Apreciação do impacte ambiental de soluções de fachada opaca incluindo fase de fim-de-vida

	Ecopontos/m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	U (W/m <sup>2</sup> /K)	PT×U
PS 22 Reb+Reb	0,631	650	48,5	1,30	0,820
PS 22 Reb+Est	0,632	672	50,2	1,30	0,822
PS 22 Est+Est	0,632	694	51,9	1,30	0,822
PS 22 Reb+Est	0,632	720	50,2	1,30	0,822
PS 22 + XPS 20	0,652	735	52,7	0,76	0,498
PS 22 + XPS 40	0,672	798	55,2	0,54	0,363
PS 22 + XPS 60	0,692	861	57,7	0,42	0,289
PS 22 + XPS 100	0,732	985	62,8	0,29	0,211
PD 11+15 Reb+Est	0,790	836	61,4	0,96	0,758
PD 11+15 + XPS 20	0,810	899	63,9	0,65	0,525
PD 11+15 + XPS 40	0,830	962	66,4	0,49	0,407
PD 11+15 + XPS 60	0,850	1030	69	0,39	0,334
PD 11+15 + XPS 100	0,890	1150	74	0,28	0,251
PD 11+15 + Lã 60	0,835	915	66,3	0,38	0,314
Painel Sanduíche Aço (50%rec) PUR 60	0,710	1530	96,6	0,60	0,425
PS 22 + XPS 60	0,692	861	57,7	0,42	0,289
PS 22 + XPS 60+Rev Al 100% rec	0,693	990	61,2	0,42	0,290
PS 22 + XPS 60+Rev Al 0% rec	1,620	3330	199	0,42	0,678

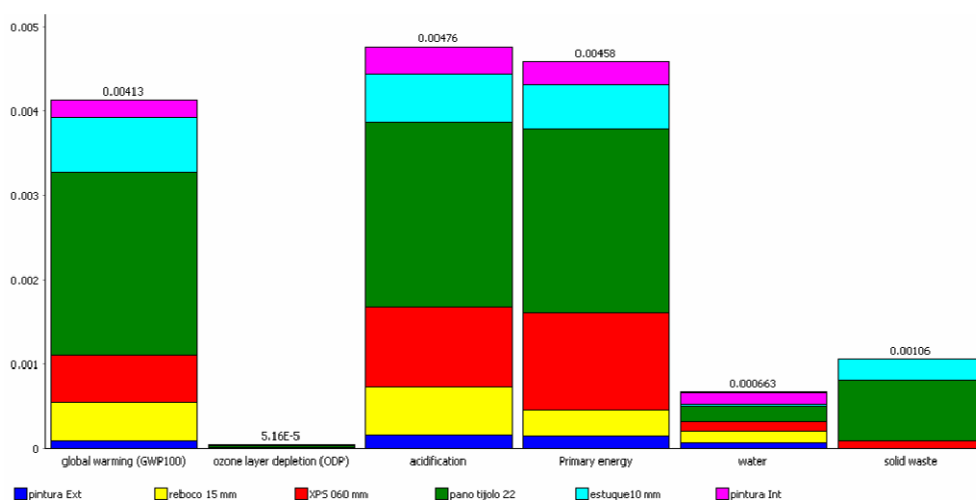


Figura 4.25 - Perfil ambiental normalizado da parede de tijolo de 22 cm (sem incluir fase de fim-de-vida)

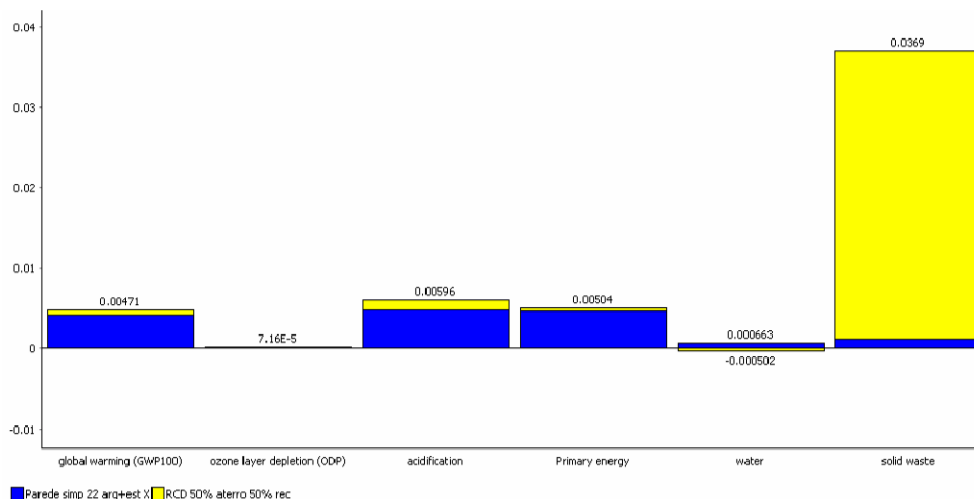


Figura 4.26 - Perfil ambiental normalizado da parede de tijolo de 22 cm (incluindo a fase de fim-de-vida)

Da comparação da solução de parede dupla com lã mineral e XPS, regista-se que não existe uma diferença significativa. Efectivamente, apesar da lã mineral apresentar cerca de metade da carga ambiental do XPS por unidade de massa, como neste caso se considerou lã mineral de  $50 \text{ kg/m}^3$  e XPS de  $30 \text{ kg/m}^3$ , obtém-se sensivelmente o mesmo resultado para espessuras (isolamento térmico) iguais.

Na Figura 4.27 apresenta-se um gráfico com a energia primária e o indicador ambiental único associado a cada uma das soluções de fachada. Dessa figura regista-se que não existe uma variação linear destes dois indicadores, revelando por isso que apesar da energia primária ser um indicador ambiental importante, será preferível adoptar um indicador que inclua outros efeitos ambientais para além da energia.

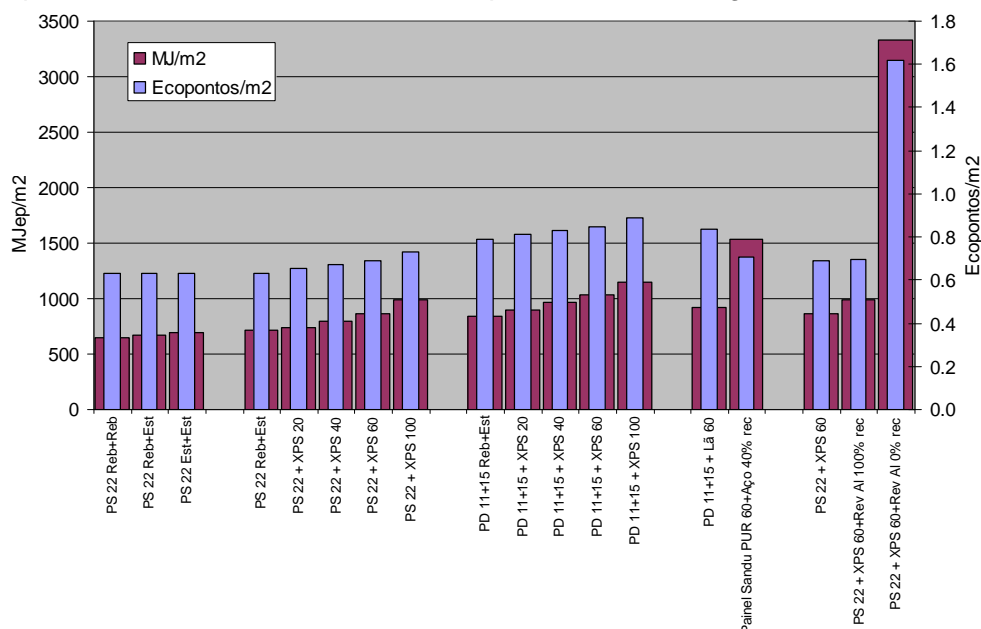


Figura 4.27 - Comparação dos valores do indicador ambiental único e da energia primária de soluções de parede opaca

#### 4.1.6.2.2 -Paredes interiores

Conforme foi referido, para as paredes interiores considera-se que são utilizadas paredes de alvenaria com tijolo de 22 cm para as situações em que são separadas fracções e tijolo de 11 cm na separação de comportamentos. Os pressupostos do cálculo são os apresentados na secção anterior. Nesta secção aprecia-se também o desempenho ambiental de elementos de divisórias leves com placas de gesso cartonado e de painéis de contraplacado. Nas soluções de divisórias leves, as placas são fixas através de uma estrutura metálica de aço galvanizado e no seu interior considera-se que é aplicada lã mineral de 60 mm de espessura. No fim-de-vida considera-se que os elementos de madeira e aço são reciclados e as placas de gesso cartonado são incineradas. Dos resultados obtidos verifica-se a vantagem em termos ambientais das soluções de divisória leve face à parede de alvenaria, pois apesar de terem uma energia incorporada superior apresentam menor valor do indicador ecopontos devido principalmente à redução dos resíduos no fim-de-vida.

Quadro 4.15 - Apreciação do impacte ambiental de soluções de divisórias leves

Revestimento	Ecopontos/m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>
Aglomerado de madeira	0,295	660	38,9
Gesso cartonado	0,355	881	32,4
Alvenaria 11 cm	0.456	509	37,8

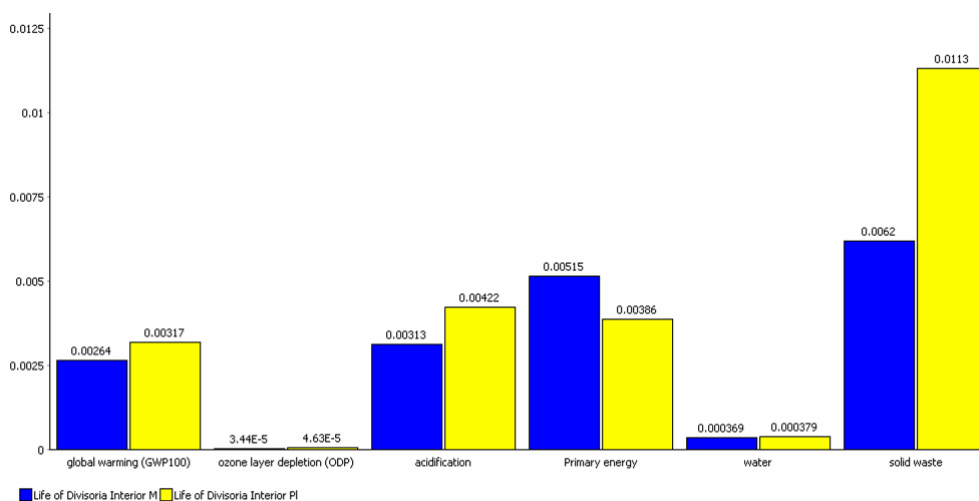


Figura 4.28 - Perfil ambiental normalizado das divisórias leves

#### 4.1.6.3 - Lajes e revestimentos

Em relação às lajes existe também uma enorme diversidade de soluções. Sobre as lajes é aplicado o revestimento de piso e no lado oposto o revestimento do tecto.

Tendo em conta a diversidade de soluções, neste estudo considera-se uma laje aligeirada com vigotas de betão e blocos cerâmicos com uma espessura total de 21 cm (solução 30-16-12-5 - Santos, 1986b) e considerou-se uma laje maciça de betão armado com 20 cm de espessura. Na Figura 4.29 apresenta-se o perfil normalizado do impacte ambiental para a laje aligeira e para a laje maciça (ambas sem revestimento), para as quais se obtém respectivamente 946 MJep/m<sup>2</sup> e 1,00 ecopontos/m<sup>2</sup> e 2150 MJep/m<sup>2</sup> e 1,99 ecopontos/m<sup>2</sup>.

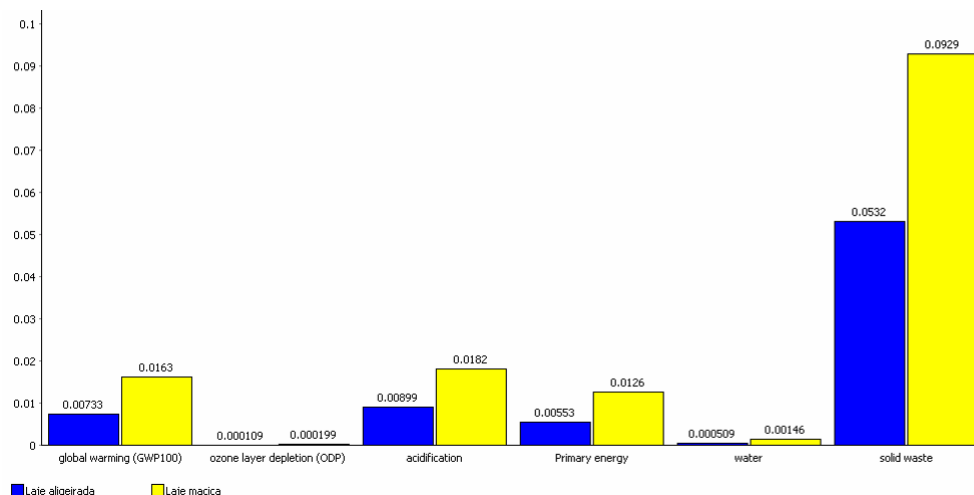


Figura 4.29 - Valores normalizados do impacte ambiental de 1 m<sup>2</sup> de laje de pavimento

O revestimento das lajes pode ser efectuado directamente sobre estas ou serem adoptados tectos falsos e pavimentos sobre-elevados mais típicos nos edifícios de serviços. Na Figura 4.30 (Quadro 4.16) encontra-se o perfil ambiental normalizado referente às seguintes soluções:

- laje aligeirada, pavimento de madeira e revestimento de estuque no tecto;
- laje aligeirada, pavimento de contraplacado de madeira e revestimento de estuque no tecto;
- laje aligeirada, pavimento de pedra e revestimento de estuque no tecto;
- laje aligeirada, pavimento de cerâmicos e revestimento de estuque no tecto;
- laje aligeirada, pavimento sobre-elevado de estrutura de aço galvanizado, painel de MDF revestido a alumínio (100% reciclado) e revestimento de piso de linóleo e tecto falso de placa de gesso cartonado.

Quadro 4.16 - Apreciação do impacte ambiental de soluções de laje aligeirada com diversos revestimentos

	Ecopontos/m <sup>2</sup> excluindo fim-de-vida	Ecopontos/m <sup>2</sup> incluindo fim-de-vida	MJep/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>
Madeira+estuque	0,926	1,50	2190	153
Contraplacado+estuque	0,963	1,53	2450	154
Revestimento pedra+estuque	0,980	1,64	2050	167
Revestimento cerâmico+estuque	1,030	1,67	2180	174
Pavimento sobre-elevado e tecto falso gesso cartonado	1,800	2,50	3930	275

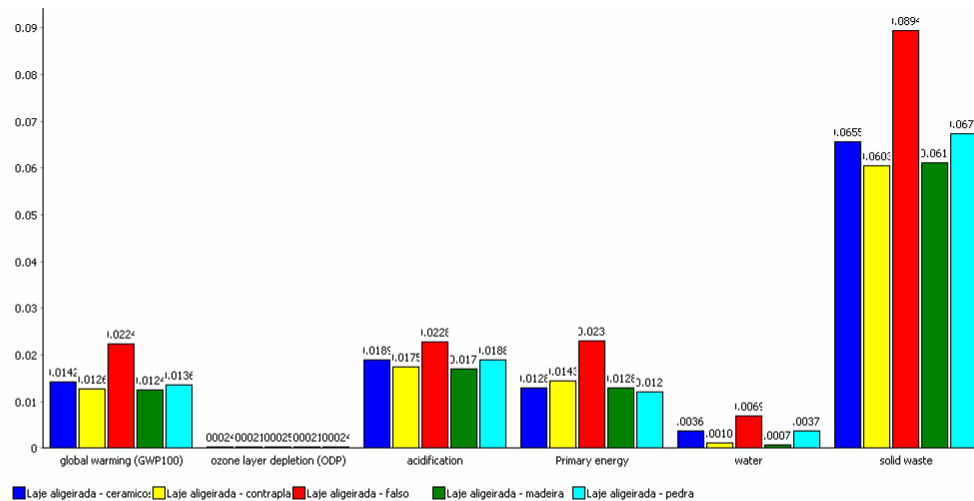


Figura 4.30 - Perfil ambiental normalizado de 1 m<sup>2</sup> de laje de pavimento com diversos revestimentos

Nos valores apresentados encontra-se incluída a substituição do revestimento cerâmico e de linóleo de acordo com a vida útil indicada no Quadro 4.4, bem como as tarefas de limpeza indicadas no Quadro 4.5.

Da Figura 4.30 regista-se o enorme impacto relativo associado à categoria resíduos, apesar de se estar a considerar uma taxa de reciclagem de 50% dos resíduos de cimento e cerâmicos. Estes resultados revelam a vantagem da utilização de revestimentos de madeira ou derivados, face a revestimentos cerâmicos, bem como da utilização de materiais mais naturais (madeira, pedra) face a materiais transformados (contraplacado, mosaicos). A utilização de tecto e pavimentos falsos revela ser uma solução substancialmente pior que as anteriores.

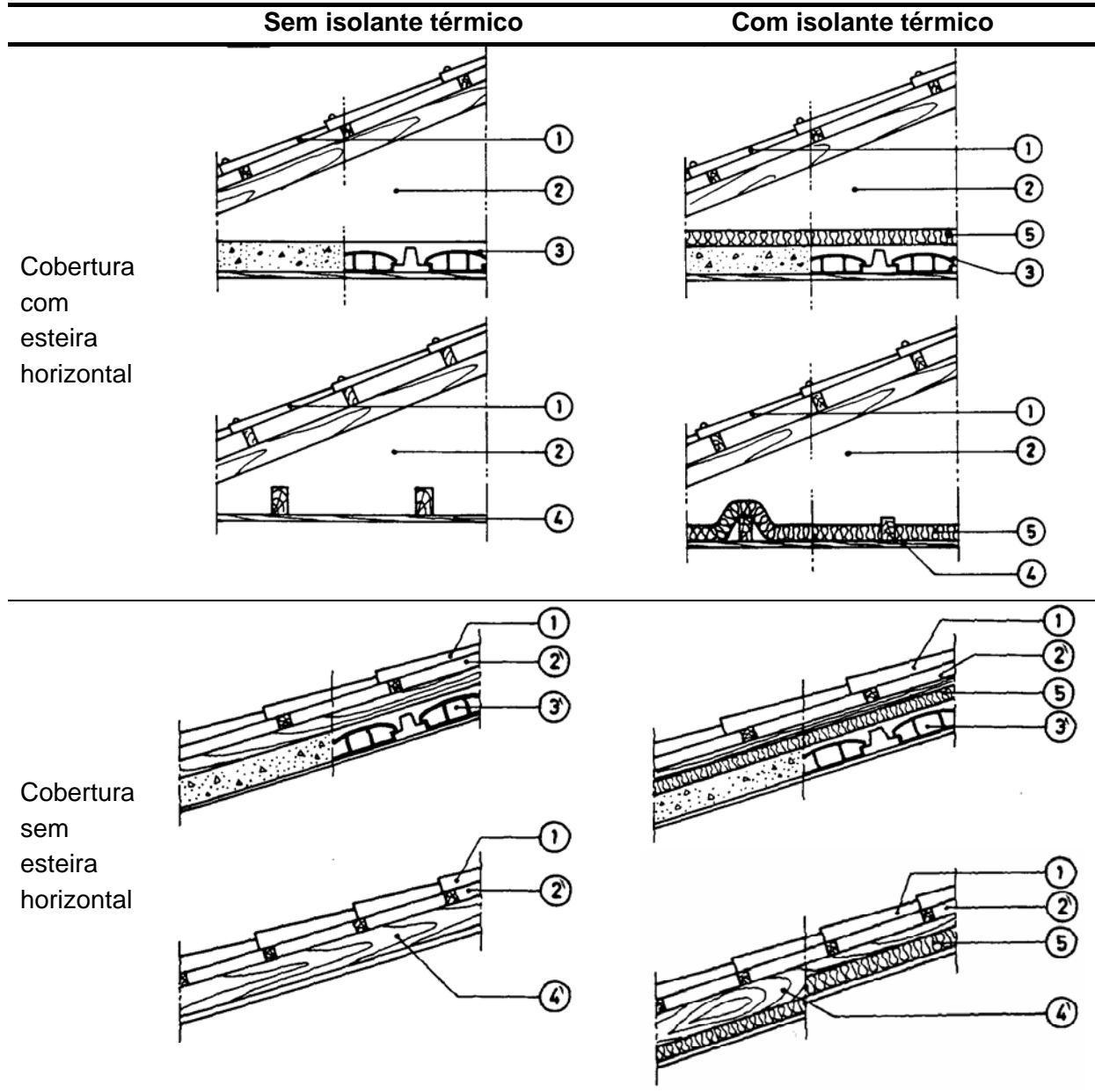
#### 4.1.6.4 - Coberturas

As coberturas podem enquadrar-se em coberturas em terraço e coberturas inclinadas, Quadro 4.17 e Quadro 4.18 (Santos, 1997).

Dependendo do tipo de solução adoptada os materiais de isolamento térmico devem satisfazer aos requisitos inerentes a um contacto prolongado com água, de resistência mecânica face à possível circulação de pessoas, existindo as recomendações gerais indicadas por Santos (1995). Em face dos resultados obtidos na ACV de paredes, nos quais não foram detectadas diferenças significativas entre a lã mineral e o XPS, neste trabalho considera-se a utilização de XPS para as soluções de cobertura em terraço e a lã mineral para as soluções de cobertura inclinada.

Na análise das coberturas considera-se a laje aligeirada descrita na secção anterior, sendo acrescentado o telhado e o isolante térmico de lã mineral. No inventário dos materiais envolvidos considera-se que a cobertura apresenta uma inclinação de 30°, sendo os valores adimensionalizados à área em planta. Nas coberturas em terraço considera-se a laje aligeirada, 10 cm de camada de forma, isolante térmico de XPS, sistema de impermeabilização (considerada membrana betuminosa com uma vida útil de 25 anos) e protecção exterior de lajetas. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.31 e no Quadro 4.19.

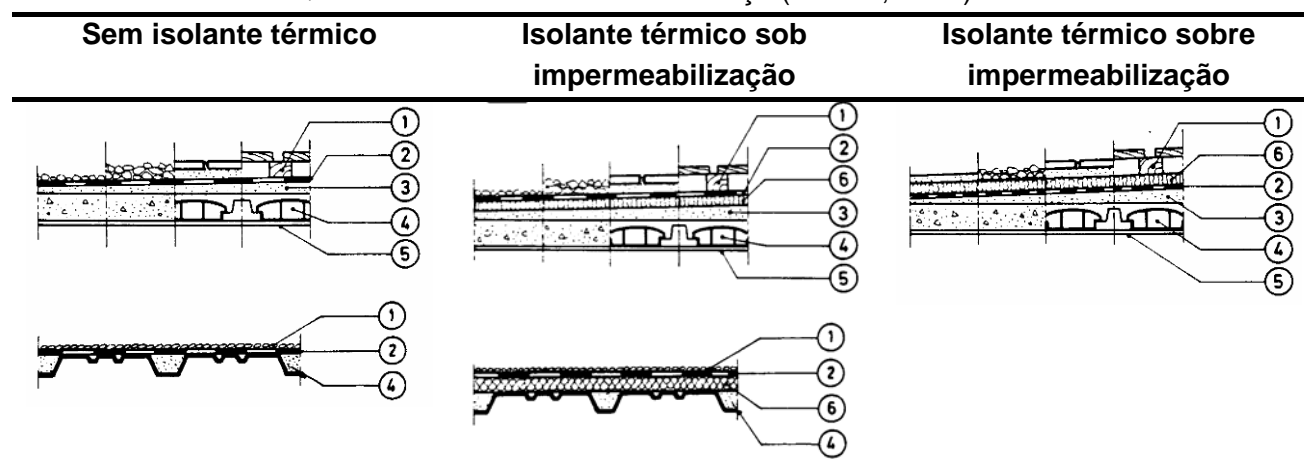
Quadro 4.17 - Coberturas inclinadas (Santos, 1997)



Legenda do Quadro 4.17:

- 1 - Revestimento descontínuo (telha, chapa metálica, ...)
- 2 - Desvão da cobertura sobre esteira horizontal
- 2' - Espaço de ar fortemente ventilado
- 3 - Esteira horizontal em laje (maciça ou aligeirada)
- 3' - Estrutura contínua (laje maciça ou aligeirada)
- 4 - Esteira horizontal leve (ripado, placas de gesso, de madeira, ...)
- 4' - Estrutura descontínua (ripado, placas de gesso, de madeira, ...)
- 5 - Isolante térmico

Quadro 4.18 - Coberturas em terraço (Santos, 1997)



Legenda do Quadro 4.18:

- 1 - Protecção exterior da cobertura (ladrilhos, lajetas sobre apoios, autoprotecção, ...)
- 2 - Sistema de impermeabilização
- 3 - Camada de forma
- 4 - Estrutura resistente (laje maciça, laje aligeirada, chapa metálica, ...)
- 5 - Revestimento interior
- 6 - Isolante térmico

Quadro 4.19 - Apreciação do impacte ambiental de soluções de Cobertura

	Ecopontos/m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	U (W/m <sup>2</sup> /K)
<b>Cobertura inclinada esteira horizontal</b>				
Lã mineral 000 mm	1,46	1440	131	2,8
Lã mineral 020 mm	1,47	1460	132	1,2
Lã mineral 040 mm	1,49	1490	134	0,74
Lã mineral 060 mm	1,50	1520	135	0,54
Lã mineral 100 mm	1,53	1570	139	0,35
<b>Cobertura inclinada e laje inclinada</b>				
Lã mineral 000 mm	1,53	1840	133	2,8
Lã mineral 020 mm	1,54	1870	135	1,4
Lã mineral 040 mm	1,56	1890	137	0,82
Lã mineral 060 mm	1,58	1930	139	0,60
Lã mineral 100 mm	1,61	1990	143	0,39
<b>Cobertura em terraço</b>				
XPS 000 mm	1,66	1890	152	1,3
XPS 020 mm	1,68	1960	154	1,0
XPS 040 mm	1,70	2020	157	0,64
XPS 060 mm	1,72	2080	159	0,52
XPS 100 mm	1,76	2210	164	0,39

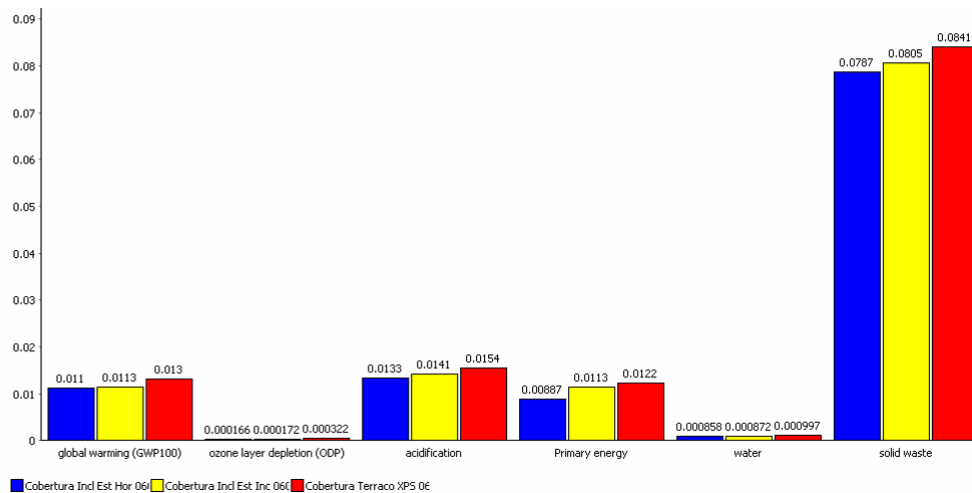


Figura 4.31 - Perfil ambiental normalizado de 1 m<sup>2</sup> de cada um dos três tipos de cobertura com 60 mm de isolante térmico

Dos resultados obtidos regista-se a importância dos resíduos para o indicador ambiental único. A cobertura inclinada com laje inclinada apresentar pior desempenho que a cobertura inclinada com esteira horizontal porque tem mais 15% de material associado à laje aligeirada de blocos cerâmicos. Dos resultados obtidos, o impacto ambiental associado à cobertura advém essencialmente da laje aligeirada.

As coberturas verdes, correspondem a uma solução emergente e que não é analisada neste trabalho. As coberturas verdes ou ajardinadas correspondem a dotar a cobertura com sistema de drenagem e terra para ser possível o crescimento de vegetação. De acordo com Kosareo (2007) existem as coberturas verdes extensivas (cerca de 50 a 150 mm de profundidade de terra para crescimento de plantas) e as coberturas intensivas (cerca de 150 a 1200 mm de profundidade de terra para crescimento de plantas). Kosareo (2007) efectuou a comparação do desempenho de coberturas ajardinadas face a uma solução tradicional, referindo que as coberturas verdes podem apresentar vantagens em relação ao desempenho térmico do edifício, à capacidade de retenção de água da chuva (reduzindo o risco de cheia), à redução do efeito da ilha térmica em meio urbano, à melhoria da qualidade do ar e da qualidade da água que é drenada para a rede pela redução de algumas substâncias químicas. Contudo esta solução usualmente apresenta um custo de investimento mais elevado e envolve uma maior manutenção.

#### 4.1.6.5- Caixilharia exterior

Na arquitectura o vidro é aplicado em caixilhos, que podem ser compostos com perfis de madeira, alumínio ou PVC, apesar de existirem outras alternativas como o ferro e o bronze. Tendo em conta o limitado isolamento térmico dos perfis de alumínio ou as limitações de durabilidade e manutenção dos perfis de madeira, foram desenvolvidos perfis compostos nos quais se conjugam materiais para tirar o máximo partido de cada um deles, como por exemplo os perfis de alumínio com corte-térmico ou os caixilhos mistos alumínio-madeira.

De entre os vários materiais adoptados nos perfis, todos eles quando devidamente concebidos permitem satisfazer aos mais elevados níveis de exigência de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência mecânica. A opção por cada um deles está normalmente relacionada com factores estéticos, económicos e de expectativa dos clientes.



O vidro inicialmente aplicado na construção era essencialmente o vidro simples. Contudo, devido ao incremento das exigências térmicas e acústicas estes actualmente são duplos (com intercalares metálicos, silicone e desidratante), podendo os vidros ser coloridos na massa, ter revestimentos de capa (baixa emissividade, reflectancia), serem temperados, termoendurecidos, laminados, etc. Usualmente quanto maior a dimensão dos envidraçados maiores são as exigências. Nas secções seguintes é compilada a informação acerca dos vidros, perfis, janelas e dispositivos de protecção solar ou de oclusão.

As caixilharias são um componente da construção relativamente pré-fabricado, pois existe uma primeira fase de fabrico dos perfis com o respectivo revestimento, uma segunda fase de transformação desses perfis e montagem do caixilho em oficina e por fim a instalação em obra com aplicação do vidro. Nesse sentido considera-se um desperdício de 10% da matéria-prima para a obtenção dos perfis. Na fase de transformação dos perfis, considera-se que existe uma perda adicional de 10%, devido a sobras no corte e defeitos detectados. Nos vidros considera-se uma perda de 10% da chapa de vidro devido ao corte do vidro para as dimensões pretendidas para as janelas e depois uma perda de 5% para simular as roturas, defeitos encontrados na fase de fabrico e montagem de janelas, bem como eventuais roturas durante a utilização dos vidros em obra.

#### 4.1.6.5.1- Vidro

O vidro constitui cerca de 70% da área das janelas (Pinto, 2002), sendo particularmente importante para o isolamento térmico e acústico das janelas e para a transmissão de luz e radiação solar para o interior.

Do ponto de vista de isolamento térmico, vale a pena ponderar soluções de vidros simples ( $U_g=5,8 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ), vidro duplo ( $U_g=2,7 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ) e vidros duplos de isolamento térmico reforçado ( $U_g=1,5 \text{ W/m}^2/\text{K}$  para emitância de 0,05). Nos vidros duplos, para melhorar o isolamento térmico, o espaço entre as chapas de vidros pode ser preenchido com gases como o Argon ou o Krypton, para os quais se obtém  $U_g=1,2 \text{ W/m}^2/\text{K}$  e  $U_g=1,1 \text{ W/m}^2/\text{K}$  no vidro de isolamento térmico reforçado (emitância de 0,05). Os valores do isolamento térmico dos vidros duplos correspondem a uma “caixa-de-ar” de 16 mm, para a qual é optimizado o isolamento térmico dos vidros duplos. Deste modo, em relação ao vidro simples existem envidraçados que permitem reduzir as trocas de calor associadas à diferença de temperatura em sensivelmente 80%.

Do ponto de vista da energia incorporada, um vidro simples de 5 mm contém cerca de  $200 \text{ MJep/m}^2$ , enquanto um vidro duplo terá sensivelmente o triplo, devido ao segundo vidro e aos materiais de selagem da caixa-de-ar. A aplicação de revestimentos baixo emissivos no vidro acresce em cerca de  $8 \text{ MJep/m}^2$  a energia incorporada no vidro duplo. De acordo com o perfil ambiental apresentado na secção 4.1.5.6 é estimado um acréscimo de  $5,2 \text{ MJep/m}^2$ .

De acordo Asif (2001), Menzies (2005) e Kiani (2001) a energia incorporada nos gases especiais para o vidro duplo é de  $0,01 \text{ MJ/m}^2$  para o Argon,  $510 \text{ MJ/m}^2$  para Krypton e  $4500 \text{ MJ/m}^2$  para Xenon. Kiani (2001) refere para o fabrico do vidro duplo energia primária de 130 a  $170 \text{ MJ/m}^2$ .

Para delimitar a câmara-de-ar dos vidros duplos com  $1 \text{ m}^2$  de vidro é estimada a utilização de  $0,240 \text{ kg}$  de alumínio,  $0,37 \text{ kg}$  de silicone e  $0,1 \text{ kg}$  de desidratante, admitindo um desperdício de 3%.

De uma forma geral o vidro simples terá um período de vida superior a 50 anos. A vida útil dos vidros duplos está condicionada essencialmente pela durabilidade da selagem da caixa-de-ar, sendo considerado frequentemente um período de vida útil de 25 a 30 anos (Kiani, 2001 e CSFVP, 2007). O período de 25 anos, corresponde de uma forma geral também ao período de reabilitação dos edifícios de serviços (Kiani, 2001). Neste trabalho considera-se um período de vida útil do vidro duplo de 30 anos (CSFVP, 2007).

No fim-de-vida os vidros incolores podem ser reciclados, enquanto os vidros transformados requerem uma actividade inicial de remoção de elementos estranhos à massa de vidro (intercalares de alumínio, silicone) para poderem ser reciclados em vidro novo, lã de vidro, etc. Os vidros com camadas de óxidos não podem ser reciclados (Berge, 2005) e na deposição em aterro devem ser tomados cuidados para prevenir o eventual escorrimento dos elementos metálicos.

No Quadro 4.20 e na Figura 4.32 apresentam-se os resultados da ACV de vidros, considerando uma taxa de reciclagem de 50% para o vidro incolor e o envio para aterro da restante quantidade. Os valores correspondentes ao vidro baixo emissivo (low-e) podem ser adoptados para os vidros reflectantes, bem como os valores do vidro incolor podem ser adoptados para os vidros coloridos na massa. No Quadro 4.20 os valores estão corrigidos para 50 anos de utilização, bem como é evidenciado que os vidros com maior eficiência (menor impacte ambiental face ao isolamento térmico proporcionado - EcoptxU) são o vidro duplo low-e com gás árgon e o vidro simples.

Quadro 4.20 - Avaliação do impacte ambiental de vidros para 50 anos

Vidro	Ug (W/m <sup>2</sup> /K)	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>	EcoptxU	Vida útil (anos)
Vidro simples (5 mm)	5,8	14,4	267	0,113	0,66	50
Vidro simples especial (5 mm)	5,8	15,4	250	0,131	0,76	50
Vidro duplo 6+16+4	2,7	65,6	1170	0,498	1,34	30
Vidro duplo 6+16+4 - argon	2,6	65,6	1170	0,498	1,29	30
Vidro duplo 6+16+4 - krypton	2,6	103	2070	0,799	2,08	30
Vidro duplo 6+16+4 - xenon	-	399	9050	3,150	-	30
Vidro duplo 6+16+4 - low-e	1,5	67,3	1150	0,529	0,79	30
Vidro duplo 6+16+4 - low-e argon	1,2	67,3	1150	0,530	0,64	30
Chapa Policarbonato 5 mm	5,1	80,0	1580	0,534	2,72	25

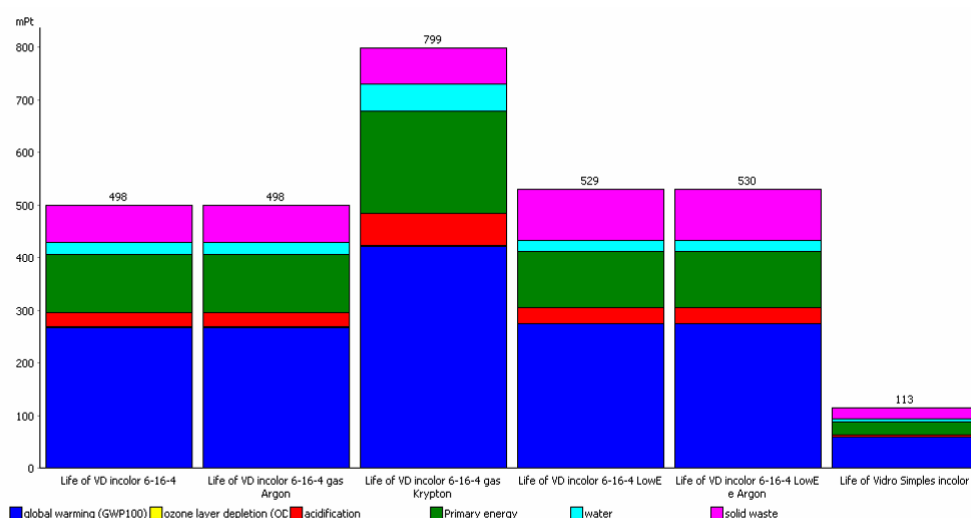


Figura 4.32 - Valores do indicador ambiental único para cada um dos tipos de vidro

Deste modo, em termos ambientais a aplicação de vidros baixo emissivos ou com Argon poderá ser justificada, enquanto a utilização de gás Krypton e Xenon conduzirão a um impacte ambiental maior, para o qual as poupanças de energia de climatização em princípio não compensam a energia incorporada.

Syrrakou (2005) avaliou o ciclo de vida dos vidros electrocrómicos<sup>1</sup> constituídos por um vidro baixo emissivo, óxido de tungsténio, PMMA, carbonato de propileno, perclorato de lítio e selante de silicone. O vidro baixo emissivo, PC e PMMA correspondem a cerca de 98% da massa total do vidro. É estimada uma energia incorporada de 306 MJ/m<sup>2</sup> de vidro electrocrómico, em que cerca de 200 MJ/m<sup>2</sup> correspondem ao vidro baixo emissivo, concluindo que este é um vidro competitivo face aos vidros duplos baixo emissivos em relação ao desempenho ambiental e económico.

#### 4.1.6.5.2 - Perfis

Como foi referido, na caixilharia exterior são usualmente utilizados perfis de alumínio, madeira, PVC ou combinações desses materiais. Existem estudos sobre o desempenho de diferentes tipos de caixilhos (Wright, 2005), sendo de uma forma geral referida a vantagem da utilização de madeira, bem como do PVC caso seja efectuada a sua reciclagem. É referido por Wright (2005) que a selecção do material tem uma influência baixa no desempenho ambiental desde que o caixilho tenha um desempenho mecânico e funcional satisfatório.

Apesar das vantagens ambientais da madeira e do isolamento térmico do PVC, na Europa do Sul existe uma extensa utilização de caixilharia de alumínio devido a um clima mais ameno (que possibilita a aplicação de caixilharia menos isolante) e nomeadamente devido a alguns problemas de durabilidade associados às primeiras janelas de PVC instaladas durante os anos 70 em Portugal e ao custo mais elevado da madeira de qualidade para caixilharia.

Na caixilharia de alumínio são utilizados por metro quadrado de janela sensivelmente 7,0 kg de alumínio, 1,0 kg de vedantes de EPDM e 0,2 kg de alumínio nas ferragens<sup>2</sup>. Para assegurar a durabilidade dos perfis de alumínio estes são comercializados com revestimento anodizado ou termolacado. O processo de anodização faz parte dos processos incluindo na base de dados Simapro. Em relação ao processo de termolacagem de acordo com (Asif, 2001), para termolacar 3,91 kg de alumínio são consumidos 26,92 MJ no forno de lacagem e 0,135 MJ associado ao pó. Foi adicionado à base de dados o processo de termolacagem.

Tendo em conta o baixo isolamento térmico dos perfis de alumínio, foram desenvolvidos os perfis de alumínio com corte térmico, em que os perfis de alumínio exterior e interior se encontram unidos por um material isolante, normalmente de poliamida. Neste caso ao impacte ambiental associado ao alumínio deve ser acrescido o impacte ambiental associado aos perfis isolantes de poliamida. Neste estudo considera-se para 1 m<sup>2</sup> de janelas de corte térmico uma massa de 9,0 kg de alumínio, 1,0 kg de vedantes de EPDM, 0,8 kg de poliamida e 0,2 kg de alumínio nas ferragens.

Em relação à caixilharia de PVC, refere-se que esta costuma estar dotada de reforços interiores de aço, para lhe ser conferida uma adequada resistência mecânica. Nesse sentido considera-se que um m<sup>2</sup> de janela de PVC é constituído por 10,6 kg de perfil

---

<sup>1</sup> Vidro cujas propriedades de transmissão e reflexão são alteradas por aplicação de um campo eléctrico aplicado no vidro.

<sup>2</sup> Valores medidos e obtido com base na pesagem e desmontagem de uma janela.

de PVC, 10,0 kg de reforço de aço e 1,2 kg de aço nas ferragens. Em alguns países (cidades) existe limitação da utilização de PVC devido à libertação de gases tóxicos em caso de incêndio.

Na caixilharia de madeira são utilizados perfis de madeira maciça, sendo em alguns casos utilizada madeira lamelada colada. Os perfis de madeira são usualmente revestidos por uma velatura ou por pintura. Dependendo da exposição da caixilharia, este revestimento deve ser reparado com uma periodicidade de sensivelmente 5 anos. Para os caixilhos de madeira considera-se uma massa de 12,5 kg/m<sup>2</sup>.

Tendo em conta as limitações de durabilidade e manutenção da caixilharia de madeira, foram desenvolvidos nos anos mais recentes caixilhos com perfis mistos alumínio-madeira, em que o perfil de madeira interior se encontra protegido do ambiente exterior por um perfil de alumínio. Para a análise do ciclo de vida, considera-se que por unidade de área do caixilho este é constituído por 9,0 kg de madeira e 3,9 kg de alumínio.

No Quadro 4.22 apresenta-se uma síntese das informações utilizadas para a ACV dos diferentes tipos de perfis. No Quadro 4.21. e na Figura 4.33 é apresentada a estimativa do impacte ambiental associado a cada perfil. Os valores reportam-se à quantidade perfil por unidade de área de janela, registando-se a mais-valia ambiental da madeira e do PVC. Caso a extrusão dos perfis seja realizada com alumínio reciclado, existe uma redução significativa do impacte ambiental associado ao fabrico de janelas de alumínio.

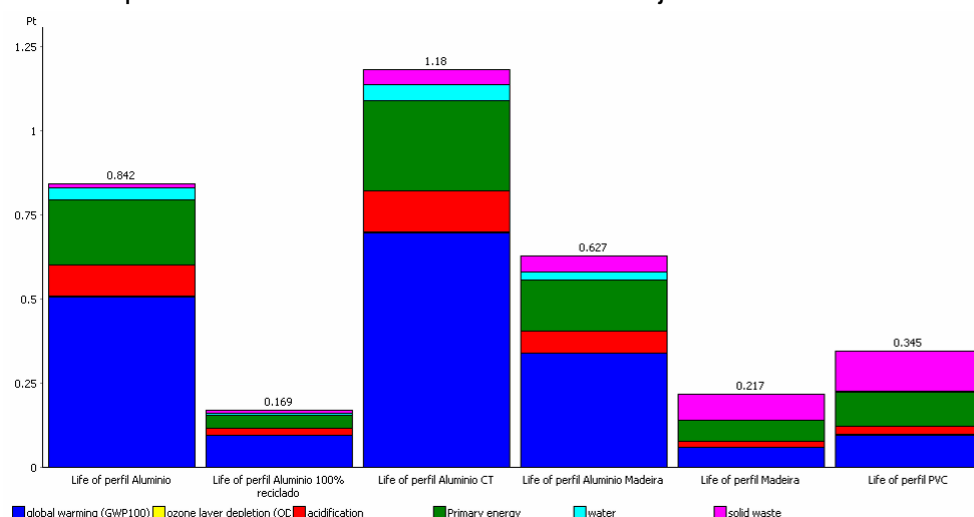
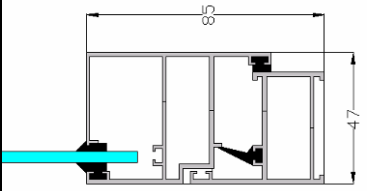
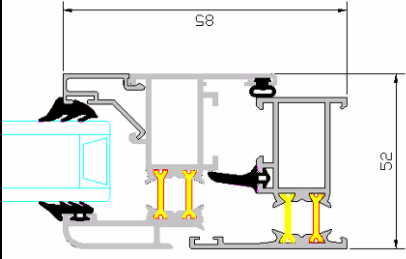
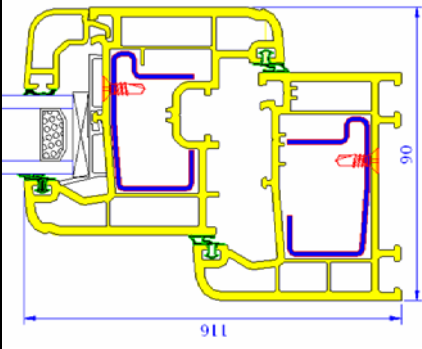
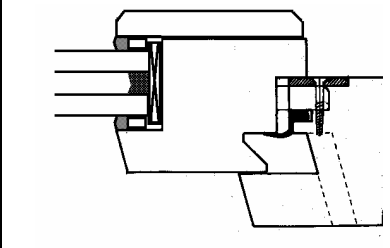



Figura 4.33 - Valores do indicador ambiental único para cada um dos tipos de perfis de janela

Quadro 4.21 - Avaliação do impacte ambiental de perfis de janelas - 50 anos

Tipo de perfil	$U_f$ (W/m <sup>2</sup> /K)	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	Ecopontos/m <sup>2</sup>
Perfil de alumínio	6,2	124,0	2080	0,842
Perfil de alumínio 100% reciclado	6,2	23,3	432	0,169
Perfil de alumínio com corte térmico	3,0	171,0	2850	1,180
Perfil de alumínio-madeira	2,0	83,2	1640	0,627
Perfil de madeira	2,0	14,8	679	0,217
Perfil de PVC com reforço de aço	2,0	23,6	1080	0,345

Quadro 4.22 - Síntese da informação dos perfis de janelas

Perfil	Alumínio	Alumínio corte-térmico	PVC reforçado	Madeira	Alumínio Madeira
					
Fonte	Abundante	-	Finita	Abundante	-
Fonte renovável	não	-	Não	sim	-
Fim-de-vida	Reciclável	-	Reciclável <sup>(1)</sup>	Reciclável	Reciclável
Durabilidade (anos)	35 a 60 50	50	25 a 30 25	35 a 60 40	50
Manutenção	Lavar	Lavar	Lavar	Lavar Pintar cada 5 anos	Lavar
Fracção envidraçada	70%	70%	65%	70%	70%
Materiais perfis	Alumínio = 7,0 kg/m <sup>2</sup> -	Alumínio = 9,0 kg/m <sup>2</sup> Poliamida = 0,8 kg/m <sup>2</sup>	PVC = 10,6 kg/m <sup>2</sup> Aço = 10,0 kg/m <sup>2</sup>	Madeira = 12,5 kg/m <sup>2</sup>	Madeira = 9,0 kg/m <sup>2</sup> Alumínio = 3,9 kg/m <sup>2</sup> Peças nylon = 0,2 kg/m <sup>2</sup>
Perfis vedação	EPDM = 1,0 kg/m <sup>2</sup>	EPDM = 1,0 kg/m <sup>2</sup>	PVC = 1,0 kg/m <sup>2</sup>	EPDM = 0,5 kg/m <sup>2</sup> Silicone = 1,0 kg/m <sup>2</sup> Aço = 0,2 kg/m <sup>2</sup>	EPDM = 1,0 kg/m <sup>2</sup> Aço = 0,2 kg/m <sup>2</sup>
Ferragens	Alumínio=0,2 kg/m <sup>2</sup>	Alumínio = 0,2 kg/m <sup>2</sup>	Aço = 0,2 kg/m <sup>2</sup>	Aço = 0,2 kg/m <sup>2</sup>	Aço = 0,2 kg/m <sup>2</sup>

(1) Reciclagem pouco competitiva em termos económicos

No processo de extrusão de alumínio incluído na base de dados Simapro é estimado um consumo de energia de 8,8 MJep/kg de alumínio, o qual é concordante com valores obtidos junto de um fabricante nacional.

Nos resultados anteriores considerou-se uma distância média de transporte de materiais de 100 km, como havia sido referido no capítulo 2. Contudo, em muitos casos existe a importação de perfis de países como a França ou a Alemanha, o que aumenta de forma substancial a carga ambiental dos perfis. Este aspecto não é tido em conta neste estudo, mas deverá ser considerado na análise de obras específicas.

Na Figura 4.34 apresenta-se o perfil normalizado do impacte ambiental de perfis de alumínio por m<sup>2</sup> de janela, tendo em conta três possibilidades:

- considerando extrusão de perfis com alumínio de 1ª fusão e que no fim-de-vida 95% do alumínio será reciclado e substituí o consumo de alumínio reciclado;
- considerando extrusão de perfis com alumínio reciclado e que no fim-de-vida 95% do alumínio será reciclado e substitui o consumo de alumínio reciclado;
- considerando extrusão de perfis com alumínio reciclado e que no fim-de-vida 95% do alumínio será reciclado e permite substituir o consumo de alumínio de 1ª fusão.

Aos três casos anteriores corresponde 0,842 ecopontos/m<sup>2</sup>, 0,169 ecopontos/m<sup>2</sup> e -0,503 ecopontos/m<sup>2</sup>.

Do terceiro caso conclui-se que o consumo de alumínio pode constituir uma melhoria do ambiente! Contudo é um resultado aceitável se for admitido que ao fim de 50 anos 95% dos perfis de alumínio serão reciclados e que nessa altura as necessidades de alumínio continuam a ser superiores ao alumínio disponível e reciclado e, portanto, permitiria substituir a produção de alumínio de 1ª fusão. Neste trabalho optou-se por admitir que no fim-de-vida se poderá obter alumínio reciclado e que este é valorizado como tal, pois na generalidade dos extrusores de perfis apenas é utilizado alumínio de 1ª fusão.

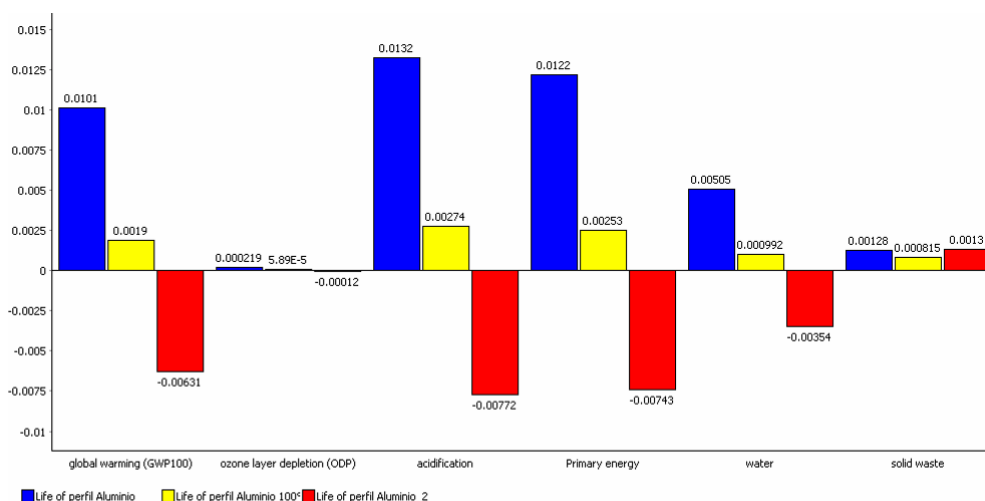


Figura 4.34 - Perfil ambiental normalizado de perfis de alumínio de uma janela de 1 m<sup>2</sup>

Para além dos perfis de janelas, o alumínio é utilizado na concepção de fachadas-cortina. Os perfis de fachada distinguem-se dos perfis de janela pela sua maior dimensão e espessura das paredes. Com base nos perfis adoptados no estudo de Pinto (2002) são estimadas as quantidades indicadas no Quadro 4.23. No Quadro 4.24 e na Figura 4.35

apresentam-se os resultados da ACV dos perfis de fachada. No caso da fachada VEC foi considerada a substituição dos quadros de fixação dos vidros ao fim de 25 anos. Dos resultados obtidos é evidenciada a necessidade de uma selecção de fachadas com a menor quantidade de material possível. Apesar da fachada VEB II necessitar menor quantidade de alumínio, por razões estéticas normalmente são seleccionadas as fachadas VEB I ou VEC, pois correspondem a soluções em que é minimizada a vista exterior dos perfis de alumínio. Destes resultados também é evidenciada a adequação da utilização de alumínio reciclado, desde que seja garantida a qualidade dos perfis fabricados, pois o impacte ambiental é cerca de 4 vezes inferior aos dos perfis obtidos a partir de biletos de 1ª fusão.

Quadro 4.23 - Síntese da informação relacionada com as fachadas-cortina

Componente da fachada	VEB I	VEB II	VEC
Material da fachada			
Perfis de alumínio	7,55 kg/m <sup>2</sup>	3,61 kg/m <sup>2</sup>	7,54 kg/m <sup>2</sup>
Perfil EPDM	0,69 kg/m <sup>2</sup>	0,51 kg/m <sup>2</sup>	0,33 kg/m <sup>2</sup>
Silicone	-	-	0,15 kg/m <sup>2</sup>
Aço (kg)	0,78 kg/m <sup>2</sup>	0,71 kg/m <sup>2</sup>	0,78 kg/m <sup>2</sup>
U <sub>f</sub> (Pinto, 2002)	11 W/m <sup>2</sup> /K	5,0 W/m <sup>2</sup> /K	7,7 W/m <sup>2</sup> /K
Vida útil	50 anos	50 anos	25 anos

\* dos quadros VEC, para a estrutura resistente é considerado período de 50 anos

Quadro 4.24 - Avaliação do impacte ambiental de perfis de fachada-cortina - 50 anos

Tipo de perfil	U <sub>f</sub> (W/m <sup>2</sup> /K)	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	Ecopontos/m <sup>2</sup>
Fachada VEB I	11,0	131	2180	0,892
Fachada VEB II	5,0	66	1110	0,452
Fachada VEB II - perfis obtidos de alumínio reciclado	5,0	15	275	0,113
Fachada VEC	7,7	194	3200	1,320

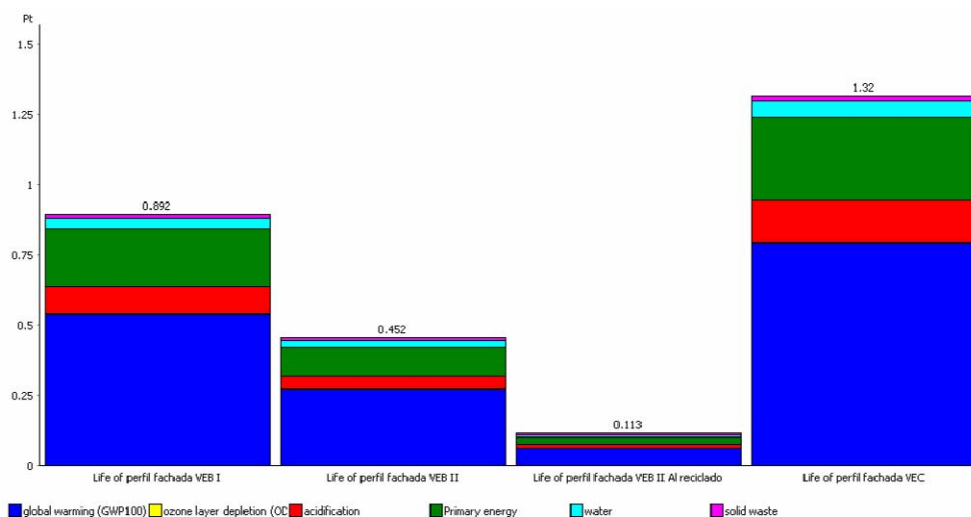


Figura 4.35 - Valores do indicador ambiental para cada um dos tipos de perfis de fachada-cortina

#### 4.1.6.5.3 - Janelas e fachadas-cortina

Com base na informação determinada nas secções anteriores é possível estimar o impacte ambiental associado às janelas e fachadas cortina. Em relação à informação determinada para a ACV considera-se a lavagem da caixilharia uma vez por mês, de acordo com o referido no Quadro 4.5.

##### 4.1.6.5.3.1- Janelas

Na ACV das janelas considera-se ainda o consumo de 0,02 kg de aço inox correspondente aos parafusos de fixação do caixilho ao vão e o consumo de 0,25 kg de silicone para selagem da junta aro vão. Os resultados referentes a algumas janelas são apresentados no Quadro 4.25 e na Figura 4.37.

Quadro 4.25 - Avaliação do impacte ambiental de janelas para 50 anos

Janela	U (W/m <sup>2</sup> /K)	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	Ecopontos/m <sup>2</sup>	EcoptxU
<b>Perfil madeira</b>					
Vidro simples (5 mm)	4,7	22,3	739	0,266	1,25
Vidro duplo 6+16+4	2,6	58,1	1370	0,535	1,39
Vidro duplo 6+16+4 - low-e	1,8	59,3	1350	0,557	1,00
<b>Perfil alumínio corte-térmico</b>					
Vidro duplo 6+16+4	3,0	217,0	3690	1,540	4,62
Vidro duplo 6+16+4 - low-e	2,1	218,0	3670	1,570	3,30
<b>Perfil alumínio</b>					
Vidro simples (5 mm)	6,2	135,0	2290	0,942	5,84
Vidro duplo 6+16+4	3,8	170,0	2910	1,200	4,56
Vidro duplo 6+16+4 - low-e	3,0	172,0	2890	1,230	3,69
Vidro duplo 6+16+4 - al reciclado	3,8	69,6	1270	0,532	2,02
<b>Perfil alumínio-madeira</b>					
Vidro duplo 6+16+4	2,6	129,0	2470	0,989	2,57
<b>Perfil PVC</b>					
Vidro duplo 6+16+4	2,6	127,0	2360	1,000	2,60



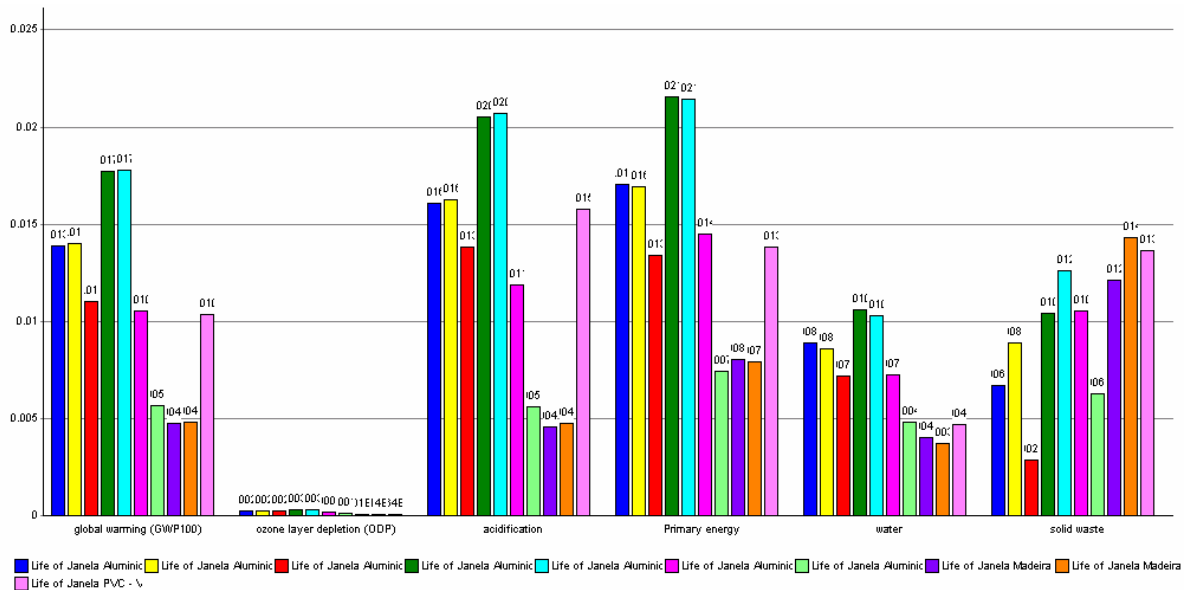


Figura 4.36 - Perfil ambiental normalizado de 1 m<sup>2</sup> de janela

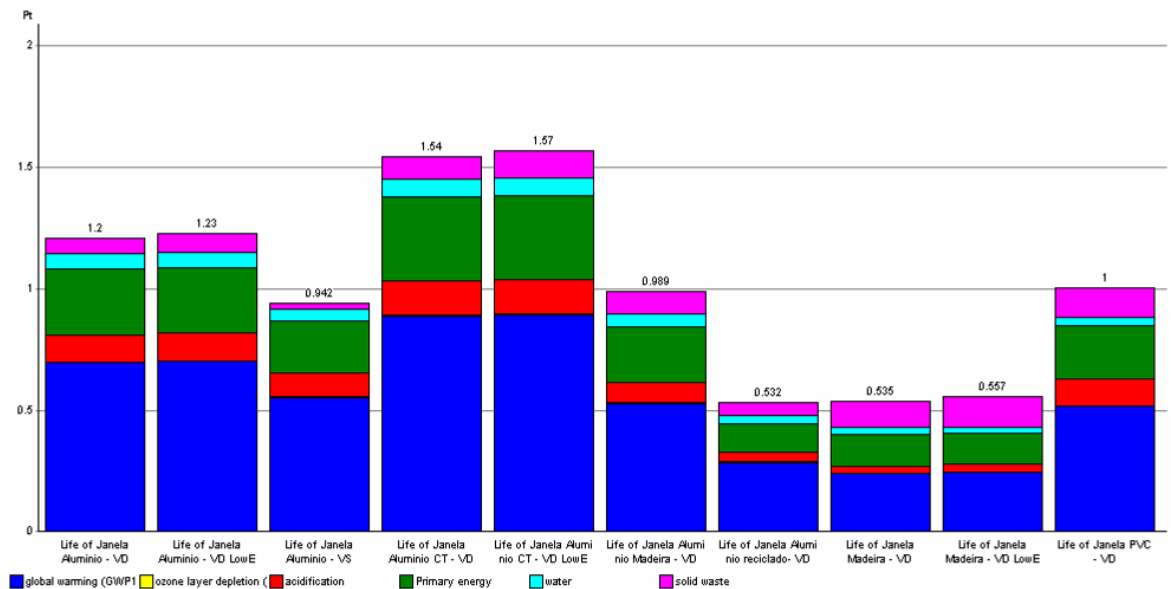


Figura 4.37 - Valores do indicador ambiental único para cada um dos tipos de janela

De uma forma geral regista-se a importância de todas as categorias de impacto ambiental com excepção da diminuição da camada de ozono (Figura 4.36). O impacto ambiental da utilização de vidros duplo baixo emissivos é relativamente pequeno face aos vidros duplos correntes, pelo que deve ser uma alternativa a ponderar. Desta análise comparativa regista-se a vantagem da utilização dos perfis de madeira (solução que apresenta menores valores de Ecopt×U). Caso fossem utilizados billetes de alumínio 100% reciclado o impacto ambiental das janelas de alumínio seria equivalente ao de uma janela de madeira, Figura 4.37.

#### 4.1.6.5.3.2 - Fachadas-cortina

As fachadas-cortina podem ter várias soluções, neste âmbito considera-se uma solução correspondente a uma fachada totalmente envidraçada e a uma fachada com 50% de área envidraçada e 50% de área preenchida com painéis sanduíche opacos constituídos por vidro simples, 60 mm de XPS e revestimento interior com painel de alumínio. As fachadas-cortina apresentam uma fracção envidraçada de sensivelmente 85%. No Quadro 4.26 e na Figura 4.38 apresentam-se os resultados obtidos para a ACV de diferentes tipos de fachada-cortina admitindo a aplicação de vidro duplo baixo emissivo.

Quadro 4.26 - Avaliação do impacte ambiental de fachada-cortina para 50 anos

Vidro	U (W/m <sup>2</sup> /K)	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	Ecopontos/m <sup>2</sup>	EcoptxU
<b>Fachada VEB I</b>					
100% de vidro	3,1	189	3150	1,350	4,19
50% vidro, 50% painel sanduíche	2,8	175	2970	1,250	3,50
<b>Fachada VEB II</b>					
100% de vidro	2,0	123	2080	0,912	1,82
50% vidro, 50% painel sanduíche	1,7	109	1890	0,806	1,37
<b>Fachada VEB II - Alu. reciclado</b>					
100% de vidro	2,0	72,3	1250	0,573	1,15
50% vidro, 50% painel sanduíche	1,7	58,5	1060	0,466	0,79
<b>Fachada VEC</b>					
100% de vidro	2,8	251	4170	1,780	4,98
50% vidro, 50% painel sanduíche	2,5	237	3980	1,670	4,18

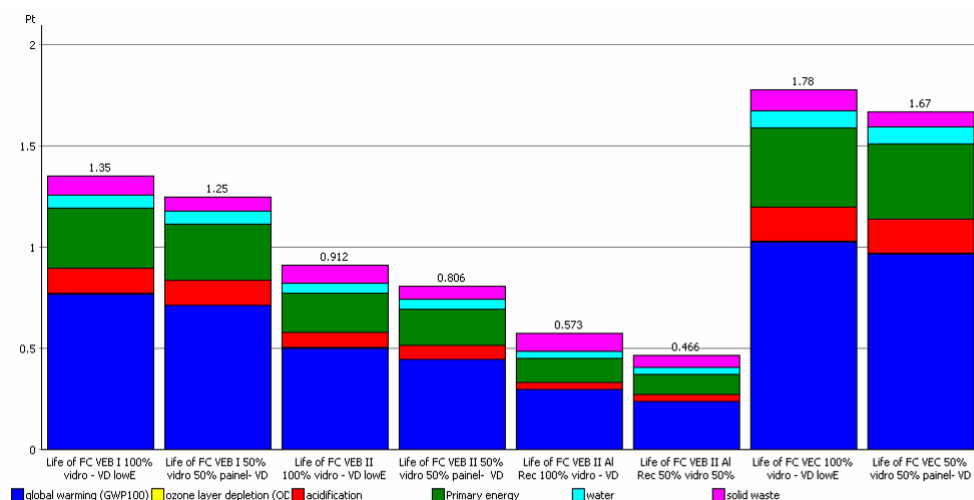


Figura 4.38 - Valores do indicador ambiental único para cada um dos tipos de fachada-cortina com vidro duplo baixo emissivo

Dos resultados obtidos, cerca de 50% da carga ambiental está associada aos perfis e 50% aos elementos de preenchimento. Com estes resultados confirma-se a vantagem da fachada VEB II (menor massa de alumínio/m<sup>2</sup> de fachada) e a vantagem da utilização de alumínio reciclado na extrusão dos perfis, a qual permitiria reduzir o impacte ambiental dos sistemas de fachada para sensivelmente metade, conduzindo a valores inferiores aos de paredes tradicionais de alvenaria de tijolo (Quadro 4.14).

Na Figura 4.39 apresentam-se os resultados da ACV de uma fachada (3m×2,7m), admitindo a aplicação de uma fachada-cortina (alumínio de 1ª fusão) e de uma fachada tradicional com uma janela de 3,6 m<sup>2</sup> (20% da área de pavimento). Dos resultados obtidos

regista-se a vantagem da utilização de soluções tradicionais com caixilharia de madeira, que apresentam sensivelmente metade do impacte ambiental de soluções de fachada-cortina. No Quadro 4.27 a informação da ACV das diferentes soluções de fachada é complementada com a energia primária de aquecimento necessária para compensar as perdas térmicas por condução ao longo de 50 anos, assumindo o padrão de utilização do aquecimento de 10% referido no RCCTE (2006)<sup>1</sup>. Mais uma vez regista-se a enorme adequação da utilização de soluções tradicionais, pois apresentam menor impacte ambiental associado aos materiais, bem como, carecem de menores recursos energéticos para aquecimento. Esses resultados também evidenciam que a energia incorporada nos elementos da envolvente pode ser equiparada (e neste caso superior) às necessidades energéticas de aquecimento.

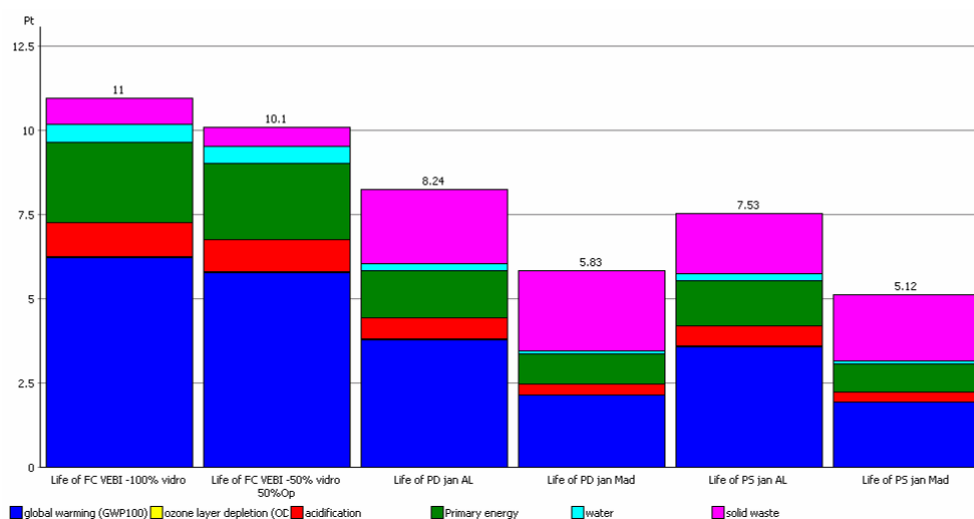


Figura 4.39 - Valores do indicador ambiental para uma fachada de 3 m x 2,7 m com fachada-cortina e fachada tradicional com vidro duplo baixo emissivo

Quadro 4.27 - Avaliação do impacte ambiental de fachada-cortina e aquecimento 50 anos

Vidro	U (W/m <sup>2</sup> /K)	kgCO <sub>2</sub>	GJep	Ecopt	EcoptxU	GJep 10%Aq 50 anos*
<b>Fachada VEB I</b>						
100% de vidro	3,10	1530	25,5	11,0	34,1	10,6
50% vidro, 50 painel sanduíche	2,80	1420	24,0	10,1	28,3	9,5
<b>Parede dupla 60 mm XPS</b>						
Janela Alumínio	1,55	928	15,0	8,2	12,8	5,3
janela Madeira	1,02	524	9,49	5,8	5,9	3,5
<b>Parede simples 60 mm XPS</b>						
Janela Alumínio	1,57	877	14,3	7,5	11,8	5,3
janela Madeira	1,03	473	8,75	5,1	5,3	3,5

\* Necessidades de aquecimento calculadas para 1190 GD de aquecimento na base 20°C, considerando que o padrão de aquecimento é de apenas 10% das perdas térmicas como referido no RCCTE e que o aquecimento é realizado com uma bomba de calor com COP de 3.

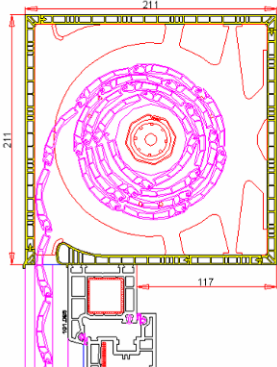
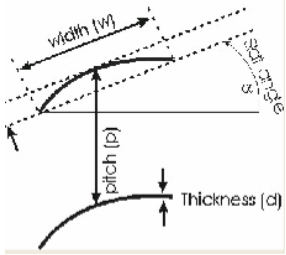
#### 4.1.6.5.4 - Dispositivos de oclusão e protecção solar

Para oclusão dos vãos e para protecção solar são utilizadas diversas soluções (Stack, 2000), nomeadamente persianas com régua de PVC ou régua de alumínio e portadas. Nos edifícios de serviços é usual a utilização de estores veneziano ou telas de sombreamento. No Quadro 4.28 apresentam-se a informação dos dispositivos de oclusão

<sup>1</sup> Nesta análise não se considera os eventuais ganhos solares pelos envidraçados.

estudados e no Quadro 4.29 e na Figura 4.40 encontram-se os resultados obtidos. Neste caso, considerou-se a utilização de alumínio 50% reciclado.

Quadro 4.28 - Dispositivos de oclusão e protecção solar estudados

Perfil	Persiana Réguas de PVC	Persiana Réguas Alumínio	Veneziano Lâminas PVC	Veneziano Lâminas Alum.
				
Fim-de-vida	Reciclável	Reciclável	Reciclável	Reciclável
Durabilidade (anos)	30	50	15	15
Manutenção	Lavar 4x/ano	Lavar 4x/ano	Limpar 12x/ano	Limpar 12x/ano
<b>Material</b>				
PVC	7,2 kg/m <sup>2</sup>	3,6 kg/m <sup>2</sup>	1,7 kg/m <sup>2</sup>	
Alumínio	0,5 kg/m <sup>2</sup>	7,7 kg/m <sup>2</sup>		0,9 kg/m <sup>2</sup>
Aço	2,1 kg/m <sup>2</sup>	2,1 kg/m <sup>2</sup>	0,6 kg/m <sup>2</sup>	0,6 kg/m <sup>2</sup>
Poliuretano		0,2 kg/m <sup>2</sup>		

Quadro 4.29 - Avaliação do impacte ambiental de dispositivos de oclusão e protecção solar para 50 anos

Dispositivo de oclusão	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>
<b>Persiana</b>			
Réguas PVC	45,0	920	0,346
Réguas alumínio	93,7	1620	0,665
<b>Veneziano</b>			
Lâminas PVC	26,5	545	0,202
Lâminas alumínio	49,2	881	0,374

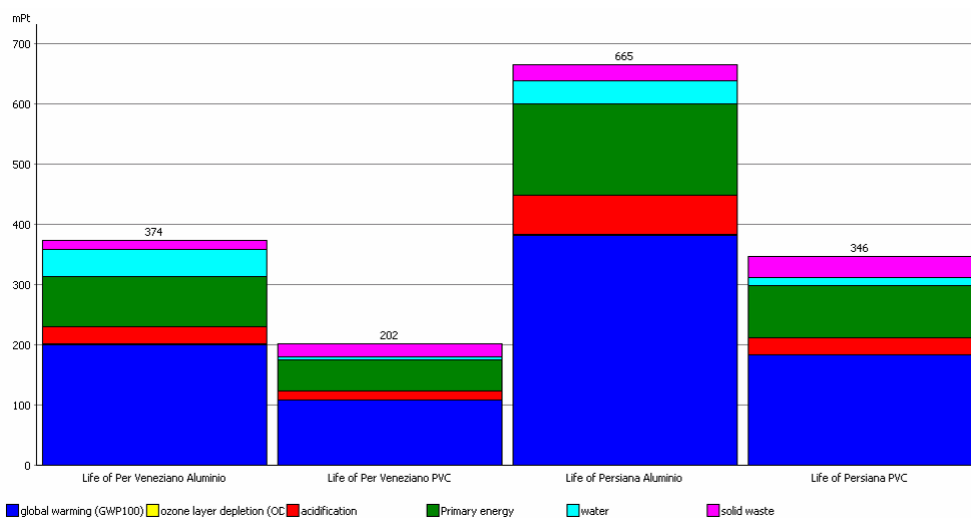


Figura 4.40 - Valores do indicador ambiental para 1m<sup>2</sup> de dispositivos de oclusão e protecção solar

#### 4.1.6.5.5 - Fachadas dupla pele envidraçadas

Nos anos mais recentes têm sido construídos edifícios com fachadas envidraçadas duplas (fachadas dupla pele). Estas fachadas foram desenvolvidas inicialmente nos países nórdicos, no sentido de limitar as perdas térmicas através dos envidraçados, captar a luz natural e permitir assegurar a transparência da fachada.

Estas fachadas podem ter várias composições e modos de funcionamento conforme é referido na secção 4.2.4. Nesta secção é analisado o impacte ambiental associado à construção, manutenção e fim-de-vida de uma fachada dupla-pele do tipo *box window* (o tipo de fachada mais vulgar). A fachada é constituída por um vidro simples de 10 mm pelo lado exterior fixo através de um sistema do tipo VEC. Do lado interior é adoptado um vidro duplo (8-15-6) fixo num caixilho de alumínio com corte-térmico. Na pele exterior encontram-se aplicadas grelhas. Na caixa-de-ar da fachada encontra-se aplicado um estore veneziano com lâminas de alumínio. Os materiais envolvidos na concepção da fachada (Figura 4.41) estão indicados no Quadro 4.30. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 4.27 e na Figura 4.42.

Quadro 4.30 - Inventário dos materiais utilizados numa fachada dupla pele do tipo *box-window*

Material	Kg/Modulo de 2,7m×3,7m	Kg/m <sup>2</sup>	Importância relativa
Alumínio	96,7	9,68	10,2%
EPDM	13,5	1,35	1,4%
Poliamida	5,6	0,56	0,6%
Vidro	728,8	72,95	77,1%
Silicone	7,2	0,72	0,8%
Aço	66,7	6,68	7,1%
Poliestireno	2,3	0,23	0,2%
Gesso cartonado	24,1	2,41	2,6%
Zamak	0,1	0,01	0,0%
<b>TOTAL</b>	<b>945,0</b>	<b>94,6</b>	<b>100%</b>

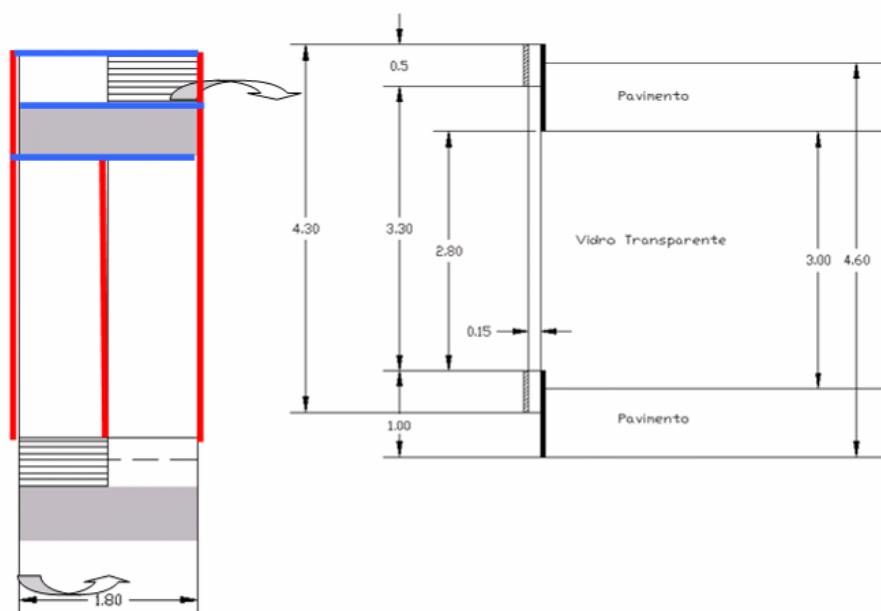


Figura 4.41 - Representação esquemática de um modulo da fachada dupla pele

Quadro 4.31 - Avaliação do impacte ambiental de fachada dupla para 50 anos

Vidro	U (W/m <sup>2</sup> /K)	kgCO <sub>2</sub>	GJep	Ecopt	EcoptxU	GJep 10%Aq 50 anos*
<b>Fachada dupla pele</b>						
Alumínio 0% reciclado	1,55	2140	36,8	15,5	19,7	5,3
Alumínio 100% reciclado	1,55	1140	20,5	8,8	10,3	5,3
<b>Fachada VEB I</b>						
100% de vidro	3,10	1530	25,5	11,0	30,4	10,6
50% vidro, 50 painel sanduíche	2,80	1420	24,0	10,1	25,2	9,5
<b>Parede dupla 60 mm XPS</b>						
Janela Alumínio	1,55	928	15,0	8,2	11,4	5,3
Janela Madeira	1,02	524	9,5	5,8	5,2	3,5
<b>Parede simples 60 mm XPS</b>						
Janela Alumínio	1,57	877	14,3	7,5	10,5	5,3
Janela Madeira	1,03	473	8,8	5,1	4,7	3,5

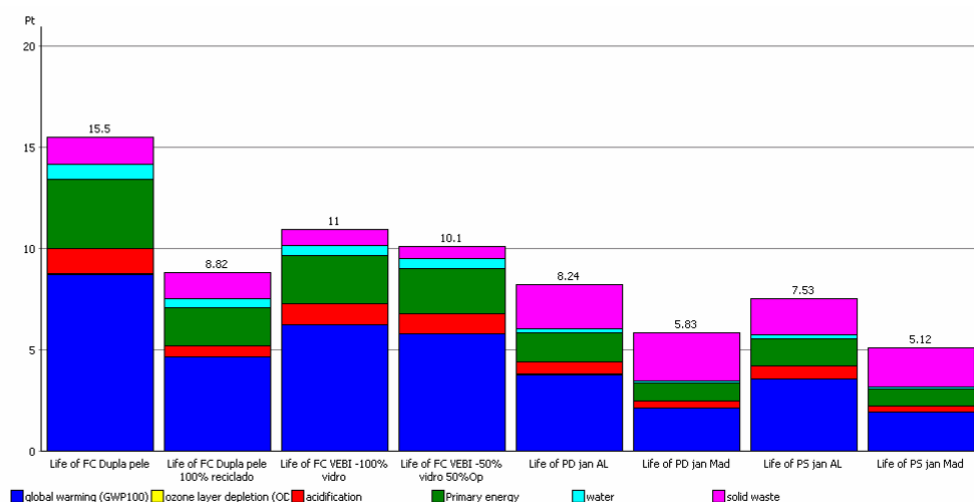


Figura 4.42 - Valores do indicador ambiental para uma fachada de 3 m x 2,7 m com fachada dupla pele, fachada-cortina e fachada tradicional com vidro duplo baixo emissivo

Dos resultados obtidos regista-se que a solução de fachada dupla pele por incorporar uma maior quantidade de materiais com uma carga ambiental importante apresenta um maior impacte ambiental que as restantes soluções de fachada estudadas anteriormente. Deste modo esta é uma solução cuja aplicação deve ser objecto de análise detalhada e ponderada.

#### 4.1.6.6 - Caixilharia interior

A caixilharia interior inclui as portas interiores, que neste trabalho se consideram fabricadas em contraplacado, com estrutura interna em favo de abelha. Para as adulas considera-se que estas são fabricadas em MDF. Em ambos os casos considera-se que é aplicado um revestimento folheado. Deste modo, para uma porta interior de 0,75 m x 2,0 m, consideram-se 10 kg de contraplacado, 6,3 kg de MDF e 1 kg de aço para as ferragens. Com estes pressupostos é estimada a emissão de 13,2 kgCO<sub>2</sub>/porta, 1 GJep/porta e 0,201 ecopontos/porta.

#### 4.1.6.7 - Instalações

##### 4.1.6.7.1- Ventilação de habitações

A ventilação dos edifícios de habitação pode ser natural, mecânica, por sistemas mistos ou sistemas híbridos (NP 1037-1, 2002 e Pinto, 2006a). Os sistemas de ventilação destinam-se a assegurar a QAI pela renovação do ar interior, bem como para a evacuação dos produtos da combustão de aparelhos a gás e do ar das instalações sanitárias.

Para a admissão de ar novo são utilizadas grelhas aplicadas nas fachadas que normalmente são de material plástico. Para a evacuação do ar, nos sistemas com ventilação natural são usualmente adoptadas condutas de betão leve na cozinha e de tubos de aço ou PVC nas instalações sanitárias. Para ligar os aparelhos a gás de produção de AQS são utilizadas condutas flexíveis de alumínio. No topo das condutas de ventilação natural são aplicados ventiladores estáticos que, normalmente, também são de betão leve. Nos sistemas de ventilação mecânica, para a evacuação do ar são utilizadas usualmente condutas de chapa de aço galvanizado, sendo aplicadas bocas de extracção de plástico nos compartimentos de serviço (cozinhas e casas de banho), sendo adoptado um ventilador único na cobertura. Nos sistemas mistos são usualmente adoptadas condutas individuais de chapa de aço galvanizado.

Para obter uma estimativa dos materiais envolvidos, estuda-se um edifício multifamiliar de quatro pisos, dois apartamentos por piso, Figura 4.43. Os caudais de ventilação foram determinados de acordo com o capítulo 3.

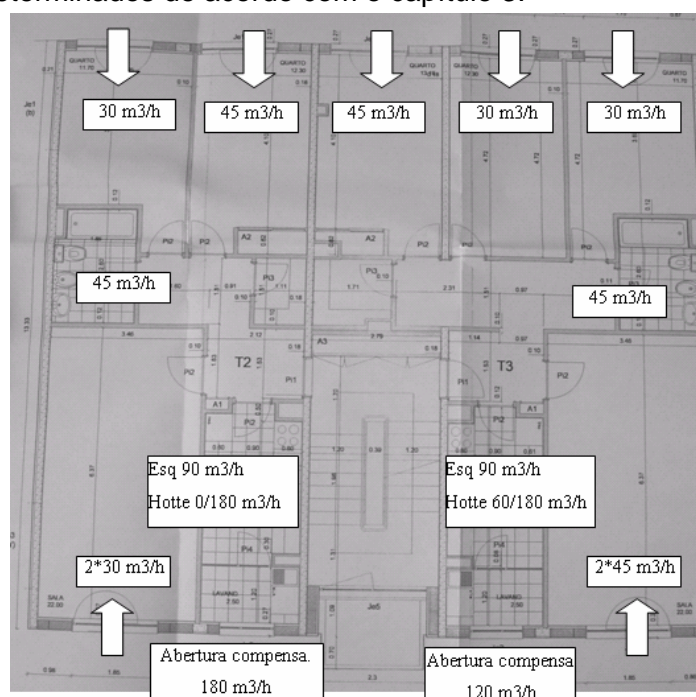


Figura 4.43 - Planta do piso típico do edifício multifamiliar

Quadro 4.32 - Caudais de ventilação ( $m^3/h$ )

Fogo	Sala	Quarto 1	Quarto 2	Quarto 3	Inst. Sanit	Cozinha $Q_{base}$	Cozinha $Q_{máximo}$	Máximo	Base	Base (rph)
T2	60	45	30		45	90	270	315	135	0,81
T3	90	45	30	30	45	150	270	315	195	0,93
TOTAL								2520	1320	

#### 4.1.6.7.1.1 - Ventilação natural de acordo com a NP 1037-1

Para um sistema de ventilação natural de acordo com a NP 1037-1, com condutas colectivas nas cozinhas e condutas individuais nas instalações sanitárias, as dimensões das condutas são as seguintes, Quadro 4.33:

- Condutas individuais das instalações sanitárias:  $\varnothing$  110 mm;
- Condutas colectivas das cozinhas: 770 cm<sup>2</sup>, 25 cm x 31 cm;
- Ramal do fogão: 150 cm<sup>2</sup>, 8 cm x 18 cm;
- Ramal do esquentador: 250 cm<sup>2</sup>, 14 cm x 18 cm.

Com base nesta informação no ciclo de vida do sistema de ventilação natural é estimado o consumo de materiais indicados no Quadro 4.34. Na determinação das massas encontra-se previsto um desperdício de 10% e a substituição das grelhas de admissão de ar ao fim de 10 anos.

Quadro 4.33 - Condutas do sistema de ventilação natural

Ventilação	Conduta colectiva cozinha	Conduta Instalações sanitárias
Natural		

Quadro 4.34 - Matérias envolvidos no CV da instalação de ventilação natural

Material	kg
PVC	39,6
Betão leve	666,1
Argamassa	70,1
Aço galvanizado	99,6

#### 4.1.6.7.1.2 - Ventilação mecânica centralizada

Se for adoptado um sistema de ventilação mecânica centralizado e este estiver dimensionado de acordo com as regras aplicáveis (Pinto, 2006a), seria necessário as condutas com as dimensões indicadas no Quadro 4.35 e na Figura 4.44. Para este sistema é preconizada uma caixa de ventilação com um motor de 750 W, tendo uma massa total de 60 kg (caixa de ventilação de 805 mm x 543 mm x 362 mm). No Quadro 4.36 encontra-se uma estimativa dos materiais envolvidos no sistema VMC, incluindo um desperdício de 10% e quatro substituições das grelhas e dos motores ao longo dos 50 anos.



Quadro 4.35 - Dimensão dos ramais e condutas colectoras verticais

	Fogão	Esquentador	IS
Ø Ramal ligação (mm)	Ø160	Ø125	Ø125
Ø Conduto colectora vertical (mm)	Ø355	Ø355	Ø160

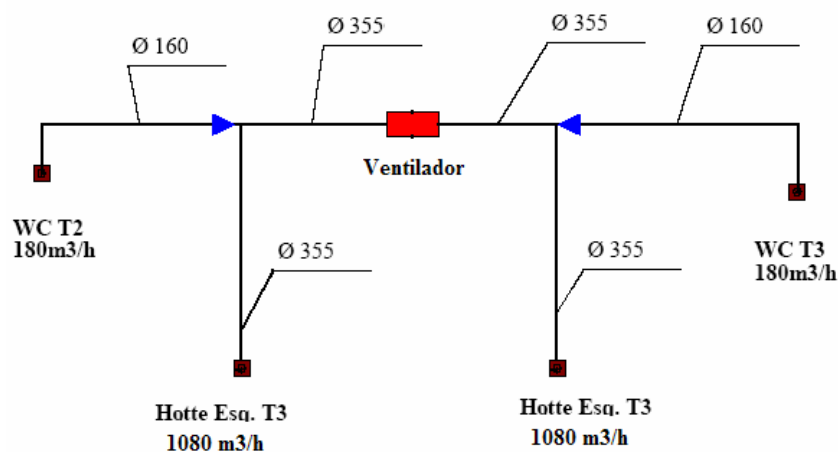


Figura 4.44 - Representação esquemática da rede de condutas horizontal

Quadro 4.36 - Matérias envolvidos no CV da instalação VMC

Material	kg
PVC	52,8
Aço galvanizado	224,3
Lã mineral	4,1
Cobre	5,0

#### 4.1.6.7.1.3 - Ventilação mista

Para a realização da ventilação mista com base em exaustores de cozinha e ventax nas instalações sanitárias é se conduzido a condutas de Ø125 mm para exaustão do fogão (ventilador de 70 W), Ø125 mm para exaustão do aparelho de produção de AQS (esquentador) e Ø80 mm (ventilador de 25 W) para exaustão do ar nas instalações sanitárias. No Quadro 4.37 encontra-se uma estimativa dos materiais envolvido no ciclo de vida da instalação, onde se assumiu a substituição das grelhas, ventax e exaustores ao fim de 10 anos.

Quadro 4.37 - Inventários dos materiais envolvidos nos sistemas de ventilação

Material	kg
PVC	52,5
Aço galvanizado	456,5
Cobre	22,1
Betão leve	214,5
Argamassa	16,8

#### 4.1.6.7.1.4 - Análise do ciclo de vida

Apesar do inventário dos diferentes tipos de sistemas não ter sido muito detalhado, os valores dos elementos principais são relativamente próximos dos determinados por Nyman (2005) no estudo de sistemas de ventilação mecânica, quando adimensionalizados ao caudal de ar.

Com base na informação compilada para cada um dos sistemas de ventilação foi efectuada a análise do ciclo de vida com base nos pressupostos definidos no capítulo 2, encontrando-se os resultados obtidos no Quadro 4.38 e na Figura 4.45.

Quadro 4.38 - Avaliação do impacte ambiental de sistemas de ventilação de edifícios de habitação multifamiliar

Sistema de ventilação	kgCO <sub>2</sub>	GJep	Ecopt
Ventilação natural	1420	23,5	10,8
Ventilação mecânica centralizada	3710	67,7	38,3
Ventilação mista	4450	80,3	41,1

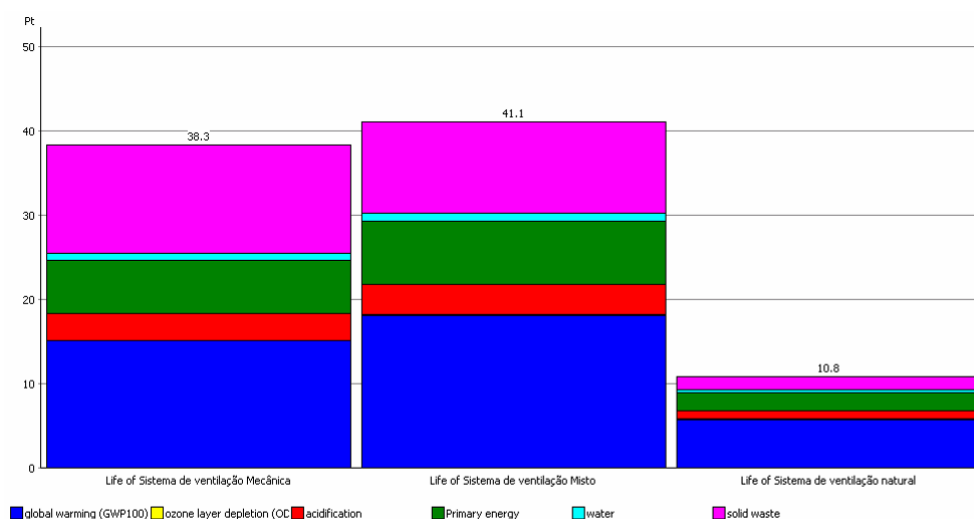


Figura 4.45 - Valores do indicador ambiental único para os diferentes tipos de sistemas de ventilação

Dos resultados obtidos regista-se um maior impacte ambiental nos edifícios com sistemas de ventilação mecânica face ao edifício com sistema de ventilação natural (cerca de 3 a 4 vezes), pelo facto de integrarem materiais com maior carga ambiental. Nos sistemas de ventilação mecânica a quantidade de resíduos encontra-se essencialmente relacionada com a utilização de cobre, pois por cada 1 kg de cobre são gerados cerca de 135 kg de resíduos!

No caso de serem adoptados sistemas de ventilação com recuperação de calor, salienta-se que seria expectável obter sensivelmente o dobro do impacte ambiental associado ao sistema VMC.

A ACV dos sistemas de ventilação incluindo o consumo de energia dos ventiladores e o seu efeito nas perdas térmicas é avaliado na secção 4.3.4.

#### 4.1.6.7.2 - Sistemas de climatização

Os sistemas de climatização enquadram diversas soluções, consoante o tipo de edifício e ocupações. Neste trabalho pretende-se obter uma avaliação da importância do

impacte ambiental dos sistemas de climatização na fase de construção e na fase de utilização do edifício. Em relação à fase de construção, é efectuada a estimativa dos materiais consumidos nos sistemas de climatização, com base em catálogos de fabricantes e estudos de sistemas AVAC.

#### 4.1.6.7.2.1 - Edifícios de serviços

No que diz respeito aos edifícios de serviços, Soares (1999) efectuou a ACV de edifícios com sistemas de climatização baseados em:

- Tectos arrefecidos;
- Ventiló-convectores;
- *Displacement ventilation*;
- Sistema VAV (volume de ar variável);
- Sistema VRV (volume de refrigerante variável);
- Bombas de calor.

Na análise efectuada por Soares (1999) não se encontrava incluído o sistema de produção térmica, sendo contudo possível obter uma estimativa dos materiais envolvidos nas condutas, bombas, tubagens e unidades terminais, Quadro 4.39. Na Figura 4.46 apresenta-se o indicador ambiental único associado aos diferentes tipos de sistemas, os quais apresentam energia primária de 215 a 530 MJep/kW, emissões de CO<sub>2</sub> de 14 a 32 kgCO<sub>2</sub>/kW e um valor médio de 0,2 ecopontos/kW. A solução de tectos arrefecidos apresenta um desempenho mais desfavorável, devido à maior utilização de cobre face às restantes soluções (1,05 kg, face a 0,2 kg).

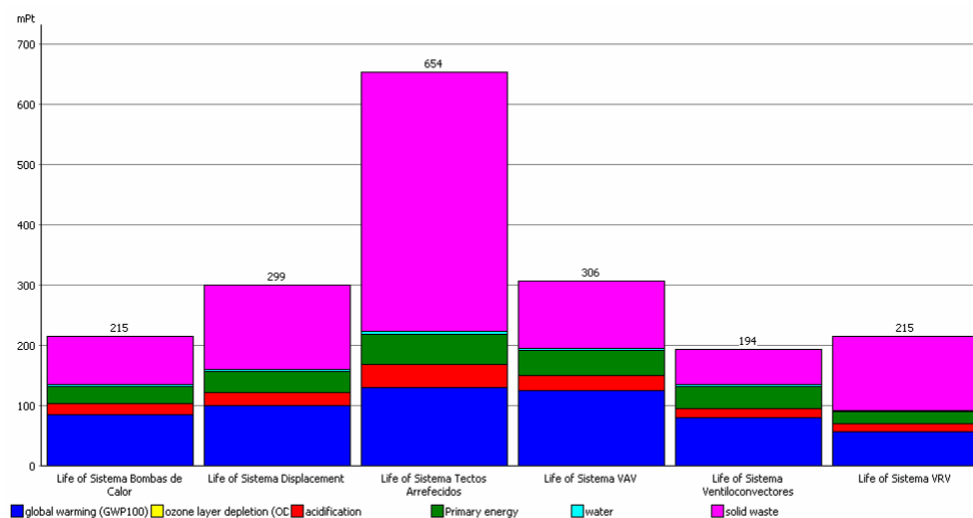


Figura 4.46 - Valores do indicador ambiental único para os diferentes tipos de sistemas de climatização (excluindo central térmica) por kW de potência térmica instalada

Quadro 4.39 - Inventário de materiais de sistemas AVAC por kW de potência térmica para vida útil de 20 anos- distribuição térmica

Kg/kW térmico	Aço	Zn	Al	Cu	Pb	Aço inox	Borracha sintética	Espuma borracha	lã mineral	PPR	PVC
VAV	8,290	0,154	0,669	0,195	0,000	0,288	0,010	0,144	0,144	0,000	0,082
VRV	3,385	0,035	0,340	0,285	0,000	0,085	0,000	0,060	0,020	0,000	0,030
Ventilo convectores	4,358	0,057	0,431	0,096	0,000	0,057	0,000	1,963	0,048	0,000	0,019
Displacement	5,077	0,113	0,854	0,302	0,000	0,113	0,000	0,063	0,050	0,000	0,038
Tectos arrefecidos	4,254	0,098	1,282	1,053	0,000	0,057	0,022	0,375	0,598	0,012	0,038
Bombas de calor	6,072	0,322	0,504	0,139	0,011	0,139	0,043	0,075	0,043	0,000	0,032

Para obter uma estimativa do impacte ambiental associado aos sistemas de produção térmica e das UTA (unidades de tratamento de ar) são utilizados valores baseados na informação de catálogos de fabricantes. Tendo em conta que os valores dos catálogos dos fabricantes apresentam apenas a massa total, efectuou-se uma desagregação por materiais tendo por base o estudo de uma UTA e de um *chiller* realizado por Heikkila (2004), Figura 4.47. Na Figura 4.47, também se apresentam os valores determinados com base no trabalho de Soares (1999), verificando-se uma grande importância do aço, cobre e alumínio nos sistemas AVAC. No Quadro 4.40 apresentam-se as massas consideradas neste estudo para um *chiller*, uma bomba de calor, uma caldeira e uma UTA.

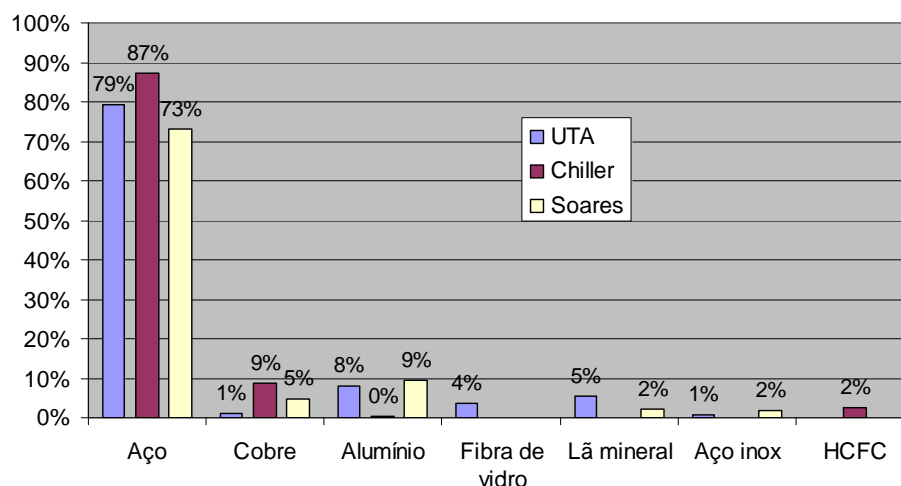


Figura 4.47 - Valores relativos da massa de uma UTA e de um chiller

Quadro 4.40 - Inventário de materiais de sistemas AVAC por kW de potência térmica para vida útil de 20 anos - Produção térmica

Kg/kW térmico	Total	Aço	Al	Cu	Aço inox	Borracha	Lã mineral	PPR	HCFC	PVC
Bomba de calor/Chiller	12	10,320	0,033	1,020	0,000	0,055	0,000	0,000	0,456	0,120
Caldeira gás-cobre	1.5	1,365	0,000	0,090	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,030
Caldeira gás-ferro fundido	3.7	3,478	0,000	0,148	0,037	0,000	0,000	0,000	0,000	0,037
UTA aq+arr	15	11,899	1,213	0,187	0,105	0,045	0,823	0,135	0,000	0,600
UTA aq+arr+rec calor	22	17,452	1,778	0,274	0,154	0,065	1,208	0,197	0,000	0,880

Dos valores obtidos regista-se que os materiais envolvidos nos equipamentos de produção térmica podem ser tão importantes quanto os aplicados na distribuição da energia térmica no edifício (Quadro 4.39). Na Figura 4.48 apresentam-se os valores da ACV dos elementos da central térmica, tendo sido considerada uma taxa de reciclagem de 80%

para os metais (95% para o alumínio), a reciclagem total do fluido frigorífero e uma taxa de fugas do fluido frigorífero de 2%/ano (Heikkila, 2004). Dos resultados obtidos os materiais da central térmica (bomba de calor e UTA) apresentam um impacto ambiental (indicador único) sensivelmente três vezes superior ao sistema de distribuição térmica (Figura 4.46).

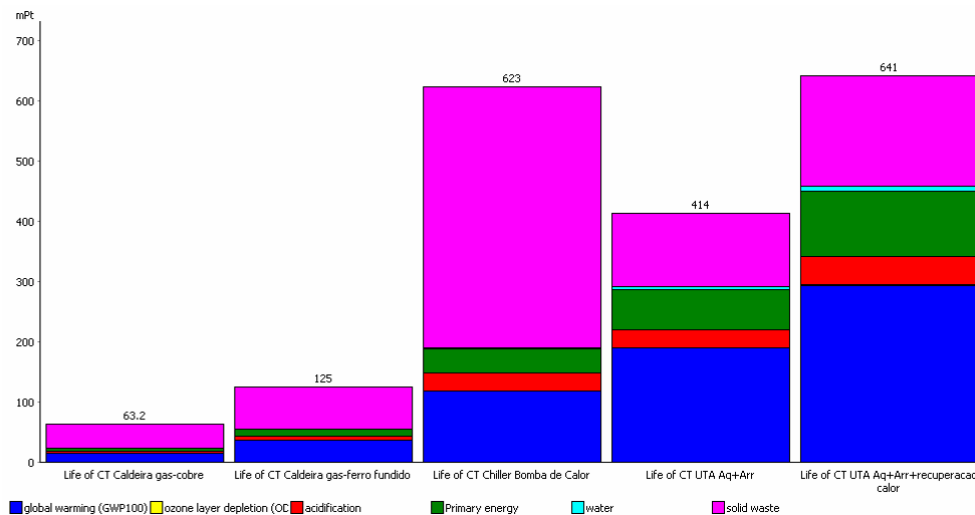


Figura 4.48 - Valores do indicador ambiental único para os diferentes tipos de sistemas de climatização por kW de potência instalada

#### 4.1.6.7.2.2 - Sistema de aquecimento habitações

Nas habitações a climatização é frequentemente efectuada com base em caldeiras/radiadores ou com bombas de calor. Prek (2004) estudou três tipos de sistemas de aquecimento (não inclui aparelhos de produção de água quente), nomeadamente, radiadores de água quente, ventilo-convectores e pavimento radiante (não incluiu neste as actividades de construção civil). Nesta análise foi acrescentada a solução de bomba de calor, Figura 4.49.

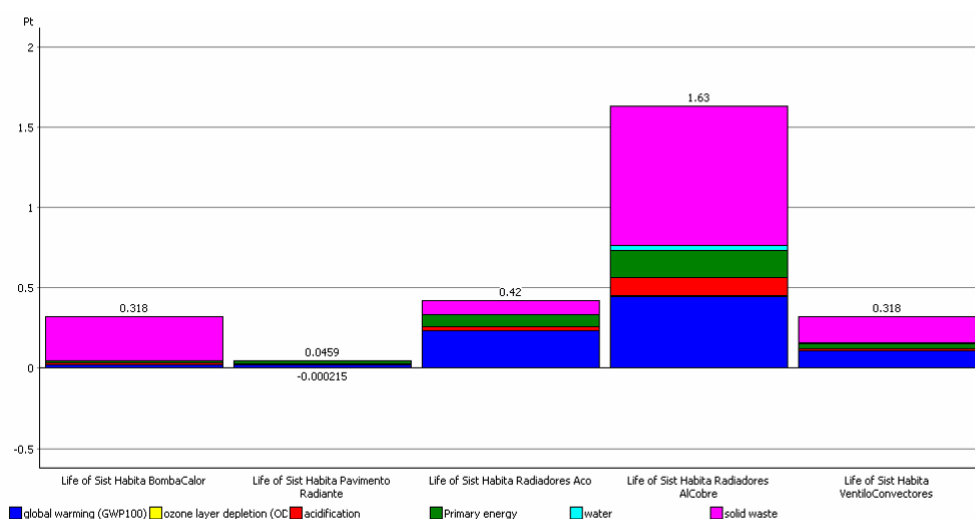


Figura 4.49 - Valores do indicador ambiental único para os diferentes tipos de sistemas de aquecimento de habitação (excluindo central térmica) por kW de potência instalada

Quadro 4.41 - Inventário de materiais de sistemas de aquecimento de habitações

	<b>Kg/kWtérmico</b>	<b>Aço</b>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Polybuten (PB)</b>	<b>PVC</b>	<b>Polietileno</b>
Radiadores e tubo de aço	24,51	24,51					
Radiadores alumínio tubo cobre	10,58		8,35	2,23			
Pavimento radiante	2,17						2,17
Ventilo-convectores	10,16	9,68	0,12	0,33		0,03	
Bomba de calor	1,16			0,71	0,45		

De acordo com Prek (2004) os elementos de cobre são os que mais contribuem para o impacto ambiental do sistema, identificando que os tubos de aço apresentam 1/3 do impacto ambiental dos tubos de cobre no sistema com radiadores, apesar dos tubos de cobre serem menores que os de aço. Dessa análise o sistema mais eficiente é de pavimento radiante, tendo o sistema de ventilo-convectores e a bomba de calor um desempenho satisfatório.

#### 4.1.6.7.3 - Instalação eléctrica

Para a instalação eléctricas há que considerar os cabos de distribuição de electricidade e os correspondentes acessórios, quadros disjuntores, etc.

Neste estudo considera-se um consumo de cobre de 0,6 kg/m<sup>2</sup> de pavimento em concordância com o adoptado no trabalho Scheuer (2003). Para o isolamento eléctrico admite-se um consumo de PVC de 0,1 kg/m<sup>2</sup> de pavimento.

#### 4.1.6.7.4 - Instalação de distribuição e drenagem de água

Para se estimar o impacto ambiental dos sistemas de abastecimento e de drenagem de água de habitações considera-se o exemplo objecto de estudo da ventilação (secção 4.1.6.7.1). Para a distribuição de água é necessário tubagem de Ø25 mm entre o contador e as habitações, sendo suficiente Ø15 mm para distribuição de água no interior da habitação (RGSPDADAR, 1995). Para alimentação da bateria de contadores é necessário Ø50 mm. Para a drenagem de águas residuais são necessárias tubagens: Ø90 mm para o ramal da retrete, Ø40 mm para os ramais do lavatório, bidé e banheira, Ø50 mm para o ramal do lava loiça, Ø60 mm para os ramais da máquina de lavar loiça e da máquina de lavar roupa. Para o tubo de queda e colector das instalações sanitárias e da cozinha prevê-se Ø110 mm, para o colector das águas residuais da cozinha e das instalações sanitárias prevê-se Ø125 e um ramal de ligação de Ø140 mm.

Tendo por base as dimensões anteriores é estimado um consumo de 565 kg de aço galvanizado para a rede de distribuição de água fria e de água quente sanitária e de 150 kg de PVC para a rede de drenagem de águas residuais. Para a loiça sanitária estima-se uma massa de 50 kg,

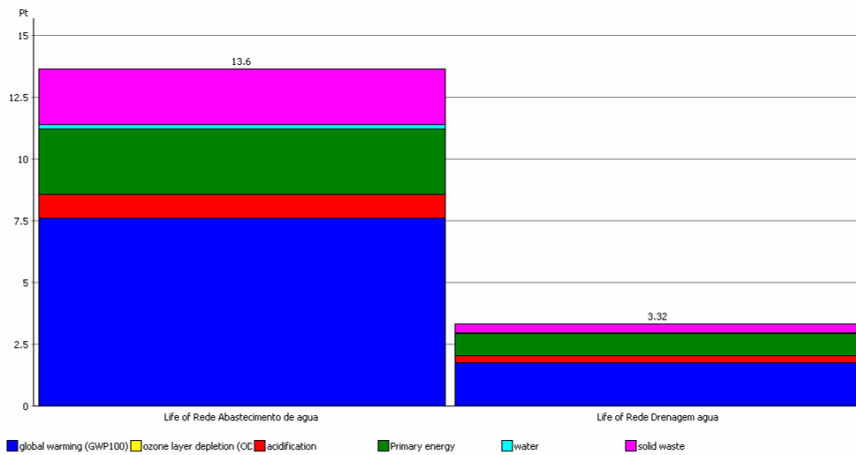


Figura 4.50 - Valores do indicador ambiental único para uma rede de abastecimento de água de aço galvanizado e rede de drenagem de PVC

#### 4.1.7 - Fase desconstrução/demolição e tratamento de resíduos

De acordo com o estudo de Symons (1999) na Europa cerca de 72% dos resíduos da construção e demolição são enviados para aterro. No estudo efectuado até aqui foram consideradas taxas de reciclagem de metais significativamente elevadas, tendo em conta o valor comercial destes resíduos. Em relação aos resíduos da construção foi assumido que cerca de 50% se destinam a aterro e que 50% são reciclados e utilizados como inertes na construção, Figura 4.51. Pereira (2000) identifica como possibilidades de reciclagem dos resíduos de tijolo a sua utilização como inertes na formação de betão ou argamassa, pelo que num futuro não muito longínquo poderão ser atingidas taxas de reciclagem razoáveis.

Na fase construção e de desconstrução apenas se considera o impacte ambiental associado ao transporte dos resíduos e ao seu destino, pois de uma forma geral a energia envolvida é relativamente pequena com foi referido no capítulo 2.

Products						
Waste specification						
Name	Amount	Unit	Low value	High value	Category	Comment
RCD 50% aterro 50% reciclados	1	kg	0	0	armando	
Inputs						
Known inputs from technosphere (materials/fuels)						
Name	Amount	Unit	Low value	High value	Comment	
Known inputs from technosphere (electricity/heat)						
Name	Amount	Unit	Low value	High value	Comment	
Outputs						
Materials and/or waste types separated from waste stream						
Waste scenario/treatment	Material/Waste type	Perc.	Comment			
Landfill RCD	Ceramics	50 %				
Recycling RCD	Ceramics	50 %				
AP Recycling aluminium B250	Aluminium	95 %				
AP Recycling ECCS steel B250	ECCS steel	80 %				
AP Recycling ECCS steel B250	Ferro metals	80 %				
AP Recycling Glass	Glass	50 %				
AP Recycling Ferro metals	Ferro metals	80 %				
AP Recycling Wood	Wood	50 %				
AP Recycling Non-ferro	AP Copper ETH U	80 %				
AP Recycling Frigorigeno	Frigorigenio	100 %				
Waste streams remaining after separation						
Waste scenario/treatment	Perc.	Comment				
AP Landfill other materials	100 %					

Figura 4.51 - Descrição do processo *waste scenario* implementado na modelação do edifício e materiais

## **4.2 - DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE ENVIDRAÇADOS NOS EDIFÍCIOS**

### **4.2.1 - Aspectos gerais**

Como foi referido na introdução os envidraçados e os respectivos sistemas de sombreamento têm um forte impacto no conforto térmico e visual dos ocupantes nas zonas periféricas dos edifícios, bem como no consumo de energia de aquecimento, arrefecimento e de iluminação artificial. O projecto da fenestração deve por isso envolver uma abordagem integrada.

Neste capítulo avalia-se de forma integrada o impacto energético e ambiental de vãos envidraçados, nomeadamente as implicações da área envidraçada. Face à utilização de uma fachada dupla pele no caso de estudo do edifício de serviços, nesta secção também é avaliado o potencial desse tipo de solução para o clima português. Tendo em conta dificuldade de caracterizar o factor solar de algumas soluções envidraçadas procurou-se desenvolver um método experimental para determinar o factor solar com recurso a células passivas.

Tendo em conta o estado de conhecimento e a especificidade do clima Português, na secção 4.2.2 detalha-se o estudo realizado destinado a otimizar as palas de sombreamento, dado serem um dos sistemas de sombreamento mais eficazes, principalmente para envidraçados expostos no quadrante sul.

Nas secções 4.2.3, 4.2.4 e 4.2.5 detalha-se o estudo realizado para estimar as áreas envidraçadas optimizadas tendo em conta as necessidades de aquecimento, de arrefecimento e de iluminação artificial. Com os valores obtidos são também estimadas as necessidades energéticas anuais. Neste estudo considerou-se a utilização de um sistema de iluminação artificial eficiente, a existência de estores venezianos aplicados alternativamente pelo exterior, pelo interior e no meio dos vidros duplos. Os estores venezianos são actuados em função da luminância no plano de trabalho, para prevenir encandeamento e na estação de arrefecimento também é tida em conta a intensidade da radiação solar incidente para reduzir as necessidades de arrefecimento. Nesta apreciação foram avaliadas soluções envidraçadas correntes e soluções com fachada dupla-pele. Por fim, com base na área envidraçada “optimizada” na secção 4.2.7 avalia-se o impacte dos perfis das janelas no desempenho térmico e na secção 4.2.8 apresenta-se a ACV para algumas soluções envidraçadas, tendo em conta a carga ambiental da fase de construção e da fase de utilização.

Nas secções 4.2.9 apresentam-se os resultados do trabalho realizado para estabelecer um método experimental simplificado para determinar o factor solar de soluções envidraçadas com base em células de teste passivas.

### **4.2.2- Optimização da dimensão de palas horizontais de sombreamento**

#### **4.2.2.1 - Aspectos gerais e de metodologia**

Tendo em conta o trabalho existente, considerou-se importante efectuar um estudo destinado a determinar o comprimento optimizado das palas horizontais para protecção solar dos vãos envidraçados para a latitude de Portugal Continental.

Neste trabalho considerou-se apenas as palas horizontais por serem aquelas que apresentam maior eficácia, nomeadamente para os envidraçados no quadrante sul. Não foi efectua a apreciação de palas verticais por se considerar que estas apresentam maior



impacto na redução da vista para o exterior e pelo facto de este sombreamento ser requerido em menos de metade das horas de exposição solar, sendo por isso mais adequada a adopção de protecções solares móveis.

Com o objectivo de otimizar as dimensões das palas de sombreamento horizontais foi adoptada uma abordagem semelhante à proposta por Raessi (1993), tendo sido utilizado como parâmetro de avaliação a relação entre a radiação solar incidente no envidraçado com a pala face à radiação incidente num envidraçado sem pala. Neste estudo foram considerados envidraçados expostos a: sul, este e oeste. A radiação solar incidente foi determinada com base no modelo de céu limpo (ASHRAE, 1997) e foi considerado o dia 15 de cada mês. Para determinar o efeito de sombreamento na estação de aquecimento considerou-se o período compreendendo entre os meses de Novembro e Fevereiro e para a estação de arrefecimento considerou-se os meses de Junho a Setembro.

Na análise da optimização da dimensão das palas foram estudados os seguintes factores (Figura 4.52):

- Impacto do comprimento da pala ( $X$ ) e altura do envidraçado ( $Y_1-Y_2$ )
- Impacto da extensão lateral da pala ( $Z_2$ )
- Impacto do afastamento da pala ao envidraçado ( $Y_2$ )
- Impacto da relação geométrica do envidraçado ( $Z_1, Y_1-Y_2$ )

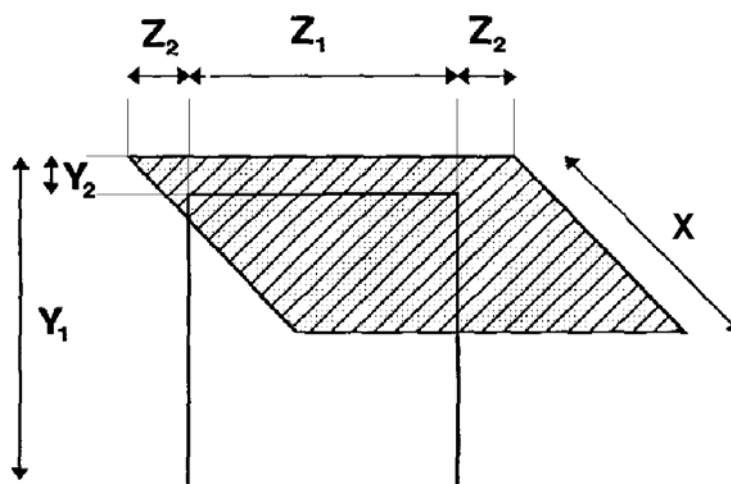


Figura 4.52 - Representação da pala de sombreamento horizontal

Para efectuar este estudo foi desenvolvido um modelo em Excel, com base nas equações do movimento aparente do sol (ASHRAE, 1997). Neste modelo considera-se que a pala horizontal anula a incidência da radiação solar directa na zona sombreada, que reduz a incidência da radiação solar difusa proveniente do céu e que incrementa a componente reflectida do solo devido à reflexão na pala. Neste cálculo considerou-se um albedo de 0,20 e uma reflectância da zona inferior da pala de 0,5.

#### 4.2.2.2 - Análise do impacto do comprimento da pala e da altura do envidraçado

Para analisar o impacto do comprimento da pala foi seleccionado um envidraçado com 1 m x 1 m, uma pala horizontal com uma extensão lateral ( $Z_2$ ) de 0,10 m e um afastamento ao envidraçado nulo ( $Y_2=0$ ).

Na Figura 4.57 e na Figura 4.59, encontram-se os resultados obtidos para o coeficiente de sombreamento médio dos envidraçados (SC) e a energia incidente nos

envidraçados para as quatro exposições consideradas, verificando-se que o comprimento da pala que otimiza a protecção solar dos envidraçados expostos a sul varia entre 40% a 50% da altura do envidraçado, dependendo da extensão lateral da pala. Efectivamente, para uma pala com largura igual à do envidraçado (Figura 4.57) o comprimento otimizado da pala (otimiza ganhos estação de aquecimento - ganhos estação de arrefecimento) é de 0,4, enquanto para uma pala com extensão lateral de 1 m para cada um dos lados (Figura 4.59) essa relação é de 0,5. No caso de edifícios dominados pelas necessidades de arrefecimento o comprimento que permite minimizar a incidência da radiação solar é de sensivelmente 0,6, pois para comprimentos superiores a redução que se obtém é negligenciável.

Em relação aos envidraçados expostos a nascente e a poente, o efeito das palas horizontais não é tão eficaz quanto o observado nas palas a Sul. Efectivamente nos envidraçados expostos a sul, com uma pala de  $X/Y1$  de 0,5, obtém-se uma redução da radiação solar na estação de arrefecimento de sensivelmente 35% para envidraçados a sul e de 25% para envidraçados expostos a nascente ou poente e de 30% quando a pala apresenta uma extensão lateral de 1 m. Deste modo, as palas horizontais a nascente ou poente devem ser tão compridas quanto possível e apresentar uma extensão lateral significativa.

Estes resultados da eficácia de sombreamento de palas são diferentes dos resultados obtidos por alguns programas de cálculo que apenas se baseiam na fracção sombreada do envidraçado, pois não tem em conta a variação da intensidade da radiação solar incidente ao longo do dia.

Pela Figura 4.61 verifica-se que a eficácia do sombreamento é equivalente para janelas com relações geométricas semelhantes, ( $H_{jan}/L_{jan}$  e  $Z2/Z1$ ). No entanto, para janelas com diferentes relações existem variações na eficácia do sombreamento não negligenciáveis.

Nas figuras seguintes apresentam-se as palas aplicadas nas células de teste do LNEC (anexo C) e os resultados experimentais e numéricos obtidos com o modelo ESP-r. Dos resultados obtidos é possível verificar a concordância entre os resultados numéricos e experimentais, bem como a adequação da aplicação de palas horizontais para minimizar os ganhos solares. As palas ensaiadas apresentam  $X/Y1$  de 0,65, tendo a pala de alumínio  $Z2/Y1$  de 0,9 e a de madeira  $Z2/Y1$  de 0,56, o que permite reduzir os ganhos solares e a temperatura interior das células em Junho e Setembro em sensivelmente 7°C (pala de alumínio, face à situação de ausência de palas) e 3°C para a pala de madeira. Contudo, em Dezembro a redução da temperatura na célula com pala de alumínio é de 5°C.

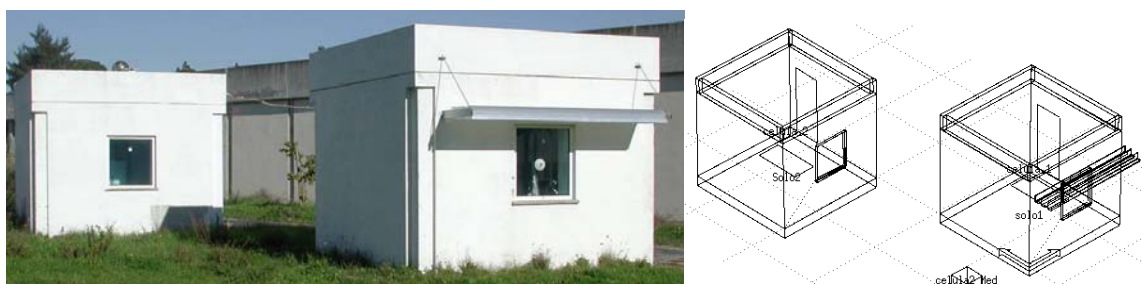
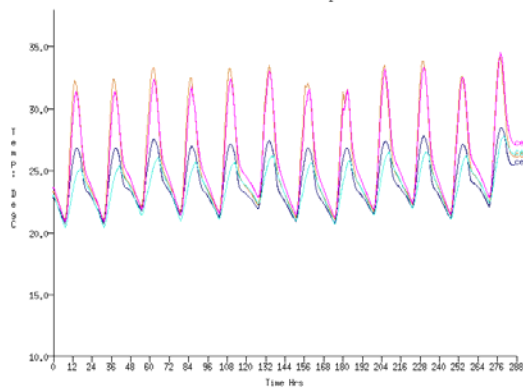


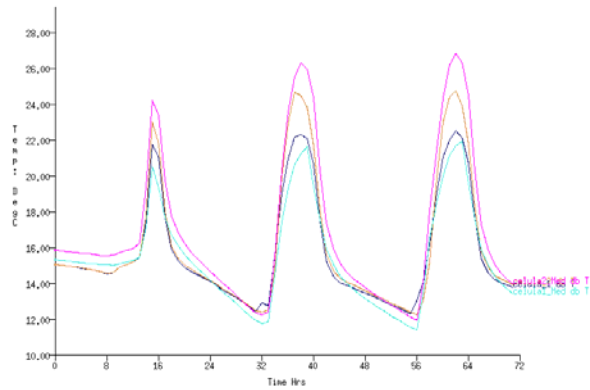
Figura 4.53 – Aspecto da célula sul com vidro duplo incolor e pala horizontal de perfis de alumínio e modelo ESP-r

Lib: celula.res: Results for celula  
 Period: Mon-19-Sep00V5(2005) to Fri-30-Sep02V54(2005) : sim@10w, output@50w  
 Zones: celula\_1 celula\_2 solcol celcol celula1\_Med celula2\_Med



Setembro

Lib: celula.res: Results for celula  
 Period: Mon-05-Dec00V5(2005) to Wed-07-Dec02V54(2005) : sim@10w, output@50w  
 Zones:



Dezembro

Figura 4.54 - Ensaio vidro duplo incolor com pala horizontal de alumínio X/Y1=0,6 resultados experimentais e resultados numéricos



Figura 4.55 – Aspecto da célula sul com vidro duplo incolor e pala horizontal de madeira

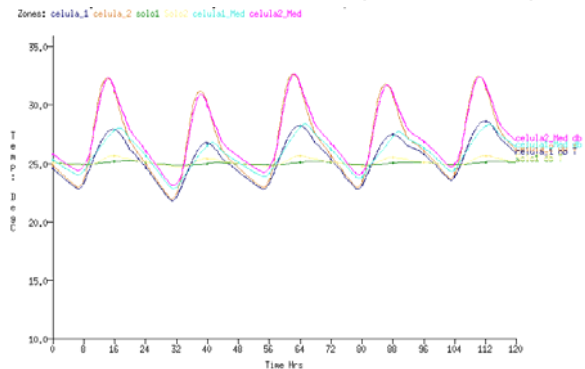


Figura 4.56 – Ensaio vidro duplo incolor com pala horizontal de madeira X/Y1=0,6 resultados experimentais e resultados numéricos

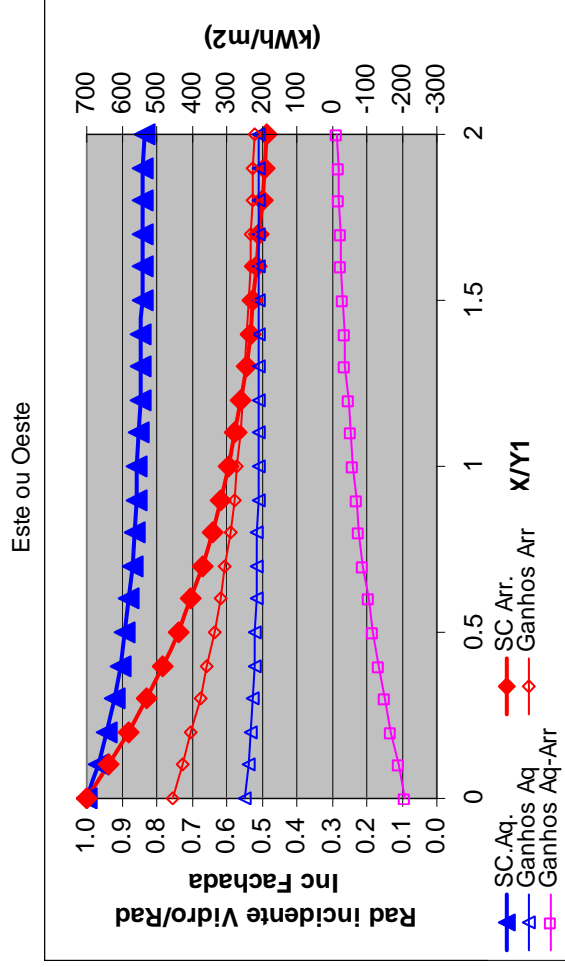
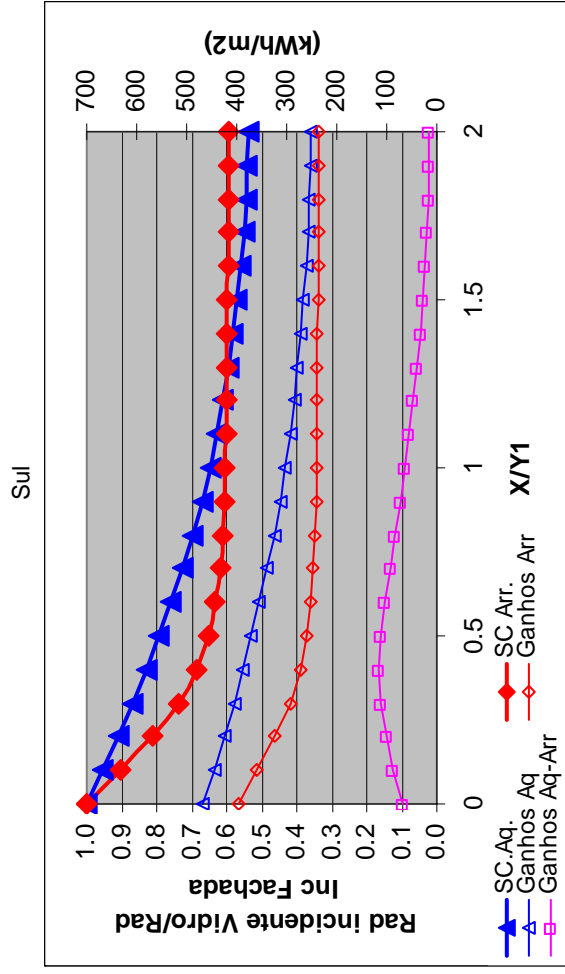


Figura 4.57 - Otimização comprimento de pala horizontal de sombreamento, Janela 1 m x 1 m, Y2 =0, Z2/Y1=0

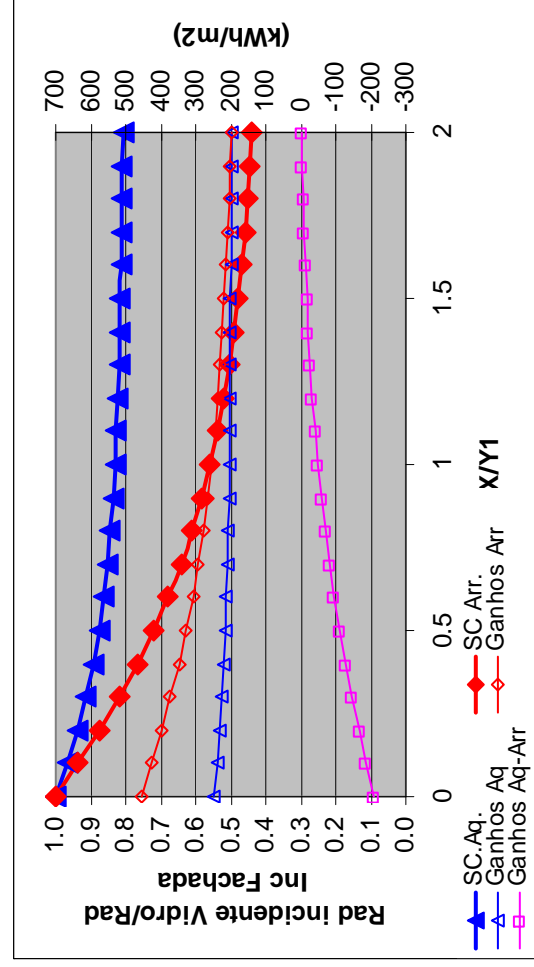
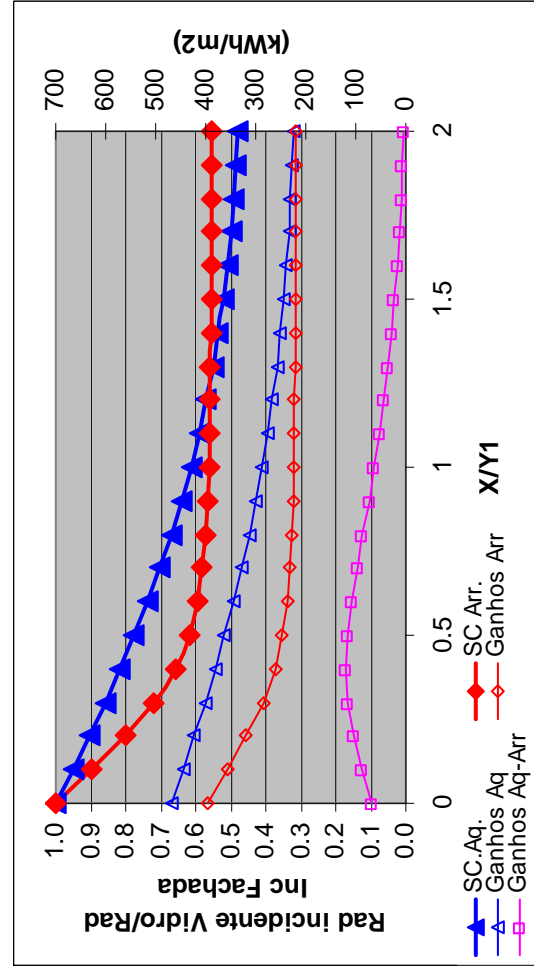


Figura 4.58 - Otimização comprimento de pala horizontal de sombreamento, Janela 1 m x 1 m, Y2 =0, Z2/Y1=0,1

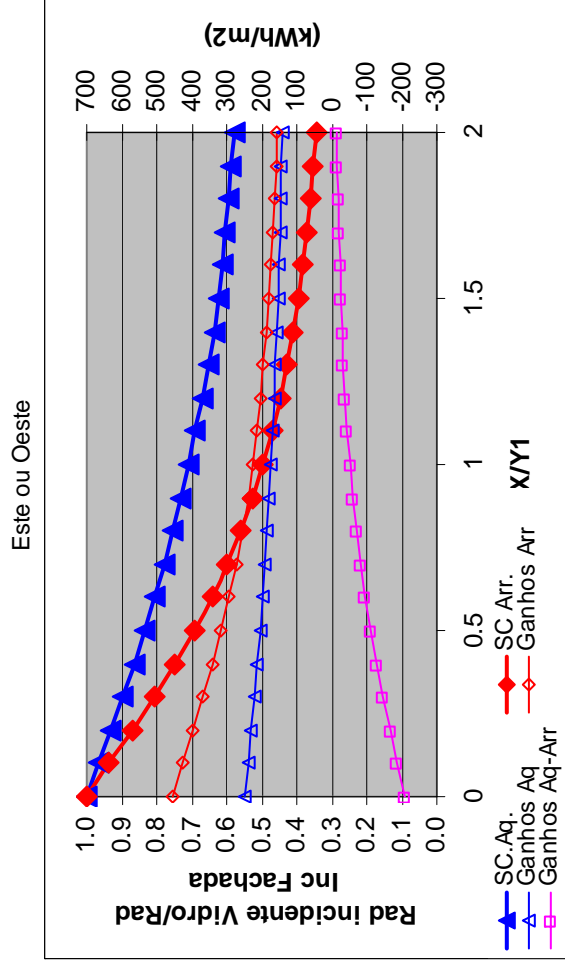
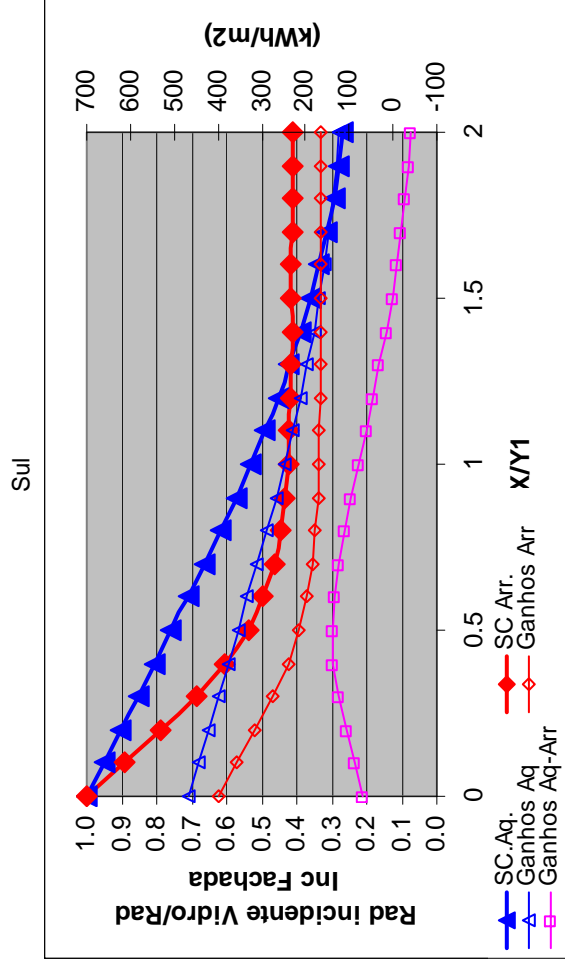


Figura 4.59 - Otimização comprimento de pala horizontal de sombreamento, Janela 1 m x 1 m, Y<sub>2</sub> = 0, Z<sub>2</sub>/Y<sub>1</sub> = 1,0

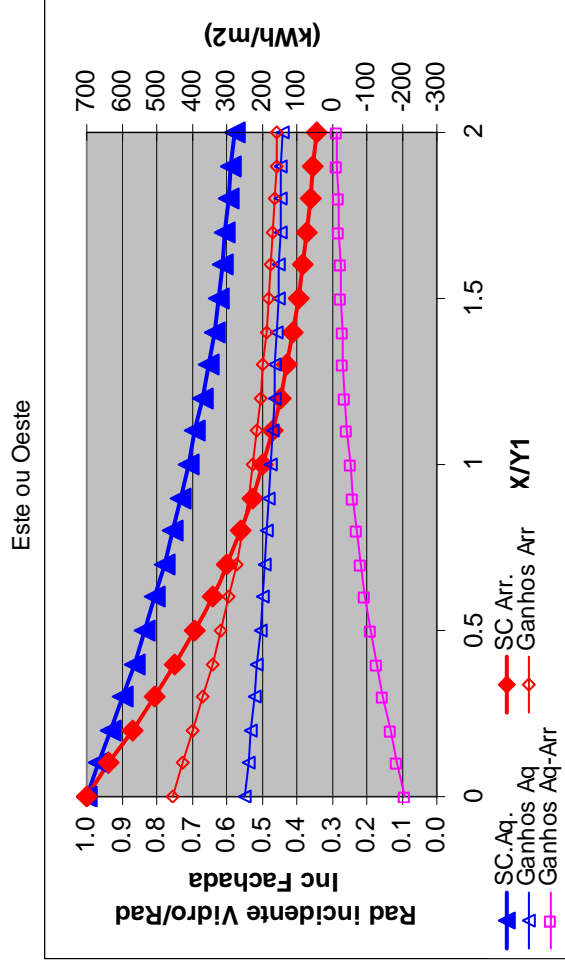
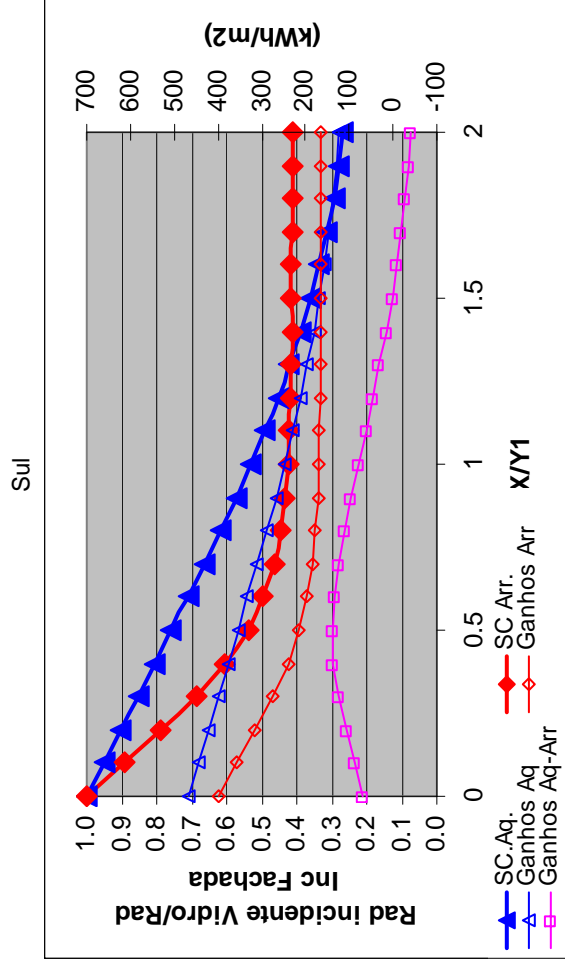
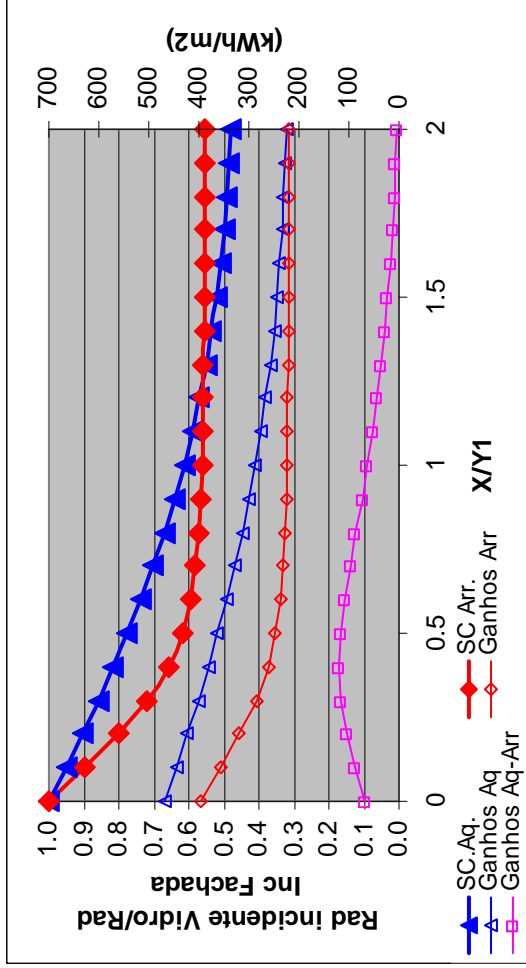
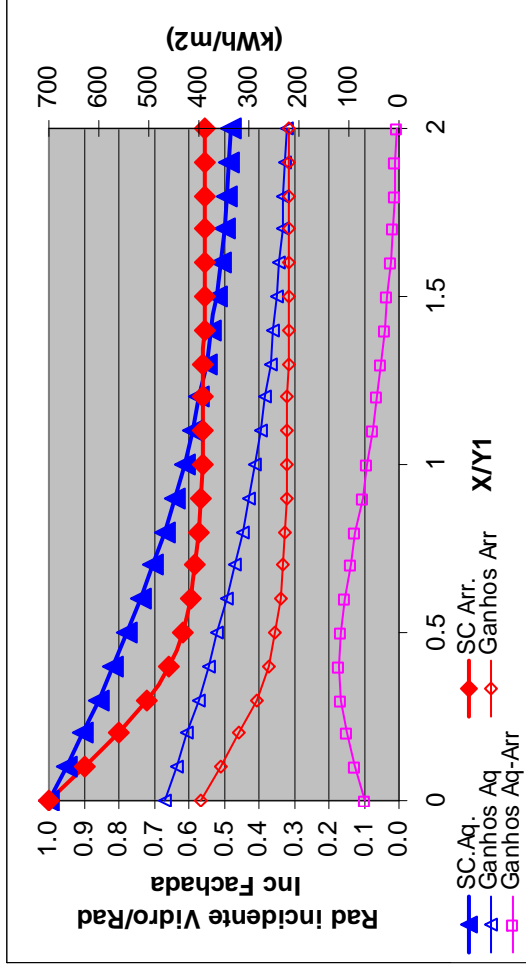


Figura 4.60 - Otimização extensão lateral da pala horizontal de sombreamento, Janela 1 m x 1 m, Y<sub>2</sub> = 0, X/Y<sub>1</sub> = 0,5

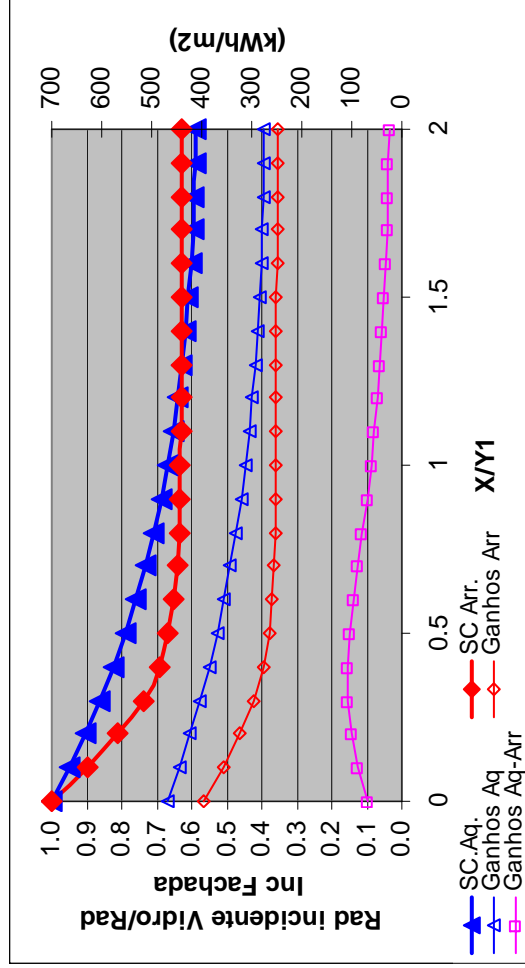
Janela 2 m x 2 m, Z2=0,2 (Z2/Y1=Z2/Z1=0,1)



Janela 1 m x 1 m, Z2 = 0,1 (Z2/Y1=Z2/Z1=0,1)



Janela 1 m x 2 m, Z2=0,2 m (Z2/Y1=0,1, Z2/Z1=0,2)



Janela 2 m x 1 m, Z2=0,2 (Z2/Y1=0,2, Z2/Z1=0,1)

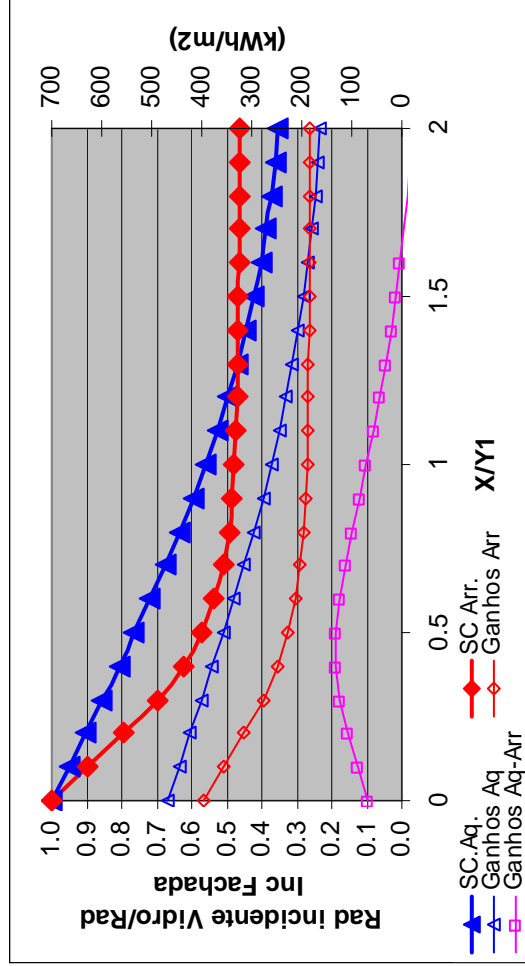
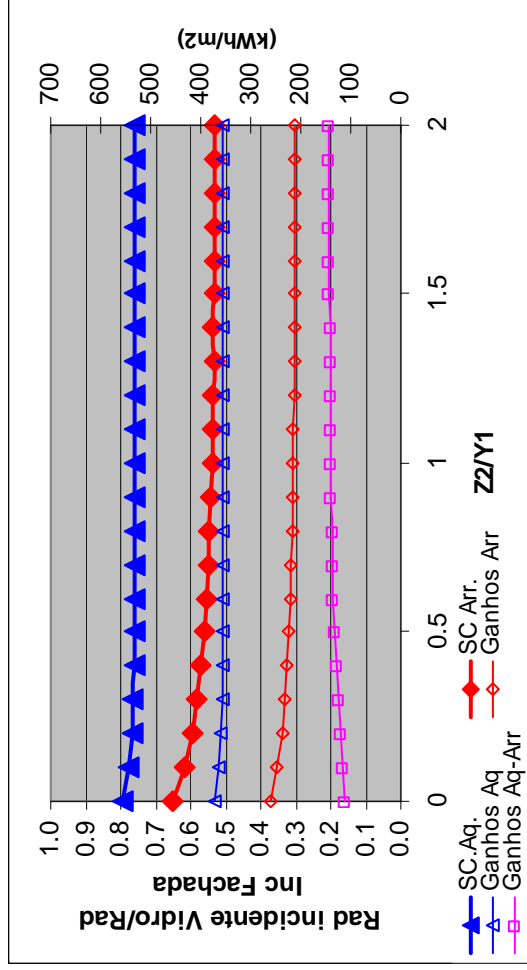
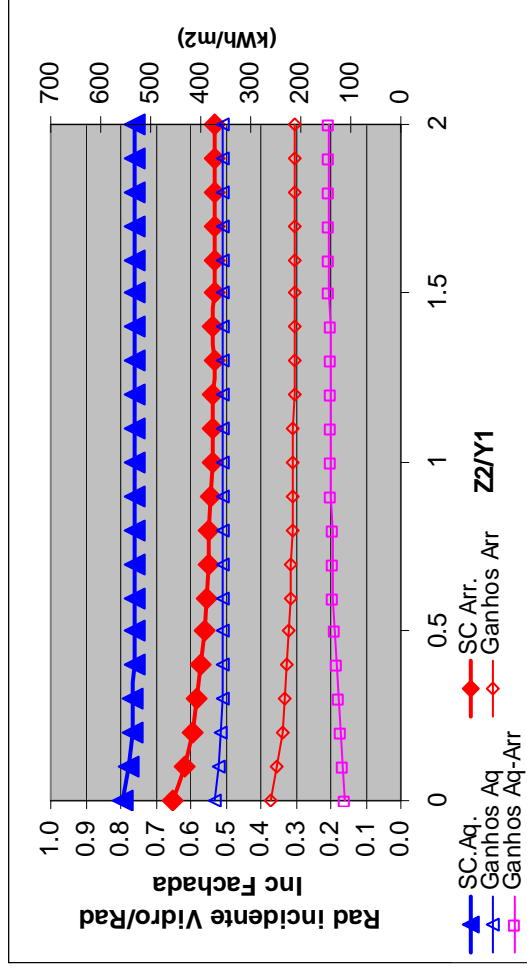


Figura 4.61 - Otimização comprimento de pala horizontal de sombreamento, vão a sul - área do vão

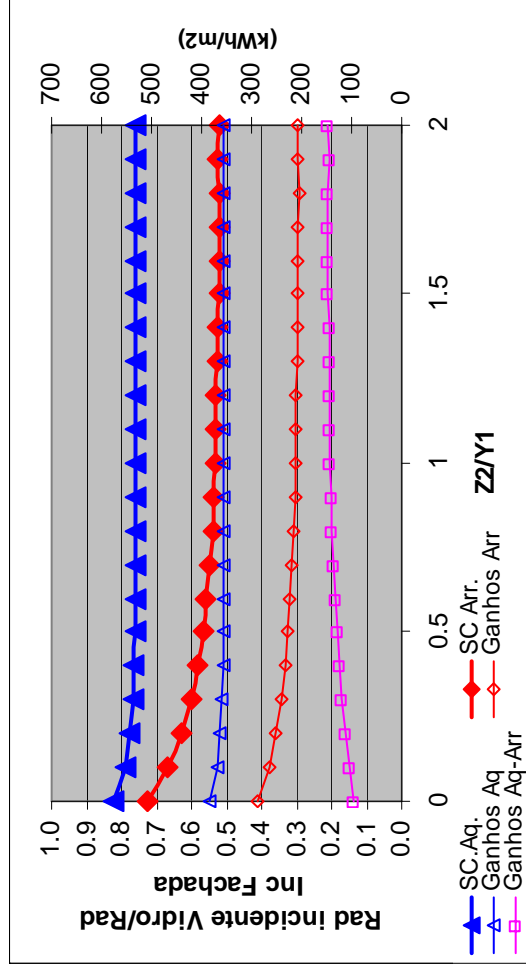
Janela 2 m x 2 m



Janela 1 m x 1 m



Janela 1 m x 2 m



Janela 2 m x 1 m, Z2=0,2

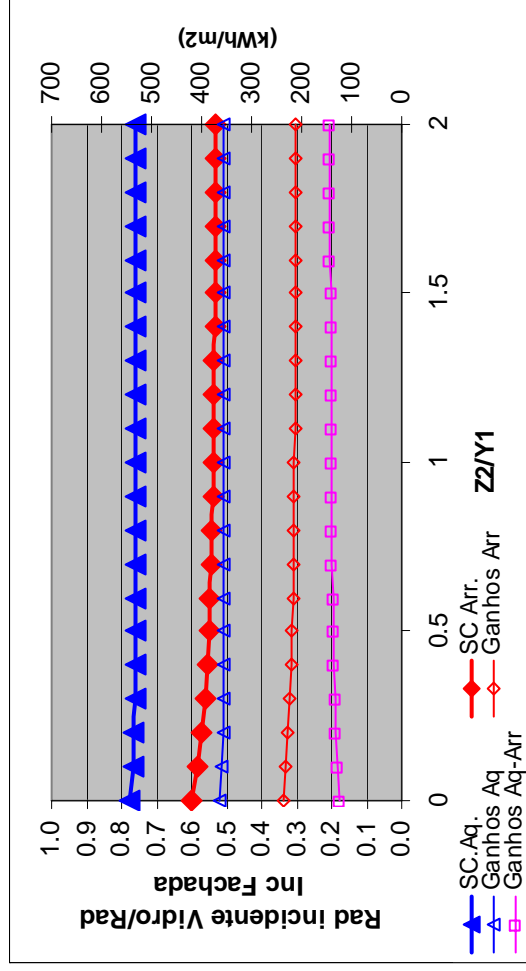


Figura 4.62 - Otimização extensão lateral da pala horizontal de sombreamento envidraçado a sul Y2 =0, X/Y1=0,5

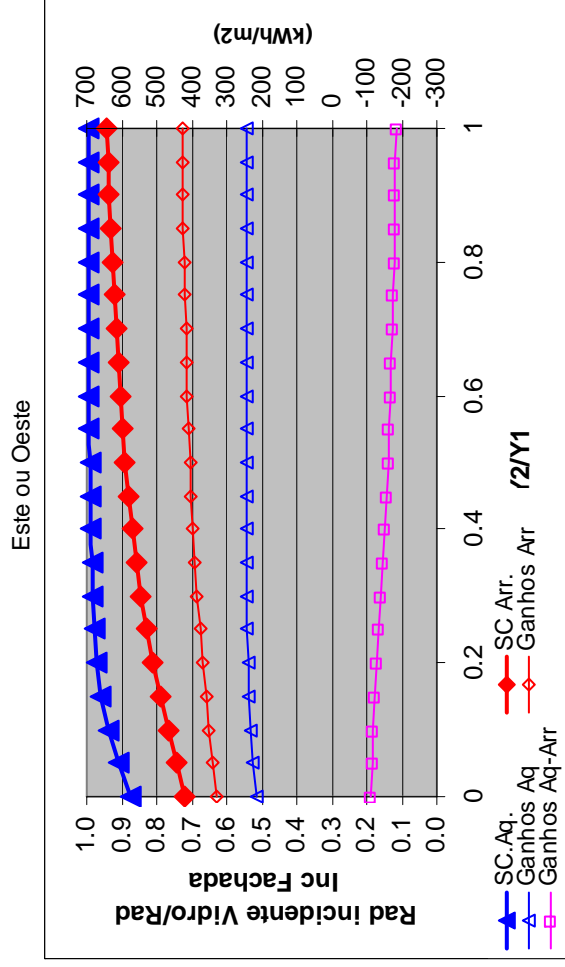
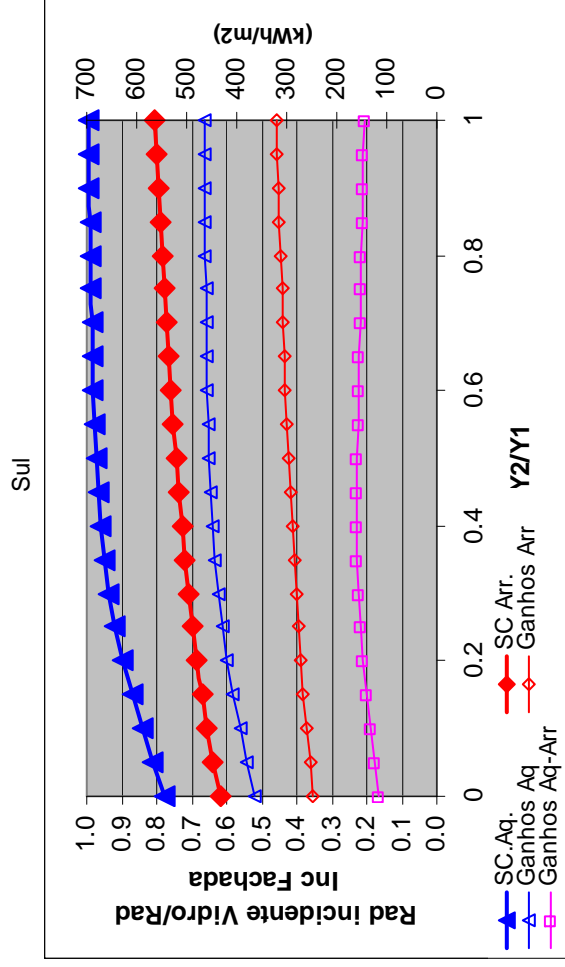


Figura 4.63 - Otimização do afastamento da pala horizontal de sombreamento ao envidraçado, Janela 1 m x 1 m, X/Y1=0,5, Z2/Y1=0,1

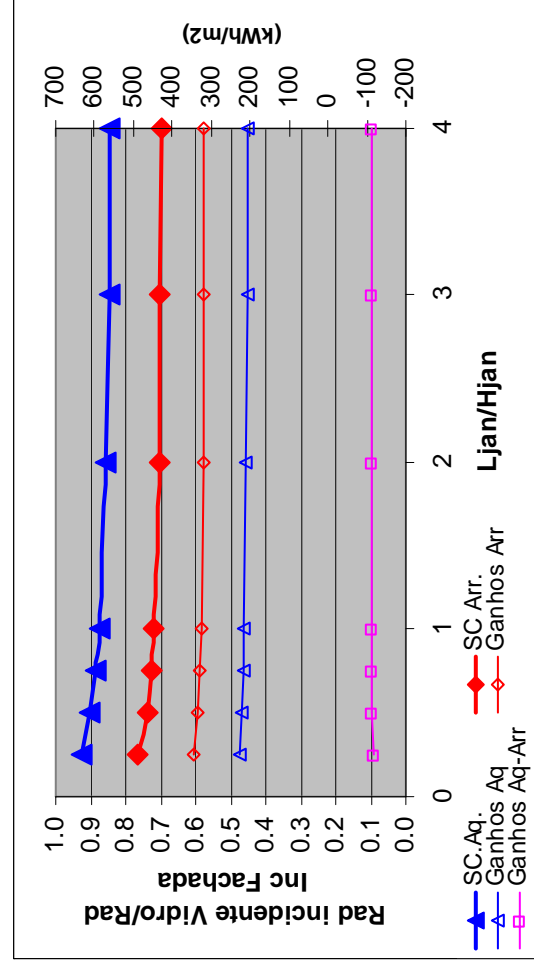
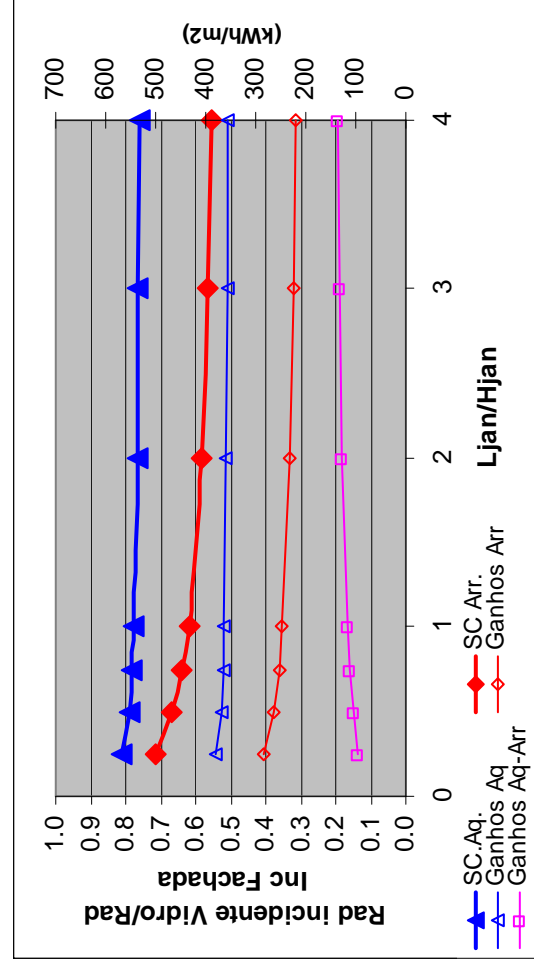


Figura 4.64 - Otimização relação Ljan/Hjan X/Y1=0,5, Z2/Y1=0,1, Y2=0



#### 4.2.2.3 - Impacto da extensão lateral da pala

Para efectuar a análise do impacto da extensão lateral da pala horizontal foi adoptado como parâmetro a relação  $Z2/Y1$ . A análise foi efectuada para uma pala com comprimento de 0,5 vezes a altura do envidraçado, tendo em conta os resultados da secção anterior. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.60 e na Figura 4.62.

Os resultados obtidos são concordantes com os indicados por Raessi (1993), pois não se regista uma alteração significativa da eficácia do sombreamento com  $Z2/Y1$  para envidraçados quadrados. Para os envidraçados expostos a sul, a nascente e a poente será recomendada uma extensão lateral da pala ( $Z2/Y1$ ) de 0,4.

Pela Figura 4.62 verifica-se que uma extensão lateral da pala de 0,5 em envidraçados expostos a sul com uma relação altura/largura superior a 1 (janela 1 m x 2 m) é possível reduzir em 0,10 a incidência da radiação solar na estação de arrefecimento.

#### 4.2.2.4 - Impacto do afastamento da pala ao envidraçado

Para apreciar o impacto do afastamento da pala horizontal de sombreamento ao envidraçado, foi considerada uma relação constante de  $X/Y1$  de 0,5 e  $Z2/Y1$  de 0,1. Como  $Y1$  é dado pela soma da altura da janela ( $H_{jan}$ ) com  $Y2$ , as dimensões da pala estão a aumentar com a relação  $Y2/Y1$ .

Dos resultados obtidos (Figura 4.63) verifica-se que ao aumentar o afastamento da pala ao envidraçado se está a reduzir ligeiramente a eficácia de sombreamento, sendo aceitáveis afastamentos ( $Y2/Y1$ ) até 0,2.

#### 4.2.2.5 - Impacto da relação geométrica do envidraçado

Para apreciar o impacto da relação entre a altura e a largura da janela no sombreamento foi efectuada um estudo considerando  $X/Y1$  de 0,5,  $Z2/Y1$  de 0,1 e  $Y2=0$ .

Dos resultados obtidos no quadrante sul verifica-se que quanto mais larga for a janela maior é a eficácia do sombreamento.

### **4.2.3 - Optimização da área envidraçada de edifícios de escritórios**

#### 4.2.3.1 - Características geométricas e construtivas

No estudo de edifícios do tipo administrativo foi adoptada uma geometria correspondente a um gabinete individual 2,7 m x 5 m x 2,7 m. A profundidade do gabinete foi seleccionada de modo a corresponder a sensivelmente 2,5 vezes a distância do ponto mais alto do envidraçado ao pavimento, para se maximizar o impacto da luz natural na redução da iluminação artificial.

Nesta modelação considerou-se a área de vidro a variar entre 5% a 45% da área útil de pavimento, a que correspondem relações de área de vidro/área de fachada (WWR) de 0,10 a 0,83. Para controlo do encandeamento provocado pela luz natural é recomendado dotar os vãos de cortinas ou venezianas, sendo considerado neste estudo um estore veneziano com lâminas de cor clara. Face aos resultados da optimização do sombreamento

com palas horizontais, neste estudo avalia-se o comportamento deste gabinete também com uma pala horizontal com 50% da altura do envidraçado.

Síntese das características apreciadas:

- Área envidraçada/Área de pavimento: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% e 45%.
- Orientação do gabinete: N, E, S e W.
- Tipos de vidro: Vidro simples incolor, Vidro simples verde, Vidro simples reflectante  
Vidro duplo incolor, Vidro duplo verde, Vidro duplo reflectante  
Vidro duplo incolor baixo emissivo
- Tipo de protecção solar:
  - Estore veneziano interior
  - Estore veneziano na lâmina de ar do vidro duplo
  - Estore veneziano exterior
  - Pala horizontal e estore veneziano interior

No Quadro 4.42 encontra-se um resumo das propriedades dos envidraçados estudados. As propriedades foram determinadas com a base de dados WIS (Dick, 2003).

Em relação à envolvente opaca admite-se uma parede simples com a seguinte composição ( $U=0,76 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ):

- revestimento exterior
- isolamento contínuo com poliestireno expandido extrudido em placas de 30 mm de espessura
- pano interior de tijolo simples de 22 cm
- revestimento interior de estuque.

Tendo em conta que nos edifícios de serviços são usualmente adoptados pavimentos sobre-elevados e tectos falsos, neste estudo considerou-se uma laje de betão com 20 cm de espessura, um espaço de ar de 20 cm e pavimento sobre-elevado constituído por aglomerado de madeira revestido com chapa de aço galvanizado e acabamento de PVC. O tecto falso é constituído por chapas de alumínio lacadas de branco e um espaço de ar de 30 cm. A compartimentação vertical interior é realizada com divisórias leves de gesso cartonado com espaço preenchido com lã mineral. Esta configuração corresponde a um espaço com inércia térmica fraca, mas que tem a flexibilidade de poder ser adaptado ao longo da vida do edifício. Também será avaliada pontualmente a situação com a massa de betão exposta ao ambiente interior.

Quadro 4.42 - Propriedades dos envidraçados estudados

Tipo de vidro	Vidro		Vidro com veneziano exterior*			Vidro com veneziano na caixa de ar*			Vidro com veneziano interior*			
	U	$\tau_v$	$\tau_v/g$	U	g	$\tau_v$	U	g	$\tau_v$	U	g	$\tau_v$
Vidro simples incolor	5,9	0,82	0,89	1,09	5,9	0,22	0,18	0,82	5,9	0,44	0,24	0,55
Vidro simples parsol verde	5,9	0,56	0,73	1,30	5,9	0,22	0,18	0,82	5,9	0,31	0,19	0,61
Vidro simples reflectante verde	4,8	0,23	0,12	0,52	4,8	0,16	0,03	0,19	4,8	0,14	0,04	0,29
Vidro duplo incolor	2,9	0,73	0,80	1,10	2,9	0,21	0,20	0,95	3,1	0,33	0,21	0,64
Vidro duplo parsol verde	2,9	0,46	0,66	1,43	2,9	0,17	0,16	0,94	3,1	0,25	0,17	0,68
Vidro duplo reflectante verde	2,5	0,15	0,11	0,73	2,5	0,11	0,03	0,27	3,0	0,13	0,03	0,23
Vidro duplo incolor baixo emissivo	1,8	0,61	0,75	1,23	1,8	0,18	0,18	1,00	2,7	0,30	0,20	0,67

\* Nestas circunstâncias considera-se um estore veneziano com lamina de cor clara a 45°.

#### 4.2.3.2 - Perfil de ocupação e cargas térmicas internas

Neste estudo considerou-se o gabinete ocupado por uma pessoa nos dias úteis entre as 9 h e as 13 h e entre as 14 h e as 19 h, ver capítulo 3. A carga térmica do ocupante foi considerada igual a 75 W de calor sensível e 45 W de calor latente.

Para a iluminação artificial considerou-se uma instalação com elevada eficiência constituída por lâmpadas fluorescentes com balastros electrónicos que permitem regular a intensidade luminosa. Nesse sentido, foi considerada uma potência total instalada de 10 W/m<sup>2</sup>, tendo como limiar para “desligar” a iluminação artificial o valor de 450 lux e um consumo mínimo de 10%. O valor da iluminância corresponde ao valor médio de três pontos situados no eixo do gabinete a 1,5 m, 3,0 m e 4,5 m da fachada exterior e a 0,75 m de altura. Para os equipamentos admitiu-se uma carga térmica de 100 W (7,4 W/m<sup>2</sup>), correspondente a um computador, 1 monitor uma impressora e eventuais outros acessórios conforme referido no capítulo 3. Considerou-se uma carga térmica de 100 W nos períodos de ocupação e de 10 W nos restantes períodos, incluindo o fim-de-semana.

No Quadro 4.43 e na Figura 4.65 apresenta-se um resumo dos ganhos térmicos internos de calor sensível considerados. No que se refere à iluminação é apresentado o valor corresponde ao funcionamento da iluminação com a potência máxima instalada (135 W, 10 W/m<sup>2</sup>) e o valor correspondente ao valor de *stand-by* do sistema considerado igual a 10% do valor da potência máxima. No total é estimada uma potência de ganhos térmicos internos (ocupantes+equipamentos+iluminação) de 14 a 23 W/m<sup>2</sup>.

Quadro 4.43 - Resumo dos ganhos térmicos internos de calor sensível

Fonte de calor sensível	Estação aquecimento e intermédia (8 meses)		Estação arrefecimento (4 meses)	
	kWh	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh/m <sup>2</sup>
Ocupantes (75 W)	114	8,5	59	4,4
Equipamentos (100 W, 7,4 W/m <sup>2</sup> )	211	15,6	108	8,0
Iluminação Max 135 W (10 W/m <sup>2</sup> )	205	15,2	106	7,8
Iluminação Min 13,5 W	21	1,5	11	0,8

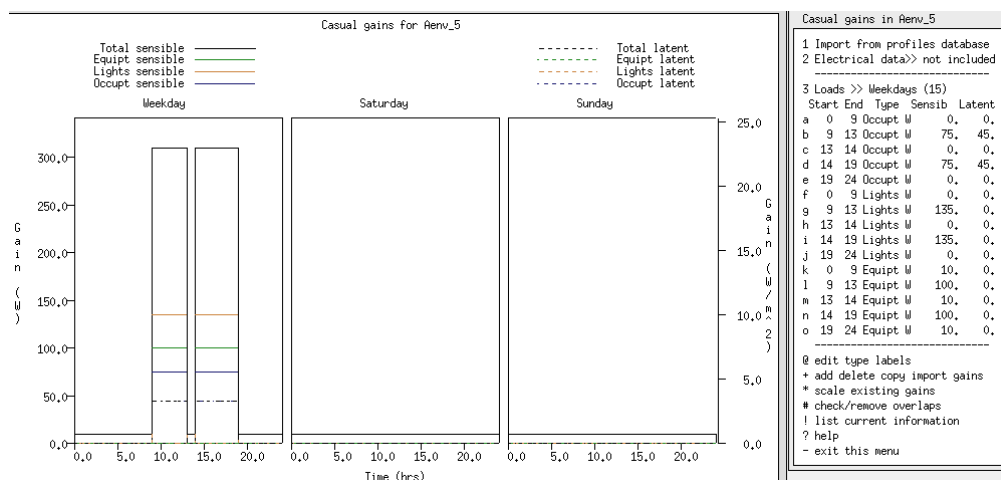


Figura 4.65 - Perfil das cargas térmicas internas

#### 4.2.3.3 - Controlo do estore veneziano

No controlo do estore veneziano assume-se que este se encontra activo quando a iluminância média no plano de trabalho for superior a 1000 lux, de forma a prevenir problemas de encandeamento. Na estação de arrefecimento o estore também será actuado para a condição em que a radiação solar incidente seja superior a  $100 \text{ W/m}^2$ .

Este limite de  $100 \text{ W/m}^2$ , baseia-se num estudo prévio do gabinete exposto a sul com vidro duplo incolor, em que se verificou que o limite de  $200 \text{ W/m}^2$  aumentava ligeiramente as necessidades energéticas, enquanto o valor de  $50 \text{ W/m}^2$  conduzia a uma redução negligenciável nas necessidades energéticas e ao fecho quase permanente do estore.

#### 4.2.3.4 - Ventilação

Para a ventilação corrente do espaço durante os períodos de ocupação e de almoço considera-se um caudal de  $68 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $5 \text{ m}^3/\text{h/m}^2$ , 1,87 rph), em concordância com o referido no capítulo 3, Figura 4.66.

Na estação de arrefecimento considera-se que é realizado *free-cooling* durante a noite com um caudal de 5 rph, de forma a minimizar as necessidades de arrefecimento. Durante o fim-de-semana admite-se um caudal de 2 rph. Este caudal pode ser obtido pela abertura das folhas de ventilação ou outros registos que possibilitem este caudal, ou pelo sistema de ventilação mecânica. Adoptou-se o valor de 5 rph como uma solução de compromisso entre o sobredimensionamento do sistema de ventilação e a eficácia da ventilação nocturna, que aumenta com o caudal de ventilação. Santamouris (1996) estudou a redução das necessidades de arrefecimento para taxas de renovação de ar de 1, 5, 10 e 20 rph, constatando reduções nas necessidades de arrefecimento de 21%, 31% e 37% respectivamente.

Na estação de aquecimento, considera-se um caudal de ventilação constante e igual ao valor mínimo durante os períodos de ocupação e de almoço ( $1,87 \text{ rph}$ ) e de  $0,5 \text{ rph}$  nos restantes períodos de tempo. Quando a temperatura interior é superior a  $24,8^\circ\text{C}$ , admite-se *free-cooling* com um caudal de 3 rph, pois corresponde a períodos em que os espaços se podem encontrar ocupados.

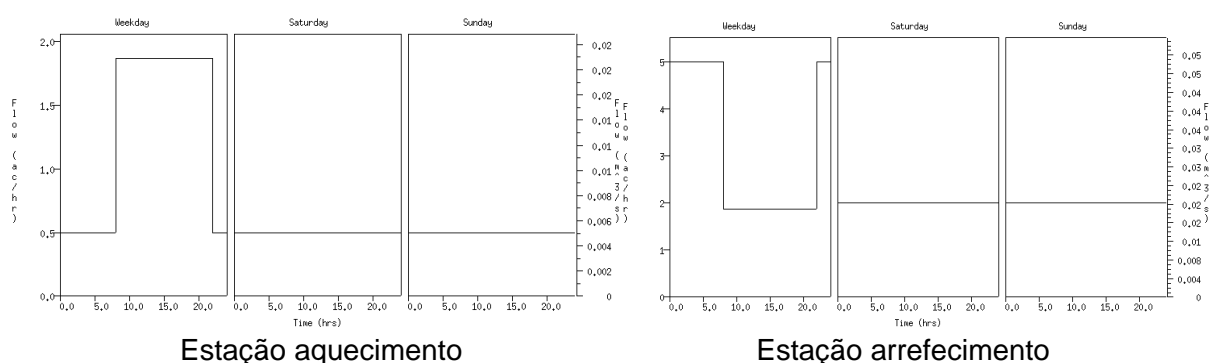


Figura 4.66 - Representação dos caudais de ar para o estudo paramétrico do gabinete

#### 4.2.3.5 - Clima

Com o objectivo de avaliar o impacte dos envidraçados no clima Português foram adoptados os dados dos anos climáticos de referência das localidades com climas que se enquadram nas zonas climáticas I1, I2 e I3 e V1, V2 e V3. No Quadro 4.44 encontram-se as

localidades correspondentes a cada zona climática. Na estação de arrefecimento consideraram-se os períodos compreendidos entre 1 Junho e 30 de Setembro e a estação de aquecimento o restante período de tempo.

Quadro 4.44 - Correspondência entre a zona climática e o ano climático adoptado neste estudo

Zona Climática	Localidade	Zona Climática	Localidade
I1	Lisboa	V1	Porto
I2	Porto	V2	Lisboa
I3	Bragança	V3	Évora

Apesar de Lisboa se situar na Zona I1 e o Porto na Zona I2, nos anos climáticos de referência dessas localidades o número de graus dias de aquecimento é relativamente próximo 1416 GD<sub>20</sub> Lisboa e 1659 GD<sub>20</sub> Porto.

#### 4.2.3.6 - Resultados do estudo paramétrico

Para realizar o estudo foi implementado no modelo de simulação térmica ESP-r a configuração indicada na Figura 4.67, tendo sido determinados os ganhos térmicos e as necessidades de aquecimento e de arrefecimento para cada um dos casos, sendo por fim determinadas as necessidades energéticas anuais de iluminação, equipamentos, aquecimento e arrefecimento. Na determinação das necessidades térmicas foi considerada uma temperatura operativa de 20°C no Inverno e de 25°C no Verão (capítulo 3). Na determinação das necessidades energéticas anuais foi considerada a utilização de uma bomba de calor com um COP de 3.

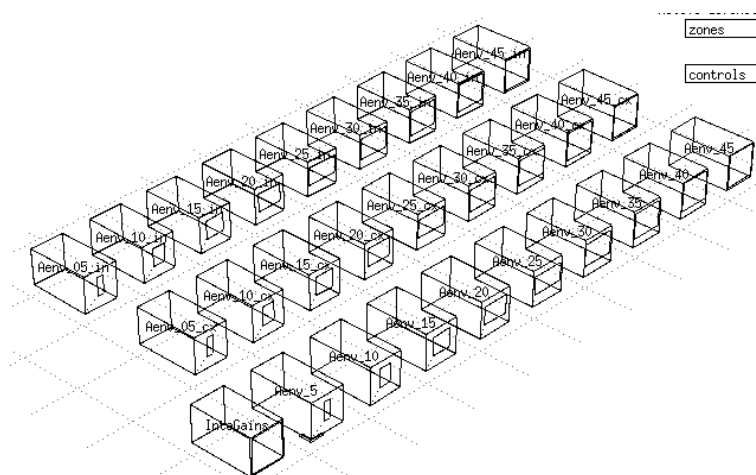


Figura 4.67 - Modelo do estudo paramétrico

Seguidamente apresentam-se alguns dos resultados obtidos para cada uma das orientações e por fim efectua-se uma síntese e apresentam-se valores de referência de consumo nominal de energia num edifício de escritórios.

Tendo em conta o elevado número de casos estudados na leitura dos gráficos seguintes deve atender-se ao indicado na Figura 4.68. Ou seja, nas abcissas encontra-se indicada a relação área envidraçada/área de pavimento com incrementos de 0,05. Para cada zona climática, os primeiros resultados correspondem à solução com o estore veneziano situado no exterior, depois na caixa-de-ar e por fim no lado interior.

- Para cada caso estudado são apresentados os seguintes resultados:
- estação de aquecimento: necessidades nominais de aquecimento (20°C)
  - estação de arrefecimento: necessidades nominais de arrefecimento (25°C)
  - anual I1+V1,V2;V3: corresponde às necessidades energéticas anuais de edifícios situados nas zonas climáticas I1+V1, I1+V2, I1+V3 em que se admite um COP de 3 para aquecimento e arrefecimento, sendo a energia anual a correspondente à soma da energia dos equipamentos, iluminação, energia de aquecimento e energia de arrefecimento
  - anual I1;I2,I3+V1: corresponde às necessidades energéticas anuais de edifícios situados nas zonas climáticas I1+V1, I2+V2, I3+V1 em que se admite um COP de 3 para aquecimento e arrefecimento, sendo a energia anual a correspondente à soma da energia dos equipamentos, iluminação, energia de aquecimento e energia de arrefecimento

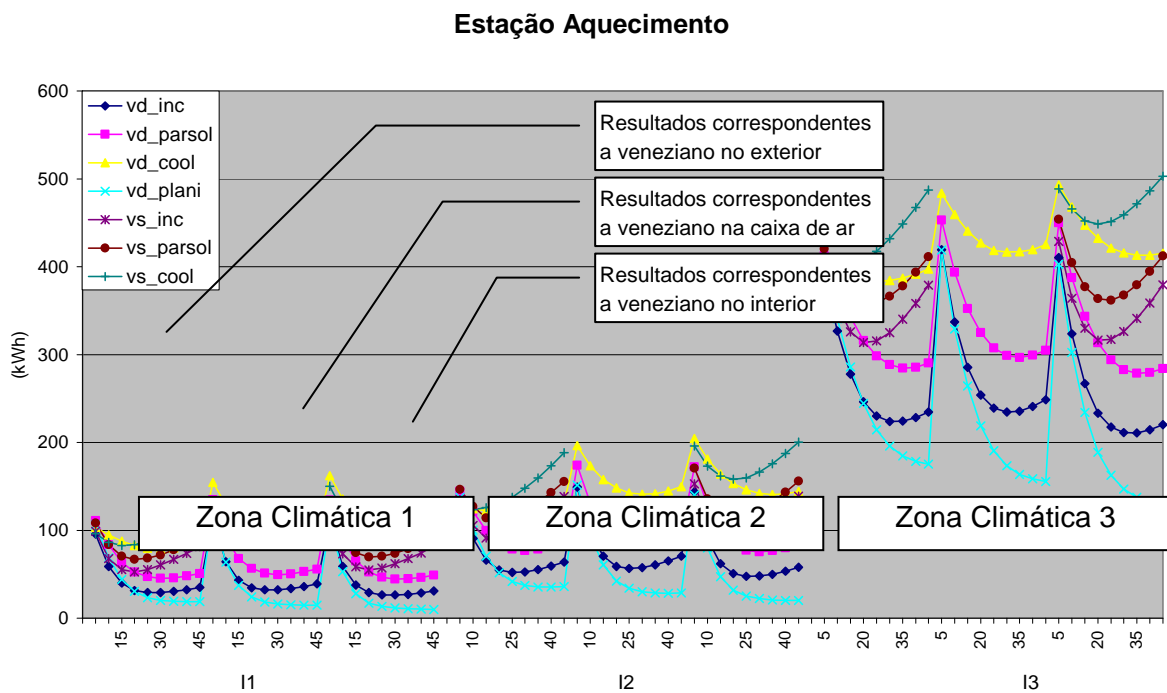


Figura 4.68 - Simbologia para análise dos gráficos de resultados

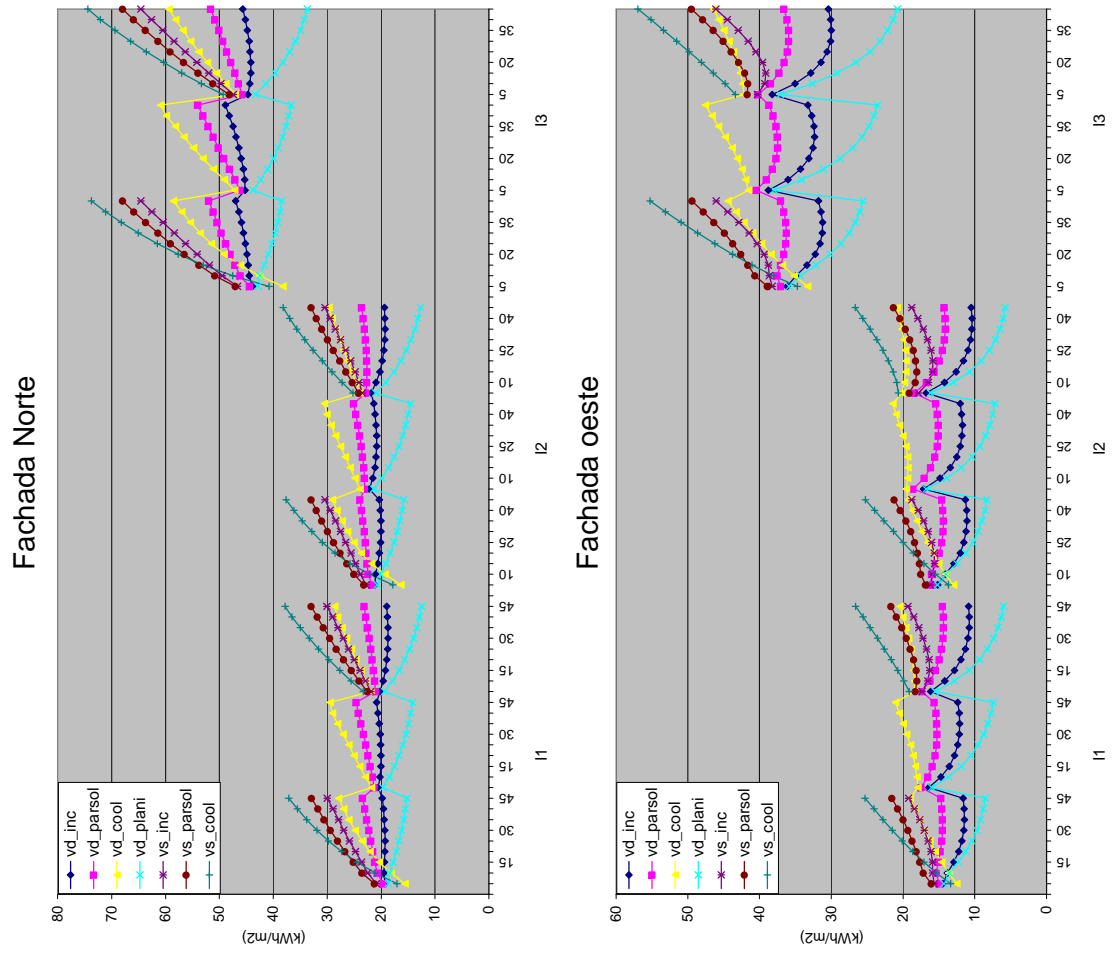


Figura 4.69 - Necessidades nominais de aquecimento



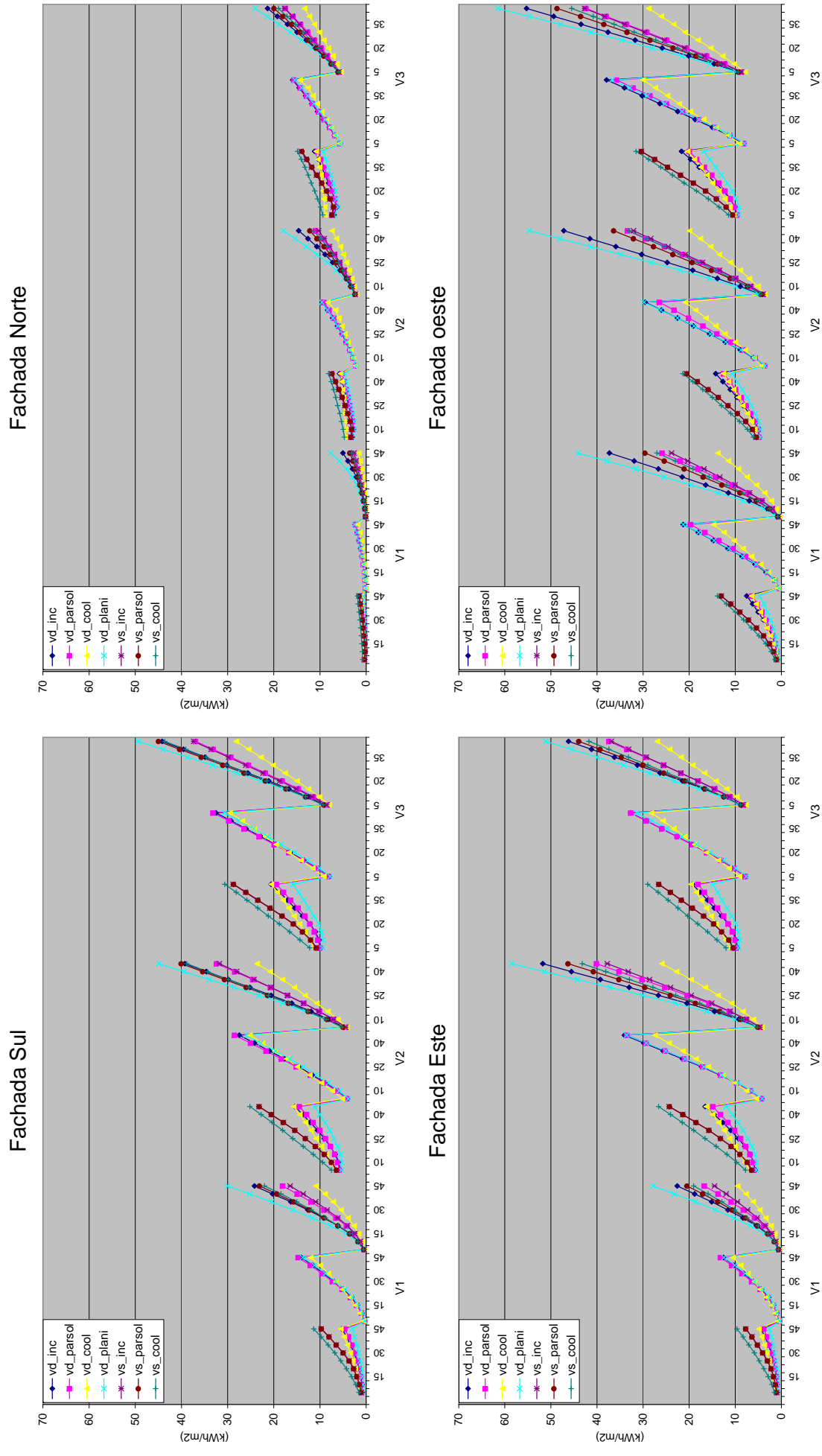


Figura 4.70 - Necessidades nominais de arrefecimento

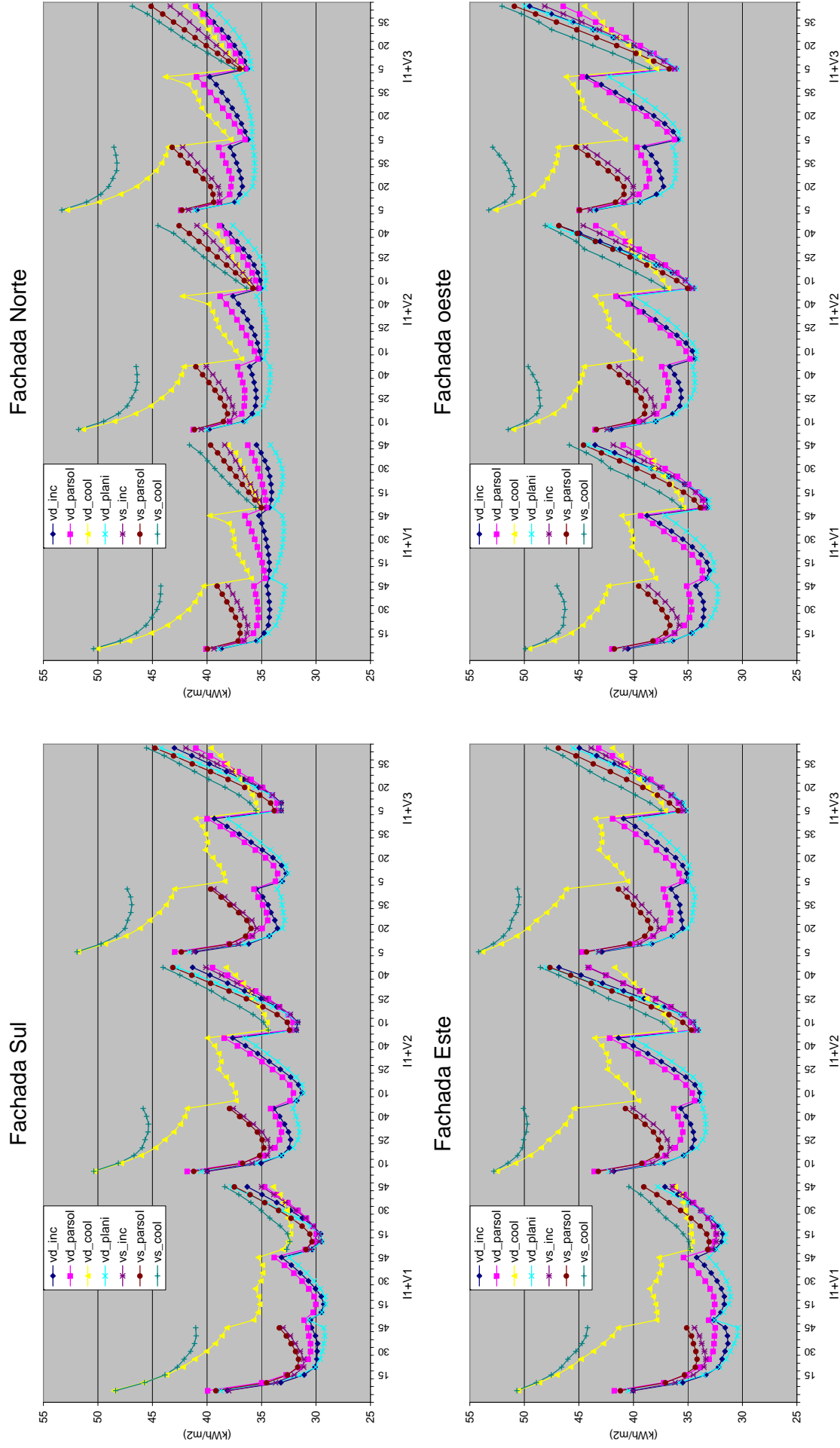


Figura 4.71 - Necessidades energéticas anuais, incluindo aquecimento, arrefecimento, iluminação e equipamentos I1+V1, V2, V3

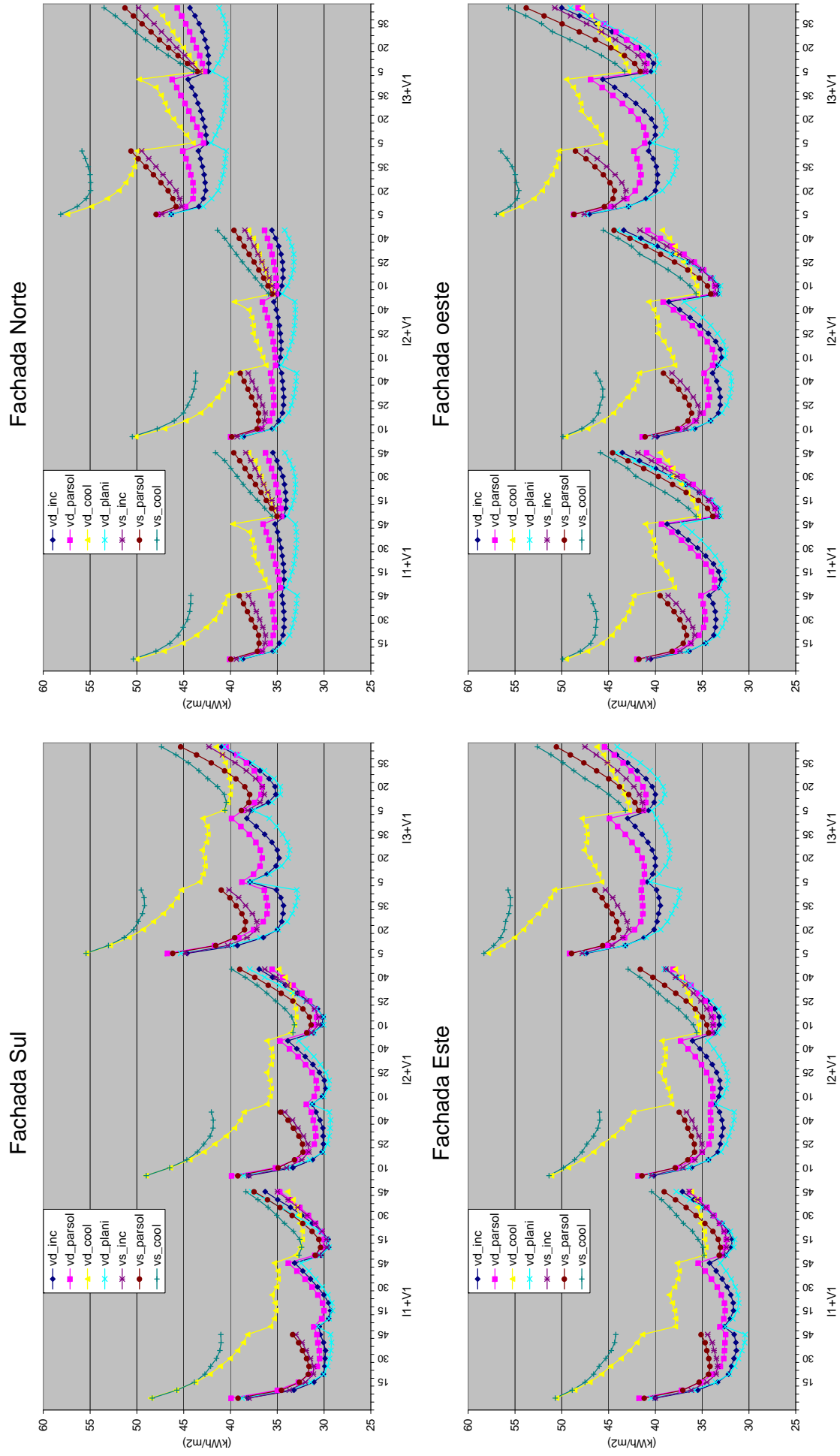


Figura 4.72 - Necessidades energéticas anuais, incluindo aquecimento, arrefecimento, iluminação e equipamentos I1,I2,I3+V1

Dos resultados obtidos verifica-se que as necessidades de aquecimento de uma forma geral diminuem com o incremento da área envidraçada para o vidro duplo, devido às perdas térmicas por condução serem compensadas pelos ganhos solares pelos envidraçados, com excepção da solução com vidro reflectante que apresenta um baixo factor solar e da fachada norte em que se regista um aumento das necessidades de aquecimento com os vidros reflectante e absorvente, Figura 4.69. Na estação de arrefecimento para todos os casos verifica-se um incremento das respectivas necessidades de arrefecimento com o aumento da área envidraçada, Figura 4.70.

Na Figura 4.71 e na Figura 4.72 apresentam-se os resultados das estimativas das necessidades energéticas anuais para os diferentes tipos de vidro, onde são perceptíveis os efeitos cumulativos das necessidades de aquecimento, arrefecimento e de iluminação em função da variação da área envidraçada. Dos resultados obtidos verifica-se o seguinte:

- A adopção de vidros reflectantes com baixa transmitância luminosa apresentam o pior desempenho energético devendo ser evitada a sua utilização, pois aumentam as necessidades energéticas de iluminação e de aquecimento, apesar de reduzirem as necessidades de arrefecimento (Figura 4.73). Nesse sentido deve ser dada preferência à adopção de vidros incolores.
- De uma forma geral a solução de vidro duplo apresenta necessidades energéticas inferiores às dos vidros simples.
- As necessidades energéticas para os vidros duplos são minimizadas para áreas envidraçadas da ordem dos valores indicados no Quadro 4.45.
- Com vidros duplos baixo emissivos e protecção solar exterior a minimização das necessidades energéticas é tanto maior quanto maior a área envidraçada.
- A solução que permite maximizar a área envidraçada é a correspondente à solução de vidro com protecção solar exterior.
- Para envidraçados a norte regista-se uma variação menos acentuada das necessidades energéticas com a área envidraçada, face às restantes exposições.
- Neste tipo de edifícios existe uma fracção importante das necessidades de arrefecimento entre Outubro e Maio, que não é eliminada simplesmente com o aumento da taxa de ventilação para 3 rph, sendo necessário alterar a gestão do sombreamento e ventilação diurna para o modo de verão (Figura 4.73). Esta parcela das necessidades de arrefecimento não foi considerada neste estudo.

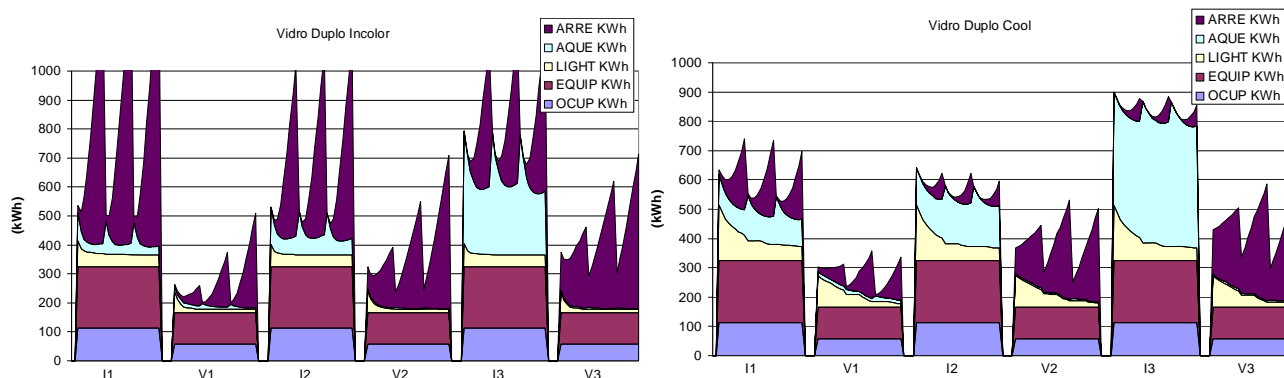


Figura 4.73 - Ganhos térmicos internos e necessidades de aquecimento e de arrefecimento - Fachada sul

Em face destes resultados pode referir-se que se forem aplicadas protecções solares exteriores se poderá adoptar uma área envidraçada situada entre 0,20 a 0,30 da área de pavimento, enquanto se forem aplicadas protecções solares pelo interior a área envidraçada deve ser limitada a 0,20, devendo ser adoptado tipicamente o valor de 0,15. No cálculo da área de pavimento deve considerar-se uma profundidade correspondente no máximo a 3 vezes o ponto mais alto do envidraçado. No caso de serem adoptados vidros baixo emissivos e protecção solar exterior será admissível aplicar áreas envidraçadas superiores.

Quadro 4.45 - Relação Avidro/Apavimento que minimiza o consumo energético anual (%)

Zona Climática	Sul			Norte			Este			Oeste		
	Ex	Cx	In	Ex	Cx	In	Ex	Cx	In	Ex	Cx	In
I1+V3	20	10	10	20	10	10	20	10	10	20	10	10
I1+V2	25	10	10	25	10	10	25	10	10	25	10	10
I1+V1	25	15	15	30	15	15	40	15	15	30	10	10
I2+V1	25	15	15	25	20	20	35	15	15	25	10	10
I3+V1	30	20	20	25	10	15	35	15	15	25	10	10

Na secção 4.2.3.9 evidencia-se o impacte das condições de conforto adaptativo e da inércia térmica.

#### 4.2.3.7 - Análise do efeito de uma pala horizontal a sul

Tendo em conta a vantagem das protecções solares exteriores foi analisado o impacto num gabinete exposto a sul da aplicação de uma pala de sombreamento com um comprimento “otimizado” de 0,5 da altura do envidraçado, Figura 4.74. Os resultados das necessidades energéticas são apresentados na Figura 4.75 e na Figura 4.76. No Quadro 4.46 apresenta-se a estimativa da dimensão do envidraçado que minimiza as necessidades energéticas no caso de se encontrar exposto a sul e protegido por uma pala com um comprimento de 0,5 m da sua altura.

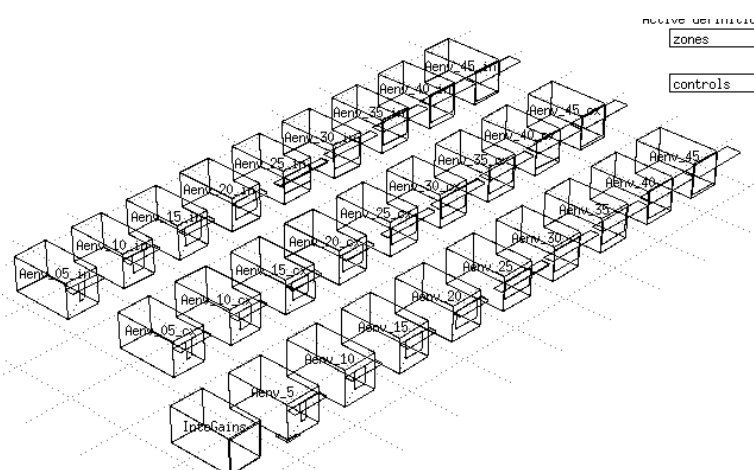


Figura 4.74 - Modelo do estudo paramétrico com pala

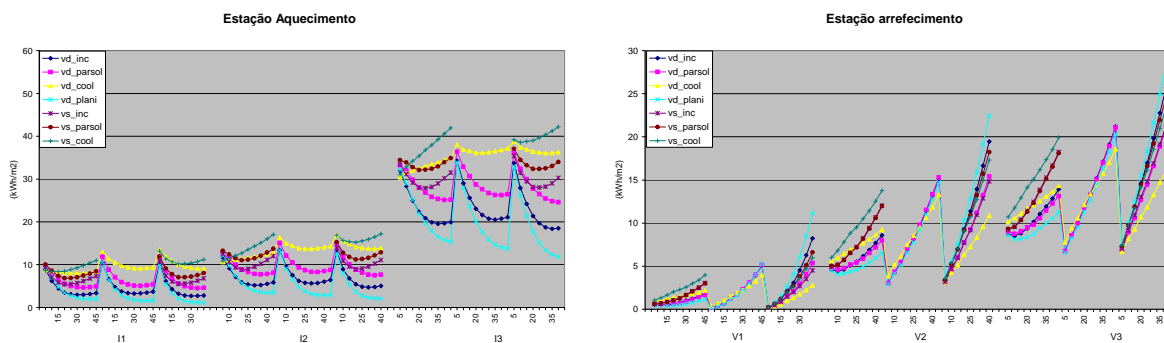


Figura 4.75 - Necessidades nominais de aquecimento e de arrefecimento para gabinete com pala de sombreamento exterior - Fachada sul

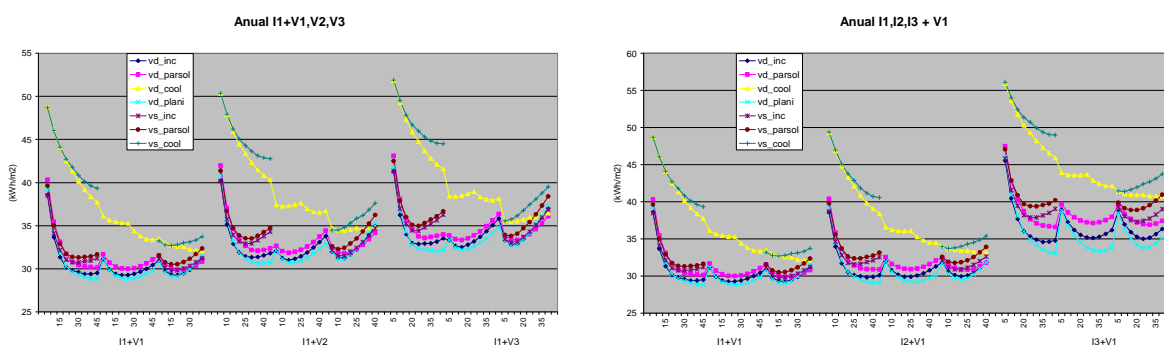


Figura 4.76 - Necessidades energéticas anuais arrefecimento para gabinete com pala de sombreamento exterior - Fachada sul

Quadro 4.46 - Relação Avidro/Apavimento que minimiza o consumo energético anual - envidraçado exposto a sul (%)

Zona Climática	Sem pala			Com pala		
	Ex	Cx	In	Ex	Cx	In
I1+V3	20	10	10	25	15	10
I1+V2	25	10	10	30	15	15
I1+V1	25	15	15	35	25	20
I2+V1	25	15	15	35	25	20
I3+V1	30	20	20	35	30	25

De acordo com os valores da relação área envidraçada/área de pavimento que minimizam as necessidades energéticas anuais conclui-se que a utilização de palas de sombreamento é particularmente interessante para reduzir as necessidades de arrefecimento e as necessidades energéticas anuais e permitir incrementar a área envidraçada sem comprometer o desempenho térmico.

#### 4.2.3.8 - Necessidades energéticas

Com base nos valores obtidos para os casos estudados, no Quadro 4.47 compilam-se as estimativas das necessidades de climatização e no Quadro 4.48 as estimativas das necessidades energéticas anuais para iluminação, equipamentos e climatização, admitindo aquecimento e arrefecimento com uma bomba de calor e um COP de 3, o valor por defeito do RSECE.

Quadro 4.47 - Necessidades térmicas (kWh/m<sup>2</sup>)

Zona Climática	Sul		Norte		Este		Oeste		Sul pala	
	Aq	Arre	Aq	Arre	Aq	Arre	Aq	Arre	Aq	Arre
1	2,0	3,0	17,5	0,5	6,7	2,7	10,4	3,7	2,7	1,1
2	3,4	8,1	18,2	3,4	11,4	8,4	10,4	7,4	4,7	5,7
3	15,2	11,1	40,7	6,7	29,6	10,4	28,3	11,4	17,8	9,1

Quadro 4.48 - Necessidades energéticas anuais de electricidade (kWh/m<sup>2</sup>/ano)

Zona Climática	Sul	Norte	Este	Oeste	Sul pala
I1+V3	30,6	33,3	32,3	34,0	30,0
I1+V2	29,3	32,3	31,3	32,3	28,6
I1+V1	27,3	31,0	28,6	30,6	<b>26,6</b>
I2+V1	27,3	31,3	29,6	30,6	26,9
I3+V1	31,3	<b>38,7</b>	36,0	36,0	31,3

Em face das condições fronteira estabelecidas regista-se que as necessidades energéticas anuais de electricidade variam entre 26,6 e 38,7 kWh/m<sup>2</sup>/ano ou seja 7,7 a 11,2 kgep/m<sup>2</sup>/ano.

Estes valores das necessidades energéticas são relativamente baixos, ao nível de edifícios de elevada eficiência energética referidos no capítulo 2. No entanto estes valores relativamente baixos não são de estranhar (ver secção 4.2.3.9) pois se fosse considerado o funcionamento contínuo da iluminação artificial de 15 W/m<sup>2</sup>, 10 h/dia e equipamentos com uma potência de 15 W/m<sup>2</sup> tal corresponderia a um acréscimo do consumo anual de energia superior a 60 kWh/m<sup>2</sup> (17 kgep/m<sup>2</sup>/ano), revelando a importância da utilização de equipamentos eficientes e uma iluminação eficiente e com controlo (manual ou automático). Por outro lado, nos valores do Quadro 4.48 não se encontram incluídas as parcelas correspondentes a servidores, ventilação, elevadores, bombas, sistema de vigilância, equipamento de limpeza, etc

**No entanto, os valores do Quadro 4.48 configuram um limiar para a eficiência energética de edifícios de escritório pois como condições de fronteira apenas foi adoptada uma área envidraçada optimizada com vidro duplo incolor, com estore veneziano, iluminação artificial (10 W/m<sup>2</sup>) e controlo *dimming* e uma potência média absorvida por posto de trabalho de 100 W.**

Do consumo de energia indicado no Quadro 4.48, cerca de 70% a 97% refere-se aos equipamentos e ao consumo de iluminação (Quadro 4.43). Deste modo, em edifícios com envidraçados de dimensão “contida” (Quadro 4.45 e Quadro 4.46), com controlo razoável da protecção solar, com iluminação artificial eficiente e controlada e cargas de equipamentos limitadas, as necessidades energéticas para climatização são sensivelmente 3% a 30% das necessidades energéticas do edifício, consoante a zona climática.

#### 4.2.3.9 - Apreciação do impacto do conforto adaptativo, inércia térmica e ganhos térmicos internos

Com o objectivo de apreciar o impacte dos critérios de conforto adaptativo, da inércia térmica, do incremento da ventilação e do aumento dos ganhos internos foi efectuado o estudo do Gabinete exposto a Sul com as seguintes características:

- Caso 1: caso igual ao caso estudado na secção anterior com área envidraçada de 15% da área de pavimento, equipamentos  $7,4 \text{ W/m}^2$  (100 W), iluminação  $10 \text{ W/m}^2$  (135 W), taxa de ventilação 1,87 rph e controlo com base na temperatura operativa de  $18^\circ\text{C}$  e  $27^\circ\text{C}$ ;
- Caso 2: igual ao caso 1 em que o controlo é efectuado com base na temperatura operativa de  $20^\circ\text{C}$  e  $25^\circ\text{C}$ ;
- Caso 3: igual ao caso 2 mas controlo com base na temperatura do ar de  $20^\circ\text{C}$  e  $25^\circ\text{C}$ ;
- Caso 4: igual ao caso 3 em que em vez de ser adoptado o pavimento sobre-elevado e o tecto falso, foi considerado que a laje de betão se encontra exposta ao ambiente interior aumentando a inércia térmica;
- Caso 5: igual ao caso 3 em que o caudal de ventilação nos períodos de ocupação foi acrescido de 50% (2,8 rph);
- Caso 6: as cargas internas são superiores às dos casos anteriores, equipamentos  $15 \text{ W/m}^2$  (202 W) iluminação  $15 \text{ W/m}^2$  acrescido das perdas no balastro de 1,25 (253 W) e controlo da temperatura do ar  $20^\circ\text{C}$  e  $25^\circ\text{C}$ ;
- Caso 7: caso igual ao caso 6 em que se considera a iluminação sempre ligada;
- Caso 8: caso igual ao caso 7 em que não se considera a existência do estore veneziano;
- Caso 9: caso igual ao caso 7 em que se considera uma temperatura operativa de  $22^\circ\text{C}$  e  $23^\circ\text{C}$ ;
- Caso 10: caso igual ao caso 7 em que se adopta envidraçado de 40% da área de pavimento.

Foram considerados os envidraçados referidos na secção anterior, tendo sido considerados dois casos, um correspondente à utilização de estore veneziano pelo exterior e outro correspondente à aplicação do estore veneziano pelo interior. Nas figuras seguintes apresentam-se os resultados obtidos.

De acordo com os resultados obtidos e apresentados nas figuras anteriores evidencia-se que a utilização de sistemas de iluminação pouco eficientes e com funcionamento contínuo, bem como maiores densidades de cargas internas de equipamentos (casos 6, 7, 8, 9 e 10) conduzem a necessidades energéticas anuais elevadas, de sensivelmente  $100 \text{ kWh/m}^2$ . Deste modo, uma das principais formas de reduzir as necessidades energéticas e o impacte ambiental dos edifícios passa por adoptar sistemas de iluminação eficientes (quer em termos de potência quer em relação ao controlo do seu funcionamento) e equipamentos eficientes, por exemplo PC com monitor TFT ou PC portáteis. A adopção destes equipamentos de menor consumo de energia além de reduzir directamente as necessidades energéticas, também reduz as necessidades térmicas de arrefecimento em cerca de 50%, agravando contudo as necessidades de aquecimento (Figura 4.77 e Figura 4.78).



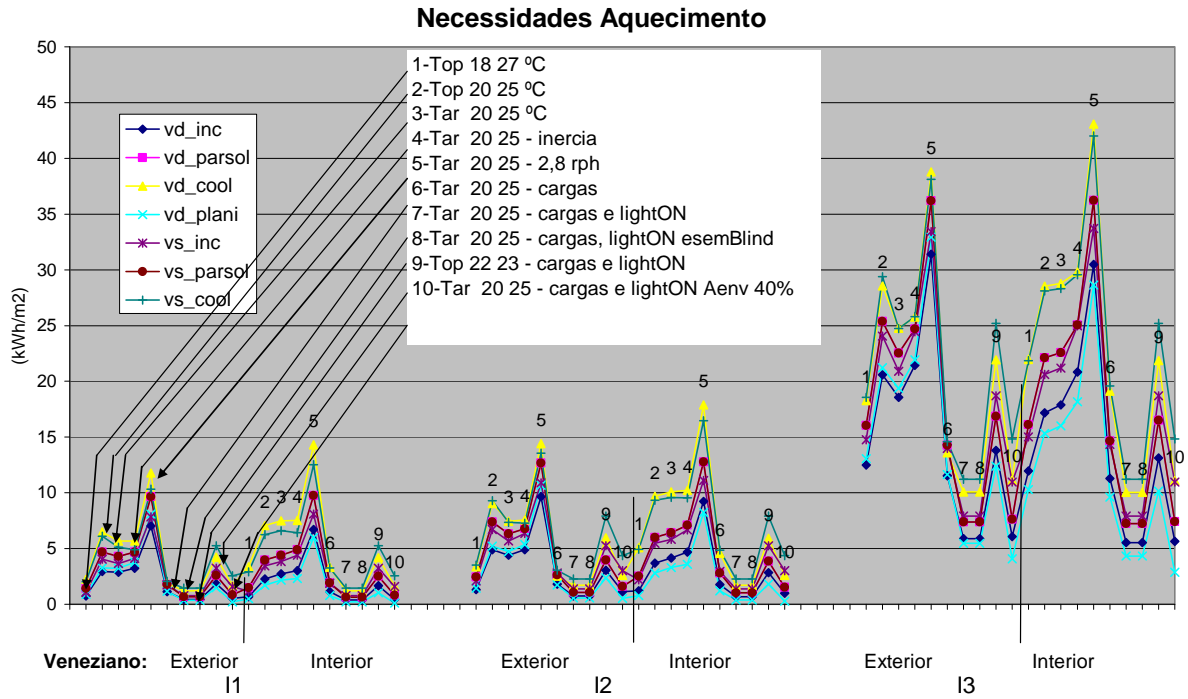


Figura 4.77 - Necessidades nominais de aquecimento do gabinete - Fachada sul

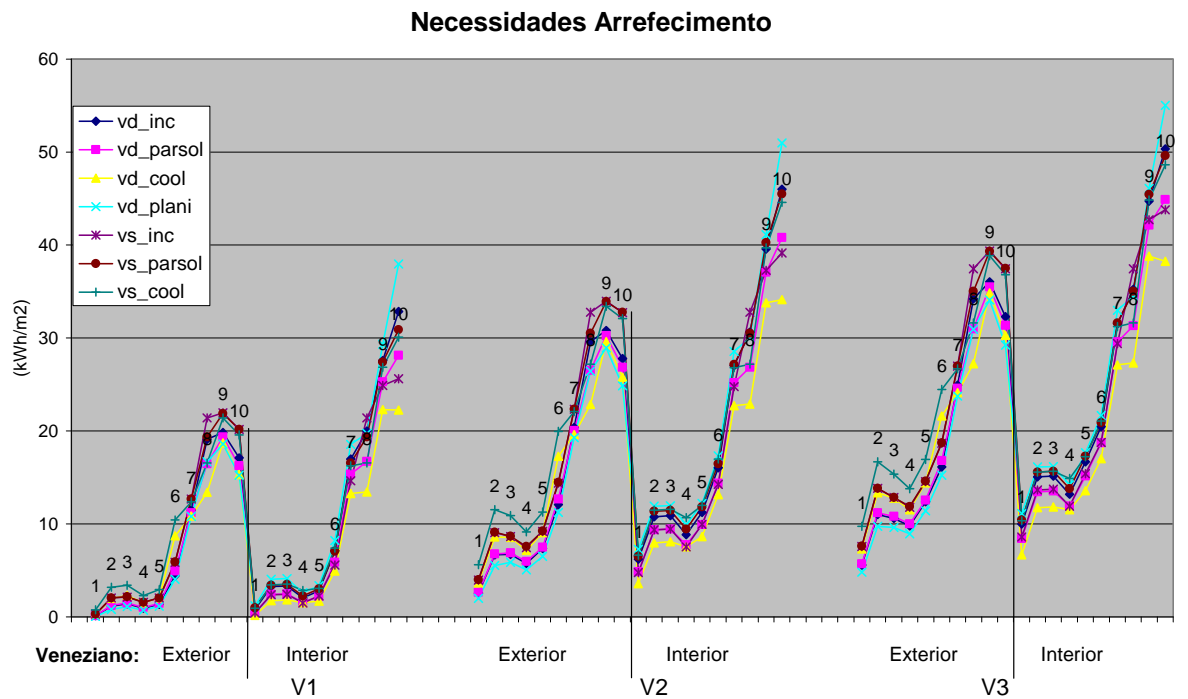


Figura 4.78 - Necessidades nominais de arrefecimento do gabinete - Fachada sul

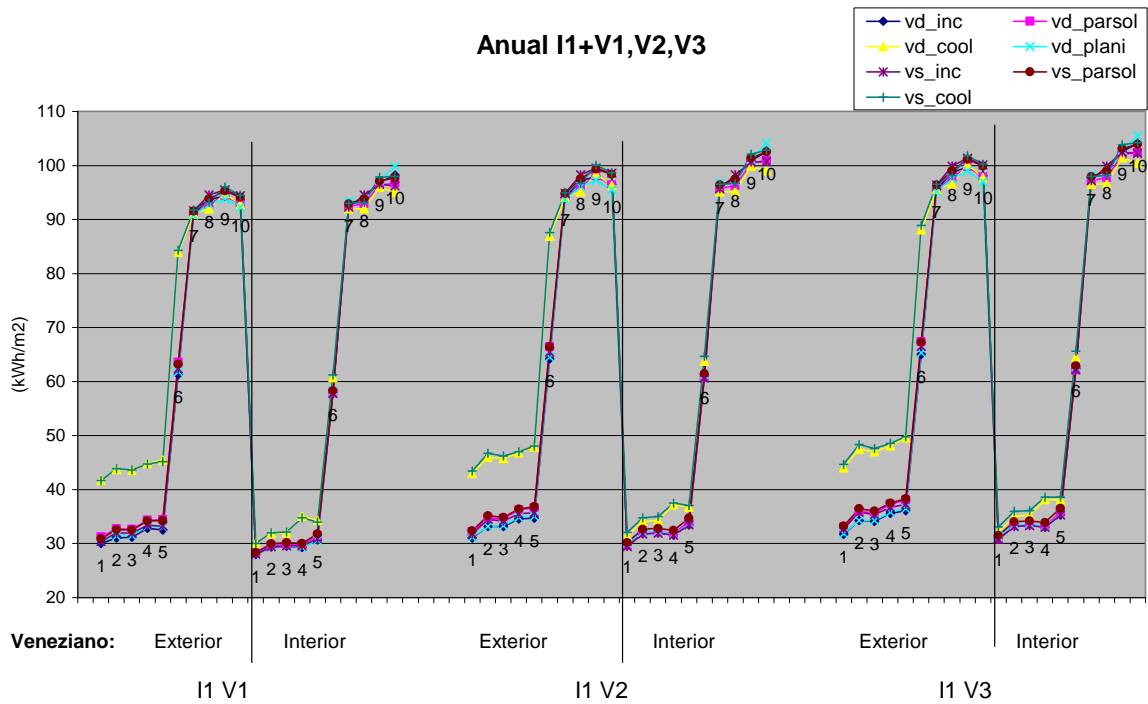


Figura 4.79 - Necessidades energéticas anuais, incluindo aquecimento, arrefecimento, iluminação e equipamentos I1+V1,I1+V2,I1+V3 - Fachada sul

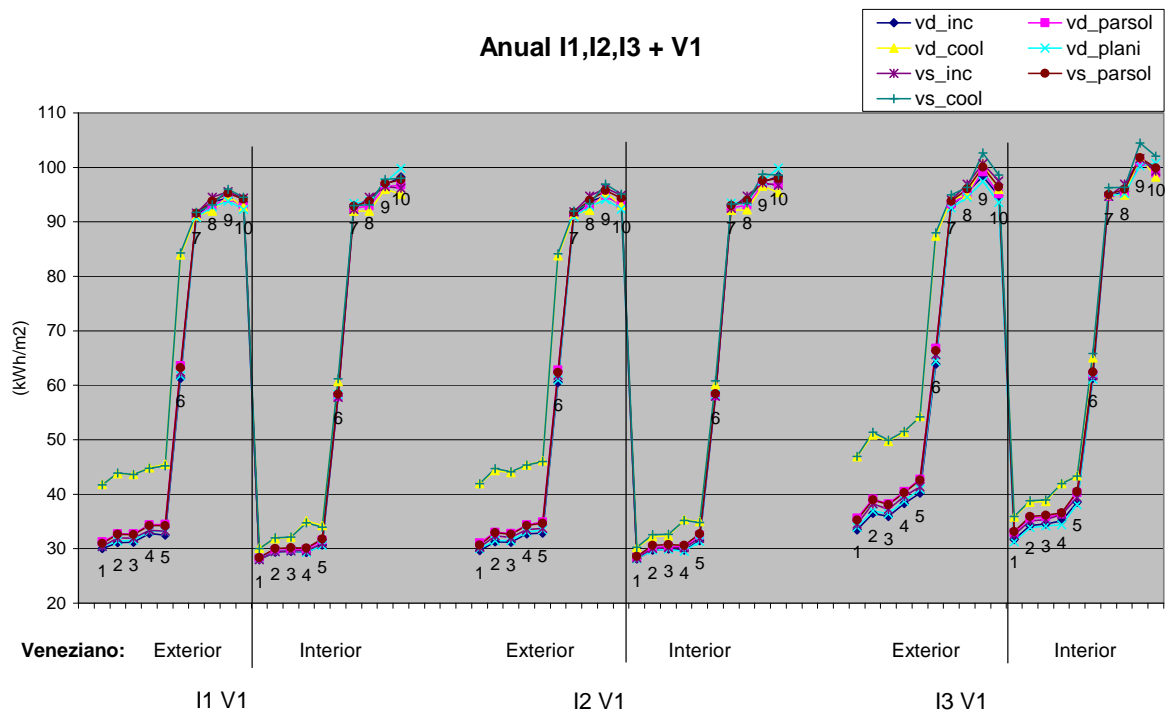


Figura 4.80 - Necessidades energéticas anuais, incluindo aquecimento, arrefecimento, iluminação e equipamentos I1+V1,I2+V1,I3+V1 - Fachada sul

Seguidamente apresentam-se algumas conclusões deste estudo:

- **Considerar a condição de conforto adaptativo (caso 1 - temperatura operativa de 18°C e 27°C) permite reduzir em sensivelmente 50% as necessidades de climatização face à condição de temperatura operativa de 20°C e 25°C (caso 2). Além disso, esta maior tolerância com as condições de conforto permite reduzir o número de horas em que é necessário aquecimento ou arrefecimento. Por exemplo, para a situação com vidro duplo incolor e na zona climática I1 e V1 o número de horas de aquecimento previsto é de 80 h (4,7% do tempo) e 22 h de arrefecimento (2,5% do tempo de trabalho dos 4 meses da estação de arrefecimento), enquanto se for considerado o critério 20°C/25°C esse número de horas é de 270h (aquecimento) e 160h de arrefecimento. Deste modo, e face aos critérios apresentados no capítulo 3 seria razoável dispensar o sistema de aquecimento e de arrefecimento na zona climática I1/V1. Para as outras zonas climáticas o número de horas de “desconforto” mesmo na condição adaptativa é significativamente maior, 210 horas na zona V2, 400 horas na zona V3, 165 h na zona I2 e 640 h na zona I3.**
- **A comparação dos resultados do caso 2 e 3 permite evidenciar o efeito da temperatura superficial do vidro nas necessidades de climatização, mesmo para envidraçados de dimensão limitada, pois as necessidades de climatização previstas com base na temperatura operativa podem ter variações de sensivelmente 20% face às previstas com base na temperatura do ar, em conformidade com o que foi referido no capítulo 2.**
- **O acréscimo do caudal de ar em 50% durante os períodos de ocupação aumenta substancialmente as necessidades de aquecimento, entre 60% na zona I3 a 120% na zona I1. Contudo, o aumento da ventilação permite reduzir as necessidades de arrefecimento em sensivelmente 10% na zona climática V1 (estore veneziano no interior) e tem um efeito desprezável para a situação do estore aplicado pelo exterior. Na zona climática V3 o aumento do caudal aumenta as necessidades de arrefecimento em sensivelmente 15% para o estore aplicado pelo exterior e em 10% para a situação com estore pelo interior. Pelo que, ao aumentar o caudal de ar agravam-se as necessidades energéticas anuais do gabinete.**
- **A inércia térmica da laje permite reduzir as necessidades de arrefecimento em sensivelmente 30% na zona V1, 15% na zona V2 e 10% na zona V3. Por seu lado a inércia térmica da laje agrava as necessidades de aquecimento em sensivelmente 10%. Este aspecto é compreensível, pois está-se na presença de edifícios com ocupação diurna, nos quais uma baixa inércia térmica possibilita uma “rápida” conversão dos ganhos solares em aquecimento do ambiente interior, reduzindo as necessidades de aquecimento. Pela Figura 4.79 e Figura 4.80, verifica-se que na condição de ser aplicada uma protecção solar pelo exterior a existência de uma maior inércia térmica agrava ligeiramente as necessidades energéticas, enquanto se a protecção solar for interior esta promoverá uma ligeira redução dessas necessidades.**
- **O aumento das cargas térmicas mantendo o controlo da iluminação (comparação do caso 6 com o 3) conduz a um agravamento substancial das necessidades de arrefecimento e das necessidades energéticas em 100%. A ausência de controlo da iluminação (iluminação sempre ligada durante as horas de trabalho) conduz a**

- um agravamento suplementar das necessidades de arrefecimento e das necessidades energéticas do edifício (comparação do caso 7 com o caso 3).*
- *Caso fosse adoptado um grande envidraçado (comparação caso 10 com o 7) pode verificar-se um incremento substancial das necessidades de arrefecimento de sensivelmente 8 kWh/m<sup>2</sup> com protecção solar exterior e 15 kWh/m<sup>2</sup> com protecção solar interior. Este agravamento corresponde a um acréscimo das necessidades de arrefecimento de sensivelmente 30% a 90%, dependendo dos casos.*
  - *Caso o controlo das condições de conforto seja baseado numa temperatura interior de 22°C na estação de aquecimento e de 23°C na estação de arrefecimento, existe um agravamento suplementar das necessidades de climatização face às condições de referência de 20°C/25°C (comparação do caso 9 com o caso 7) e nestas circunstâncias as necessidades de aquecimento podem aumentar entre 4 a 12 kWh/m<sup>2</sup> e as necessidades de arrefecimento em 12 kWh/m<sup>2</sup>;*
  - *Comparando o caso 8 com o 7, pode-se apreciar o efeito da ausência do estore veneziano, registando-se um agravamento significativo das necessidades de arrefecimento no caso do estore exterior (cerca de 6 kWh/m<sup>2</sup>) e menor no caso deste ser interior (cerca de 2 kWh/m<sup>2</sup>).*

Destes resultados verifica-se que num edifício com baixas cargas térmicas e com controlo da iluminação as necessidades energéticas anuais variam entre 30 a 40 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto num edifício com condições de conforto mais restritas e maiores cargas de equipamento e iluminação as necessidades energéticas são de sensivelmente 100 kWh/m<sup>2</sup>, Quadro 4.49. Deste modo, na optimização energética dos edifícios deve privilegiar-se a redução dos consumos (potências) dos sistemas de iluminação, nos equipamentos e no controlo do seu funcionamento. De forma paralela deve ser também optimizada a envolvente e alargadas tanto quanto possível as condições de conforto, pois desta forma em muitos casos será possível dispensar a instalação de sistemas de climatização mecânica, reduzindo custos e impactes na construção e durante a utilização.

Quadro 4.49 - Valores indicadores das necessidades energéticas anuais dos casos de estudo para gabinete exposto a sul

Clima	Necessidades energéticas anuais kWh/m <sup>2</sup>	
	Caso 2	Caso 9
I1V3	36	104
I1V2	33	102
I1V1	30	97
I2V1	33	98
I3V1	40	102

Se aos valores de maior consumo de energia fosse acrescentado o consumo de energia de elevadores, ventiladores, bombas, bem como no caso de espaços interiores (que apresentam iluminação sempre ligada) obtinham-se valores na gama dos valores típicos de edifícios de escritórios, conforme indicado no capítulo 2. Os valores mais baixos das necessidades energéticas do caso 2 encontram-se na gama dos valores publicados noutros países para edifícios de “elevada” eficiência energética, evidenciando que para o clima

Português é possível obter baixos consumos de energia com recurso a soluções construtivas relativamente correntes, podendo com soluções passivas serem ainda mais reduzidas as necessidades energéticas associadas à climatização.

#### 4.2.4- Edifícios de serviços do tipo administrativo - Solução de fachada dupla pele

As soluções de fachada dupla pele de alumínio e vidro compreendem uma grande variedade de soluções (Lieb, 2001), quer em relação aos vidros aplicados (Vidro duplo+vidro simples; vidro simples+vidro duplo, vidro simples+vidro simples), ao fluxo de ar no canal de ar (fechado, ventilado só para o exterior, ventilado só para o interior e em alguns casos existe comunicação entre o exterior e o interior), quer em relação à impulsão da ventilação no canal (ventilação natural, ventilação mecânica), quer em relação à sua compartimentação (*box window*, 1 piso de altura e a toda a largura do piso, vários pisos de altura com compartimentação vertical, etc), protecção solar aplicada, etc. Estas fachadas foram desenvolvidas inicialmente nos países do norte da Europa, tentando maximizar o isolamento térmico dos envidraçados, possibilitar uma maior captação de luz e sol, aumentar o isolamento sonoro de grandes envidraçados e proteger os dispositivos de sombreamento. A este tipo de fachadas são apontados alguns inconvenientes, nomeadamente, maior custo inicial, desempenho térmico não muito superior (ou pior) do que as fachadas-cortina tradicionais (Straube, 2002), impossibilidade de abertura de janelas para contacto directo com o exterior (nestes casos não são aplicáveis os princípios do conforto adaptativo), eventuais problemas de segurança contra incêndio, eventuais problemas de transmissão de ruído e poluentes do ar através do canal entre espaços adjacentes.

Apesar de existirem inúmeros estudos Finlandeses, Belgas, Francês onde são apontadas as vantagens da utilização de fachadas dupla-pele é interessante registar a conclusão de Straube (2002), onde refere que as fachadas duplas são uma solução para minimizar os problemas de elevado consumo de energia e conforto associados a grandes áreas envidraçadas, pois existem outras soluções técnicas que permitiam resolver o problema, como a utilização de uma menor área envidraçada, como também se concluiu na secção anterior.

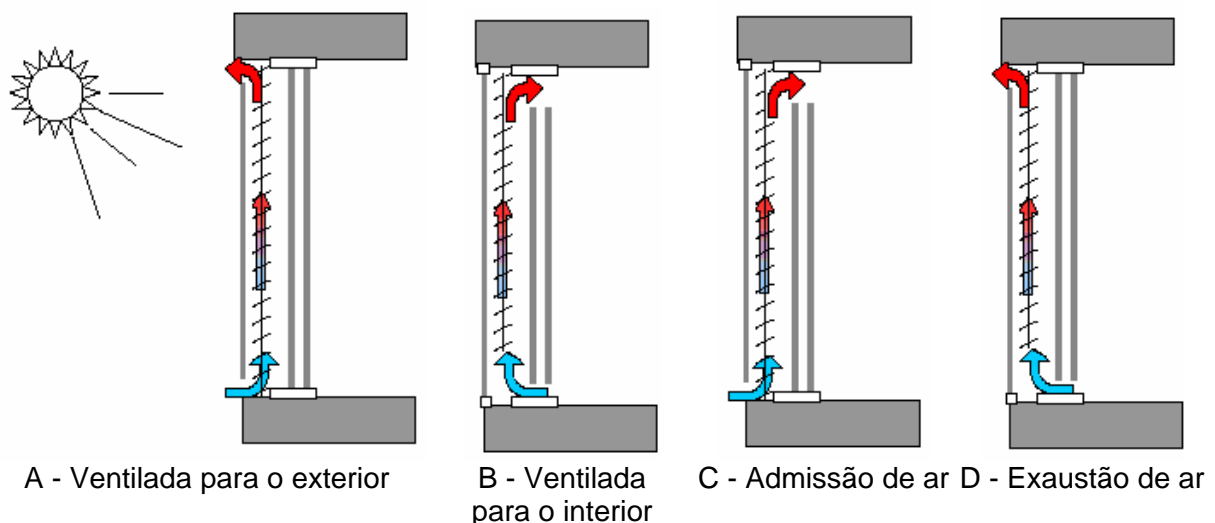


Figura 4.81 - Exemplo de princípio de funcionamento de fachadas dupla-pele de 1 piso de altura

Nesta secção avalia-se o desempenho térmico de uma fachada dupla pele no clima Português e tenta identificar-se as vantagens de desempenho térmico face a uma solução de fachada tradicional. Neste estudo é efectuada a análise para a situação de uma fachada dupla pele do tipo Box Windows, ou seja, uma fachada dupla com a altura de um piso, compartimentada na vertical e na horizontal com a largura aproximada de um gabinete, assegurando a independência em relação aos espaços adjacentes. Na apreciação desta solução é considerada a ausência de ventilação franca do espaço de ar (caso mais frequente) e uma alternativa em que esse espaço se encontra aberto para o exterior. A fachada com aberturas de ventilação do canal controladas considera-se que apresentará um desempenho intermédio dos dois anteriores. Nesta análise admite-se que a fachada é constituída por um vidro simples pelo exterior e um vidro duplo pelo interior e dispõem de um estore veneziano no canal de ar.

#### 4.2.4.1- Aferição previa do modelo

Tendo em conta o espaço de ar a ventilação do mesmo, antes da realização do estudo o modelo implementado no ESP-r foi comparado face aos resultados de ensaios *in situ* de uma fachada do tipo *box-window* aplicada no edifício de escritórios objecto do estudo de caso do capítulo 5<sup>1</sup>.

Na Figura 4.82, na Figura 4.83, na Figura 4.84 e na Figura 4.85 apresentam-se o desenho esquemático da composição da fachada dupla pele monitorizada. A fachada é constituída por um vidro exterior incolor de 10 mm, um vidro duplo constituído por um vidro cinza de 8 mm, caixa-de-ar de 15 mm e um vidro laminado interior 33.1. O espaço de ar entre a pele exterior e a pele interior pode considerar-se fechado, pois encontra-se em contacto com o exterior por aberturas com uma dimensão inferior a  $500 \text{ mm}^2/\text{m}$  de largura da fachada. Na caixa-de-ar exterior encontra-se intercalado um estore veneziano de cor cinza.

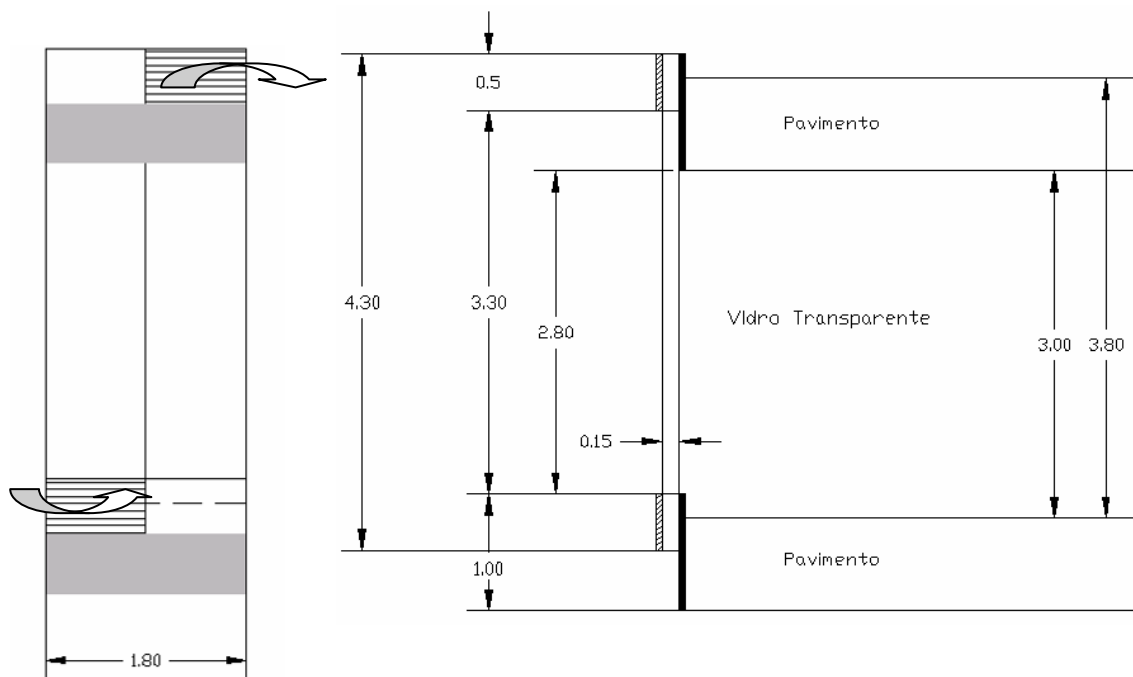


Figura 4.82 - Alçado e secção de um módulo da fachada dupla-pele

<sup>1</sup> Resultados obtidos no âmbito da Annex 44 da IEA.

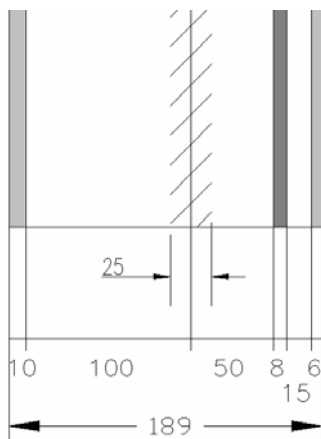


Figura 4.83 - Composição do elemento envidraçado da fachada dupla-pele

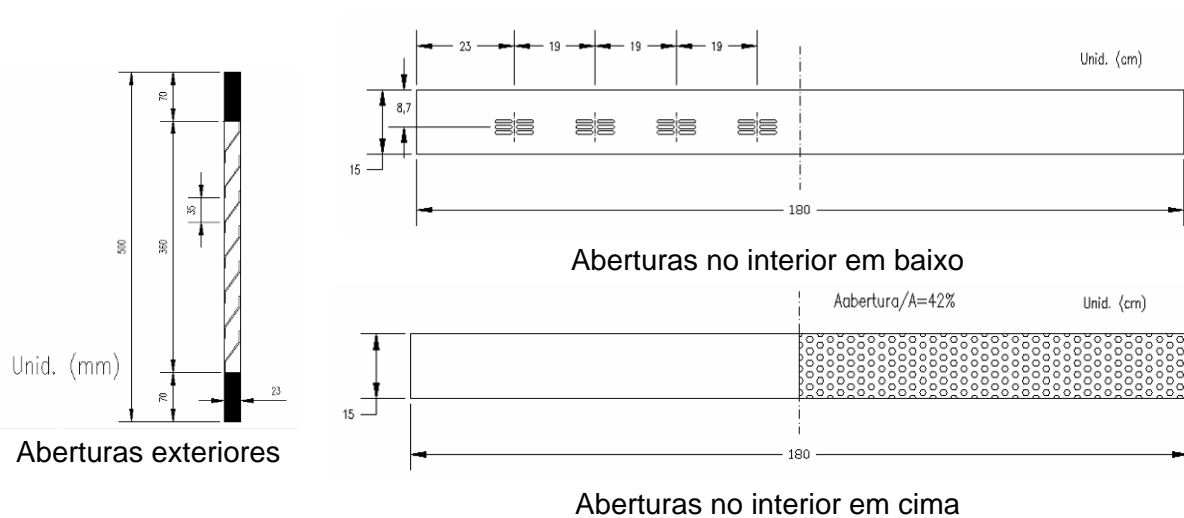


Figura 4.84 - Abertura de ventilação do canal de ar da fachada dupla-pele

Em baixo



Em cima



Figura 4.85 - Abertura de ventilação do canal de ar da fachada dupla-pele



No âmbito da avaliação experimental foram medidas as condições exteriores de radiação solar, temperatura e humidade relativa do ar exterior e as condições de temperatura e humidade no interior do gabinete. A temperatura na superfície dos vidros e do ar no interior do canal foi medida com termopares do tipo T, Figura 4.86. No decurso das medições, devido a problemas no estore veneziano este ficou rodado a sensivelmente 70°.



Figura 4.86 - Pormenor de alguns termopares colados no vidro destinados a medir a temperatura superficial do vidro e do ar na caixa-de-ar da fachada

No estudo do desempenho térmico foi adoptado o modelo ESP-r (ESRU, 2002) que já foi utilizado por diversos autores na avaliação do desempenho térmico de fachadas e janelas duplas (Bartak, 2001; Dickson, 2004; Leal, 2004; Leigh, 2004 e McEvoy, 2003).

Na Figura 4.87 apresentam-se as condições climáticas e a temperatura interior. Na Figura 4.88 apresenta-se o modelo da DSF com um vidro triplo e na Figura 4.89 um segundo modelo em que o espaço de ar da fachada foi discretizado em oito zonas. De uma forma geral não existe uma diferença significativa na estimativa da temperatura do estore veneziano nos dois modelos, revelando que no caso de DSF do tipo *box-window* é razoável adoptar um vidro triplo. Nas figuras seguintes são apresentados os resultados da temperatura média do ar no canal (Figura 4.90) e na superfície interior dos vidros que confinam com o canal (Figura 4.91).

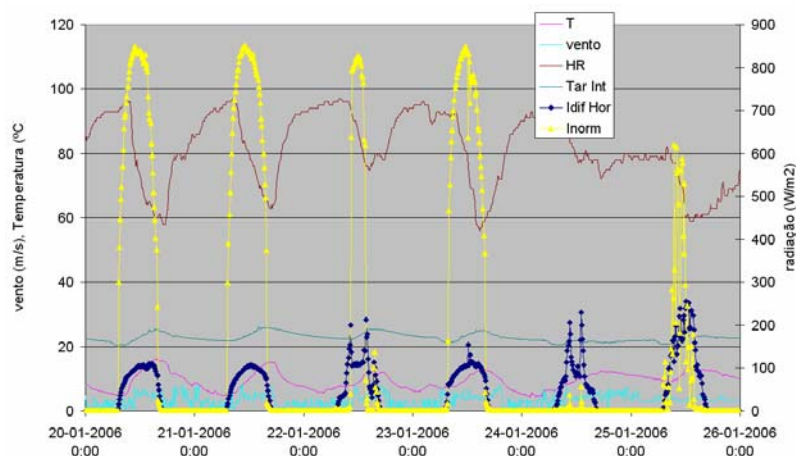


Figura 4.87 - Condições ambientais exteriores e interiores



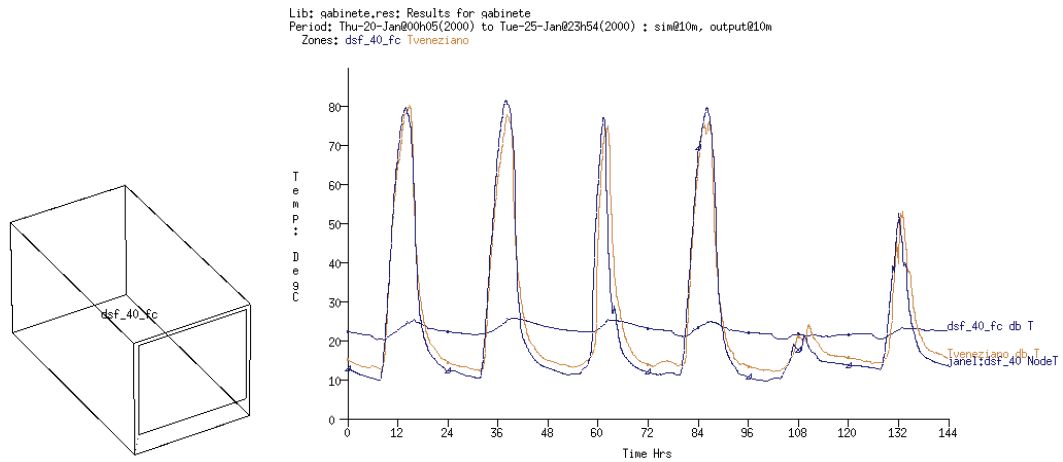


Figura 4.88 - Modelo da fachada dupla pele do tipo *box-window* com um vidro Triplo - Temperatura do estore veneziano

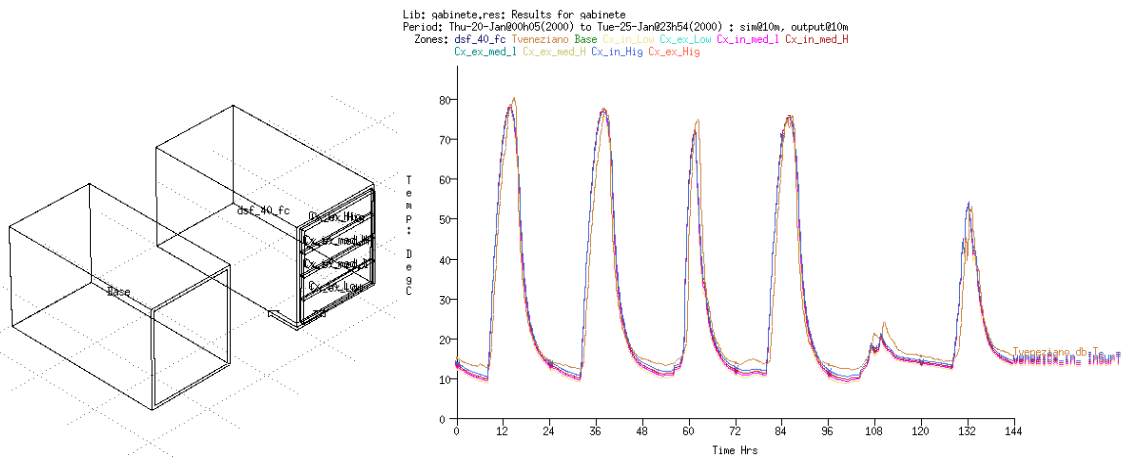
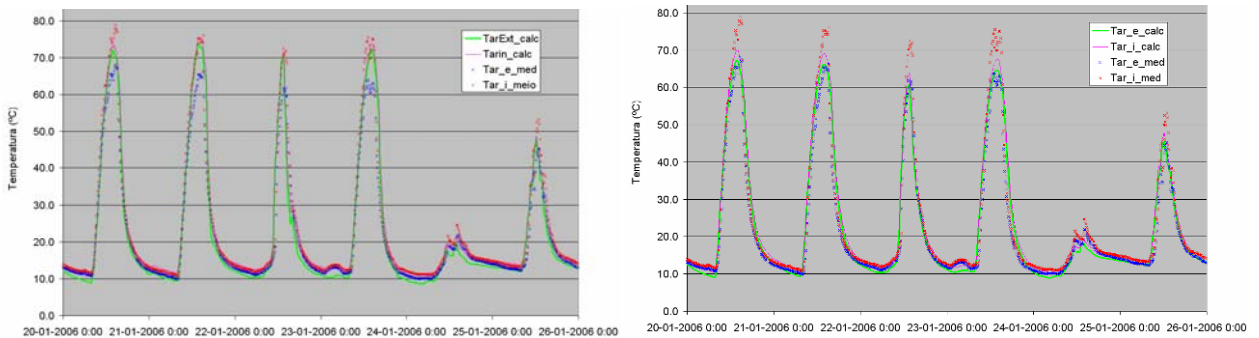


Figura 4.89 - Modelo da fachada dupla pele do tipo *box-window* com oito zonas - Temperatura do estore veneziano



Vidro triplo

8 zonas

Figura 4.90 - Comparação da temperatura do ar no canal medida e calculada

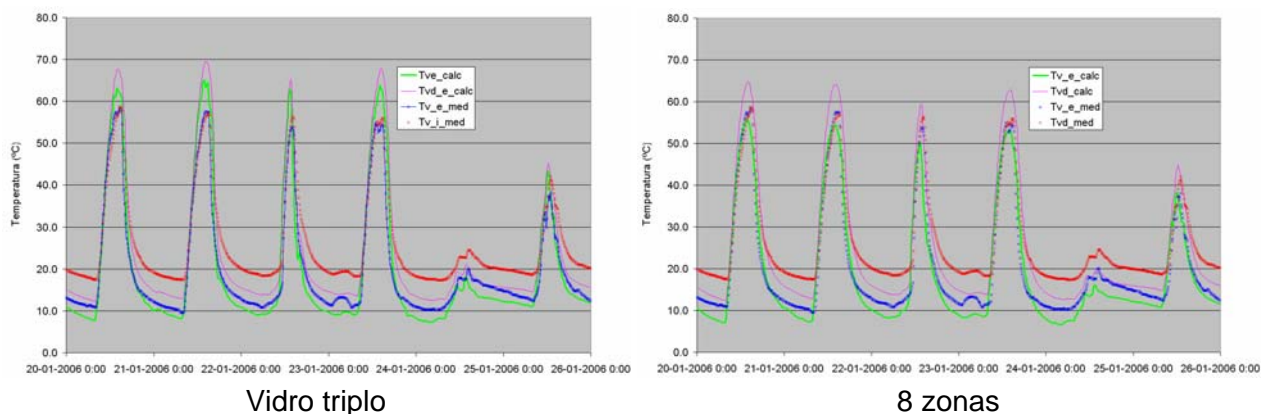


Figura 4.91 - Comparação da temperatura na superfície dos vidros medida e calculada

Dos resultados obtidos regista-se uma boa concordância entre os valores medidos e os calculados para a temperatura do estore veneziano (Figura 4.88 e Figura 4.89), para a temperatura do ar no canal (Figura 4.90), existindo contudo um desvio importante nas temperaturas das superfícies interiores dos vidros que confinam com o canal de ar (Figura 4.91), principalmente na face do vidro duplo.

Na Figura 4.92, apresenta-se o perfil de temperatura na DSF às 12h do dia 21 de Janeiro. O desvio na temperatura da superfície do vidro duplo está relacionado com a variação da resistência térmica do espaço de ar do vidro duplo entre  $0,19 \text{ m}^2\text{K/W}$  (para uma temperatura média do ar de  $10^\circ\text{C}$ ) a  $0,14 \text{ m}^2\text{K/W}$  (para uma temperatura média do ar de  $70^\circ\text{C}$ ), enquanto no modelo foi adoptado o valor médio de  $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Esta é uma limitação do modelo ESP-r, em que é assumida a uma resistência térmica constante para as lâminas de ar dos vidros.

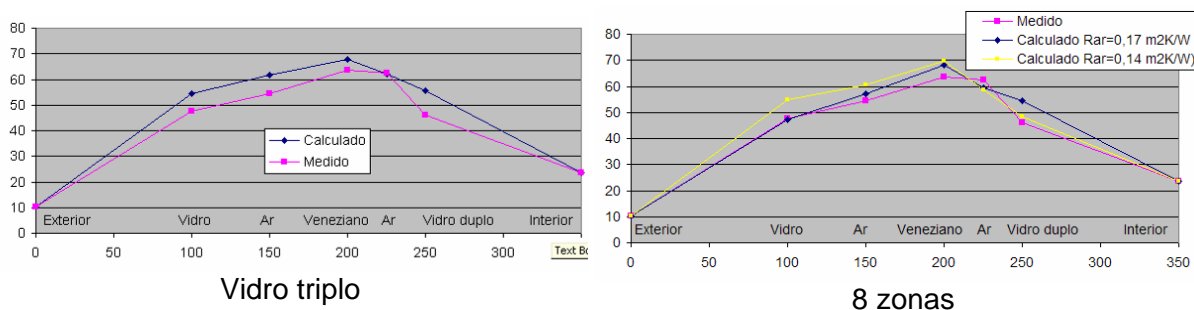


Figura 4.92 - Perfil de temperatura às 12h de dia 21

#### 4.2.4.2 - Estudo de diferentes configurações de fachada dupla pele do tipo *box-window*

Tendo por base o modelo desenvolvido (secção 4.2.4.1) este foi expandido de forma a ser possível avaliar a configuração em que o espaço de ar se encontra ventilado para o exterior através de aberturas na base e no topo do canal de ar.

Para analisar o efeito da ventilação natural do espaço de ar foi considerada a existência de uma abertura livre na base e no topo do canal de  $1,25 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$ . Para análise da convecção foi adoptado o modelo de Bar-Cohen & Rohsenow (Dickson, 2004).

No Quadro 4.50 apresenta-se um resumo das propriedades dos vidros estudados e apresentam-se os resultados obtidos na Figura 4.93, na Figura 4.94 e na Figura 4.95 para fachadas exposta a sul e na Figura 4.96, na Figura 4.97 e na Figura 4.98 para a fachada exposta a Norte. Foi apreciado o comportamento da fachada em Faro, Lisboa e Bragança.

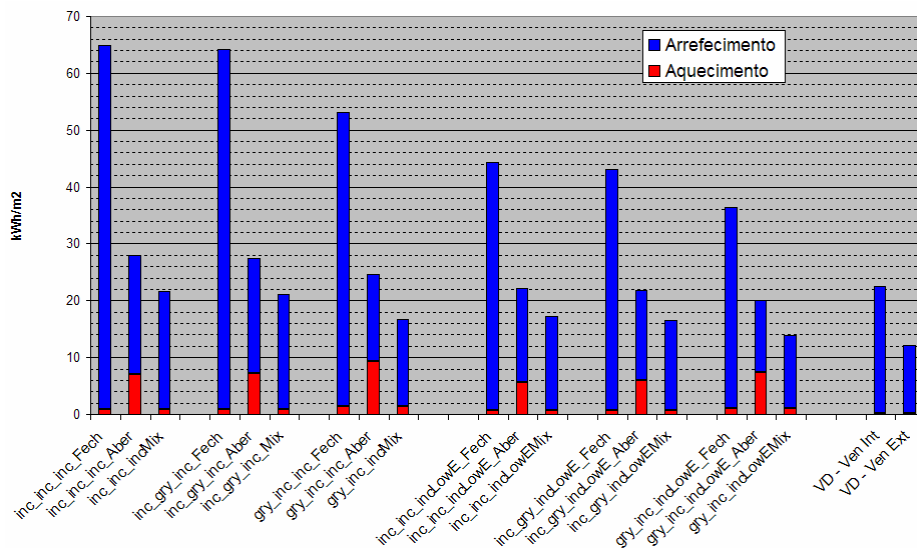


Figura 4.93 - Necessidades térmicas da fachada dupla pele exposta a Sul - Faro

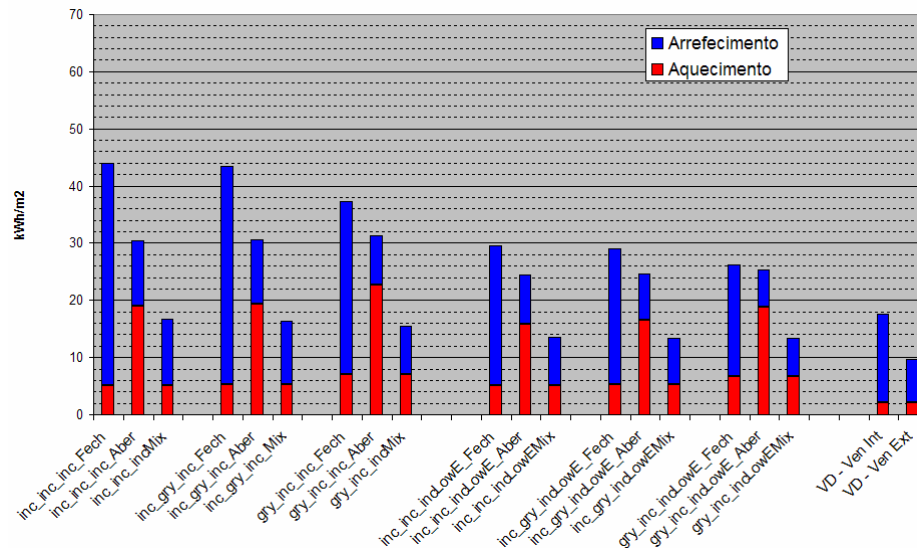


Figura 4.94 - Necessidades térmicas da fachada dupla pele exposta a Sul - Lisboa

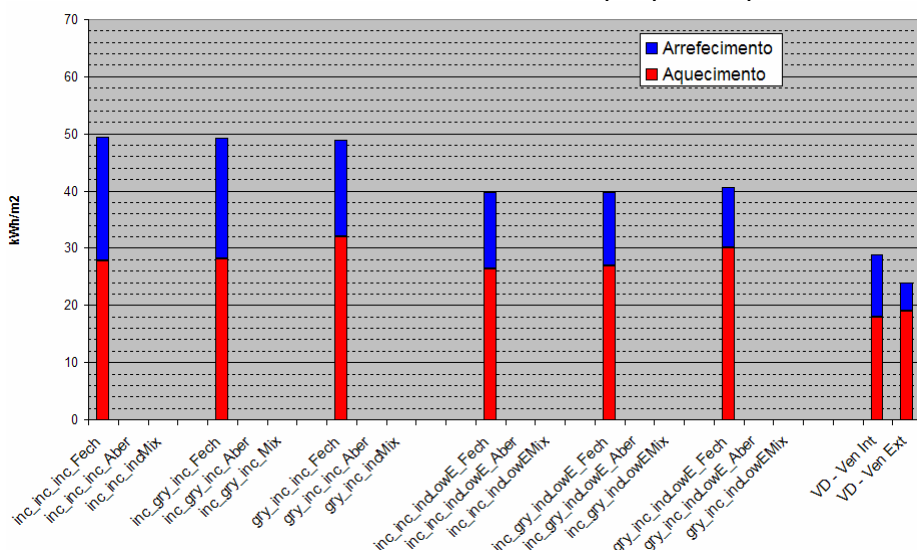


Figura 4.95 - Necessidades térmicas da fachada dupla pele exposta a Sul - Bragança<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Neste caso não foi possível apreciar o comportamento da fachada com o canal ventilado porque o programa apresentava erro nas situações em que a temperatura do ar no canal era inferior a 0°C.

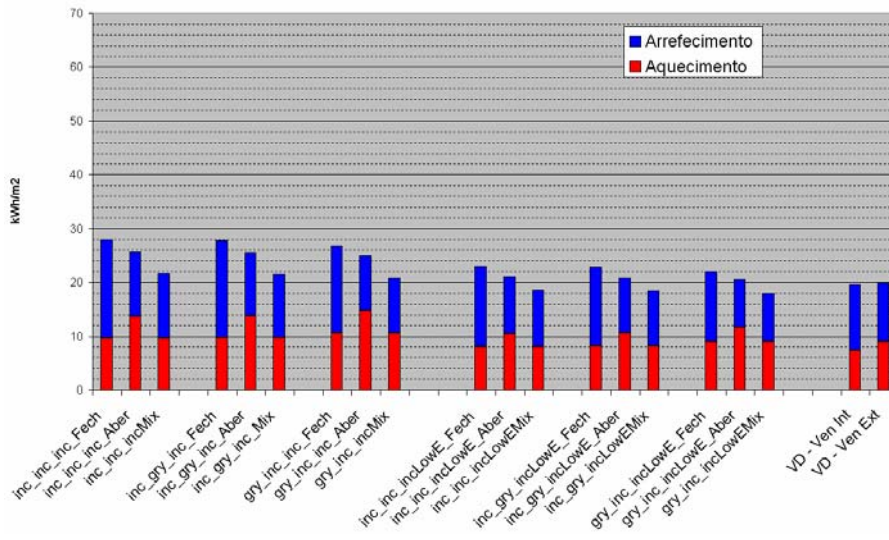


Figura 4.96 - Necessidades térmicas da fachada dupla pele exposta a Norte - Faro

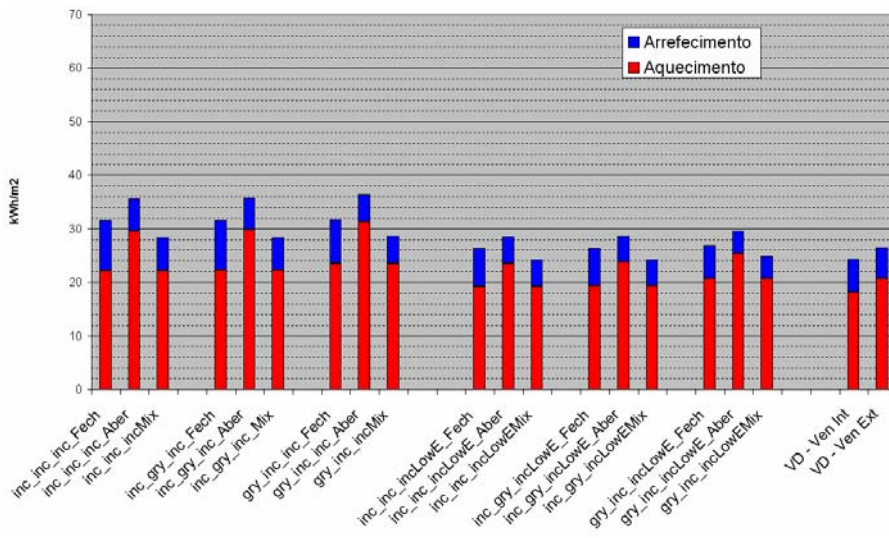


Figura 4.97 - Necessidades térmicas da fachada dupla pele exposta a Norte - Lisboa

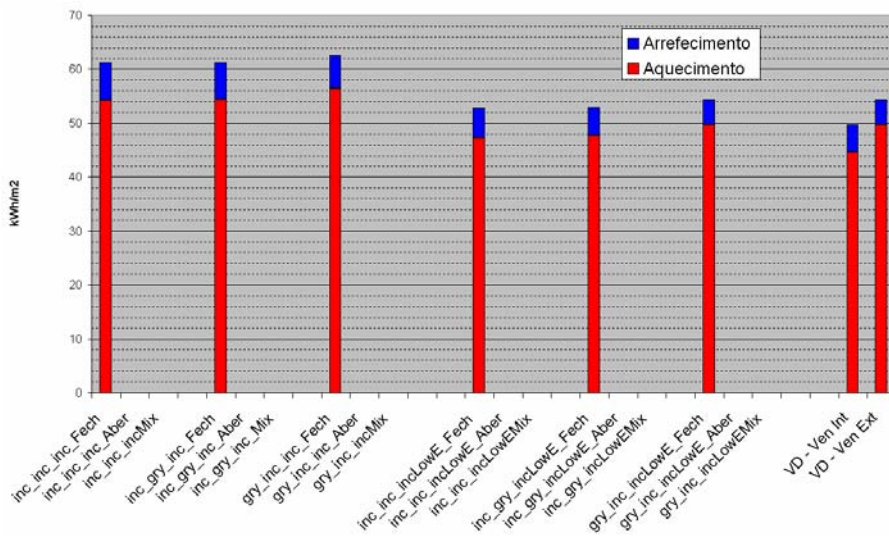


Figura 4.98 - Necessidades térmicas da fachada dupla pele exposta a Norte - Bragança<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Neste caso não foi possível apreciar o comportamento da fachada com o canal ventilado porque o programa apresentava erro nas situações em que a temperatura do ar no canal era inferior a 0°C.

Quadro 4.50 - Resumo das propriedades das fachadas dupla-pele analisadas

Pele exterior:	Incolor				Incolor				Cinza			
Vidro simples 10												
Pele interior:	Inc	Inc	IncLe	IncLe	Cin	Cin	CinLe	IncLe	Inc	Inc	IncLe	IncLe
Vidro duplo 8-16-6	inc	inc	inc	inc	inc	inc	inc	inc	inc	inc	inc	inc
Ventilação	Fech.	Aberto	Fech.	Aberto	Fech.	Aberto	Fech.	Aberto	Fech.	Aberto	Fech.	Aberto
U (W/m <sup>2</sup> /K)	1,8	2,8	1,3	1,6	1,8	2,8	1,3	1,6	1,8	2,8	1,3	1,6
$\tau_{v \text{ min}}$	0,08	0,08	0,08	0,08	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$\tau_{v \text{ max}}$	0,68	0,68	0,65	0,65	0,26	0,26	0,25	0,25	0,20	0,20	0,20	0,20
$g_{\text{min}}$	0,17	0,11	0,12	0,08	0,14	0,11	0,08	0,07	0,11	0,07	0,08	0,05
$g_{\text{max}}$	0,57	0,49	0,50	0,42	0,43	0,26	0,34	0,22	0,28	0,19	0,21	0,17

Dos resultados obtidos é possível avaliar o impacto de cada um dos tipos de fachada estudada face ao clima e à exposição solar, efectivamente:

– VENTILAÇÃO:

- Dos resultados obtidos regista-se que a solução de DSF sem ventilação é adequada para minimizar as necessidades de aquecimento, bem como a ventilação do canal de ar é adequada para minimizar as necessidades de arrefecimento.
- As DSF expostas a sul sem ventilação apresentam necessidades térmicas (aquecimento+arrefecimento) significativamente superiores às da solução com fachada ventilada devido ao elevado peso das necessidades de arrefecimento (Faro e Lisboa). Neste caso, o aquecimento é necessário essencialmente ao princípio da manhã, sendo necessário arrefecimento no período em torno do meio-dia (Figura 4.99). Nesse sentido, nas fachadas a Sul devem ser adoptados aberturas fixas ou, preferencialmente, devem ser adoptadas DSF com aberturas de ventilação controladas, que permitam ventilar o canal quando a temperatura deste é elevada e fechá-lo para minimizar as perdas térmicas e as necessidades de aquecimento.
- A ventilação do canal de ar para o interior apesar de numa primeira análise se poder considerar interessante, face aos resultados obtidos, considera-se que a sua utilidade em climas como o de Faro e de Lisboa será baixa, pois nos períodos em que existe radiação solar disponível e ar quente é necessário proceder ao arrefecimento do gabinete (Figura 4.99), pelo que não existe interesse na admissão do ar aquecido no canal de ar.
- Nas fachadas expostas a Norte a diferença entre DSF ventiladas/fechadas já não é tão significativa. Para minimizar as necessidades térmicas (aquecimento mais arrefecimento) em Faro é preferível a adopção de fachadas ventiladas, enquanto em Lisboa é preferível adoptar DSF com o canal fechado. Em todos os casos a utilização de DSF com aberturas controladas permitiria minimizar as necessidades térmicas.

– ENVIDRAÇADOS

- Nas fachadas a sul que são dominadas pelas necessidades de arrefecimento, a solução que permite minimizar as necessidades térmicas consiste em aplicar um vidro absorvente na pele exterior, pois desta forma reduz-se a radiação solar que entra na DSF e parte da radiação solar absorvida nesse vidro é dissipada



directamente para o exterior. A utilização de vidro duplo incolor ou absorvente na pele interior não apresenta uma diferença significativa pois o controlo da radiação solar é efectuado pelo estore veneziano.

- Para minimizar as necessidades térmicas é importante aplicar no interior um vidro duplo com baixa emissividade para reduzir a transmissão de calor do canal de ar para o interior. Este aspecto é essencial nas fachadas não-ventiladas.
  - Na fachada Norte praticamente não existe diferença de comportamento quanto à utilização do vidro absorvente, sendo contudo adequada a utilização de um vidro duplo baixo emissivo na pele interior.
- As DSF não ventiladas ou ventiladas com aberturas fixas expostas a sul apresentam pior desempenho do que uma solução tradicional baseada em vidro duplo incolor, estore veneziano interior e numa área de vidro de 20% da área de pavimento. As DSF com aberturas de ventilação controladas permitem melhorar o desempenho térmico, que é melhor do que a solução tradicional com estore veneziano pelo interior, mas mesmo assim é pior do que a solução em que esse estore veneziano é aplicado pelo exterior.

No caso de DSF com o canal de ar ventilado, algumas das vantagens referidas para esse tipo de fachadas são eliminadas, nomeadamente a melhoria do isolamento sonoro (pois as aberturas fazem curto-circuito à pele exterior) e as vantagens na redução dos custos de limpeza (pois neste caso o canal passa a comportar-se de forma próxima da superfície exterior, com deposição de poeiras e sujidade), apesar de resolver os problemas de resistência mecânica aplicáveis às protecções solares exteriores em locais expostos.

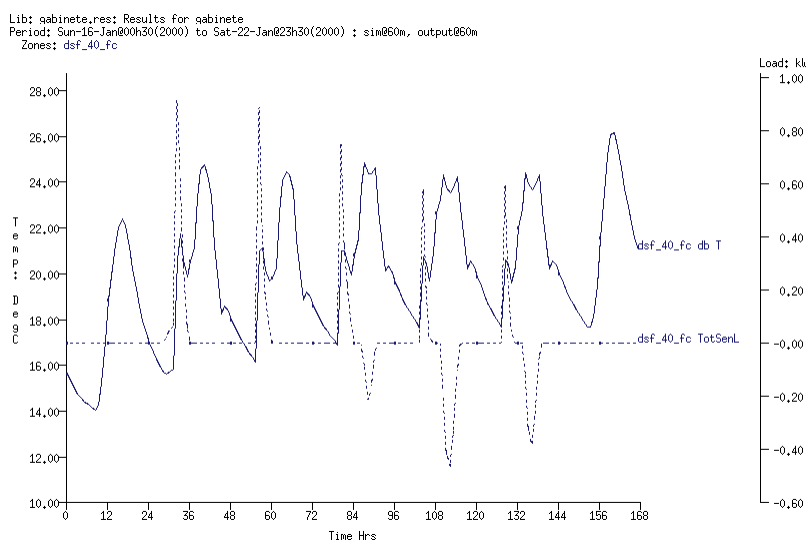


Figura 4.99 - Temperatura e potência de climatização na 3ª semana de Janeiro em Lisboa - DSF não ventilada vidros incolor-cinza-incolor

Neste estudo não foi apreciada a condição de existir a admissão de ar exterior através da DSF (configuração C da Figura 4.81) em locais frios como Bragança, situação para a qual as necessidades de arrefecimento poderão ser minimizadas. Outra hipótese que poderá ser útil é aproveitar o ar quente da fachada Sul para “injectar” ar quente nos espaços situados a norte com necessidades de aquecimento.

## **4.2.5 - Optimização de envidraçados em edifícios do tipo residencial ou de serviç os com ocupação cont nu**

### **4.2.5.1 - Características geométricas e condições de utilização**

Para o estudo de edifícios do tipo residencial ou de serviç os com ocupação cont nu foi adoptada a geometria anteriormente definida de 2,7 m × 5 m × 2,7 m (ver secção 4.2.3). Neste caso, na compartimentação interior considerou-se parede simples de tijolo de 11 cm com revestimento de estuque. Em relação à laje de pavimento e tecto considerou-se que esta era de betão com 15 cm de espessura, com uma camada de betonilha de 5 cm e revestimento cerâmico (pavimento) e revestimento do lado oposto de estuque (tecto).

Neste estudo considerou-se que este espaço era ocupado por uma pessoa 24 h por dia e os 365 dias do ano, com uma carga térmica de 60 W de calor sensível e 35 W de calor latente. Como condições de conforto para estimar as necessidades térmicas foi adoptada uma temperatura operativa de 20 C e 25 C. Para a iluminação artificial considerou-se uma potência de 40 W que funciona das 7 às 8 h e das 19h às 24h. Para os equipamento admitiu-se uma carga térmica de 75 W 24 h por dia. Este valor de 75 W pode corresponder ao funcionamento de uma televisão, computador ou até uma segunda pessoa. Este perfil de cargas térmicas corresponde a ganhos de calor sensíveis médios de 10 W/m<sup>2</sup>. De forma complementar foi também apreciada a situação de aquecimento de um espaço vazio, ou seja, com ganhos térmicos internos nulos.

Para a ventilação corrente do espaço considerou-se um caudal de ar de 30 m<sup>3</sup>/h (0,82 rph). Na estação de arrefecimento considera-se que quando a temperatura exterior é inferior a 22 C é aberta a janela e a taxa de ventilação é incrementada para 5 rph. Na estação de aquecimento, considera-se que quando a temperatura interior for superior a 24 C é aberta a janela e   incrementada a taxa de ventilação para 5 rph.

Com o objectivo de avaliar o impacte do clima Português foram adoptados os dados dos anos climáticos de referência das localidades com climas que se enquadram nas zonas climáticas I1, I2 e I3 e V1, V2 e V3 (Quadro 4.44).

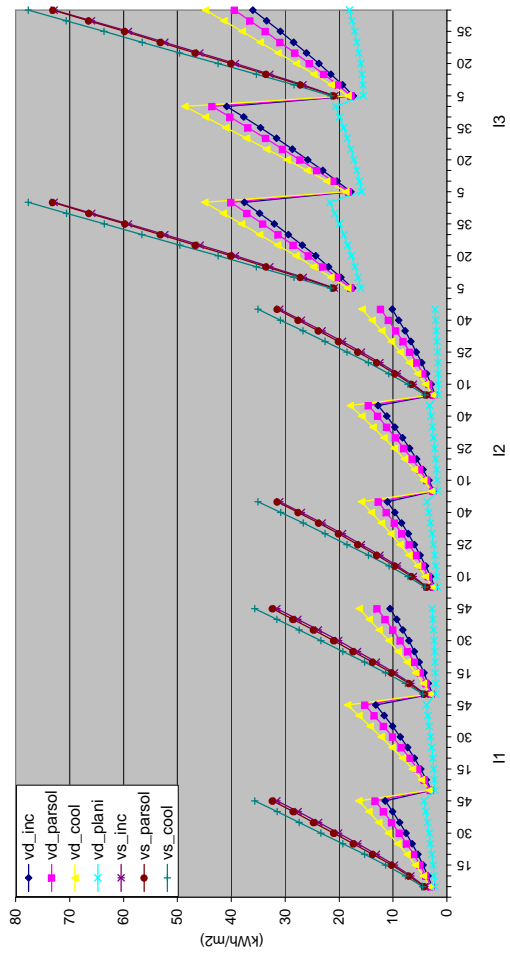
### **4.2.5.2 - Resultados do estudo paramétrico**

Com base no modelo indicado na Figura 4.67, foram determinados isoladamente os ganhos térmicos e as necessidades de aquecimento e de arrefecimento para cada um dos casos, sendo por fim determinadas as necessidades energéticas anuais de iluminação, equipamentos, aquecimento e arrefecimento. Na determinação das necessidades energéticas anuais foi considerada a utilização de uma bomba de calor com um COP de 3.

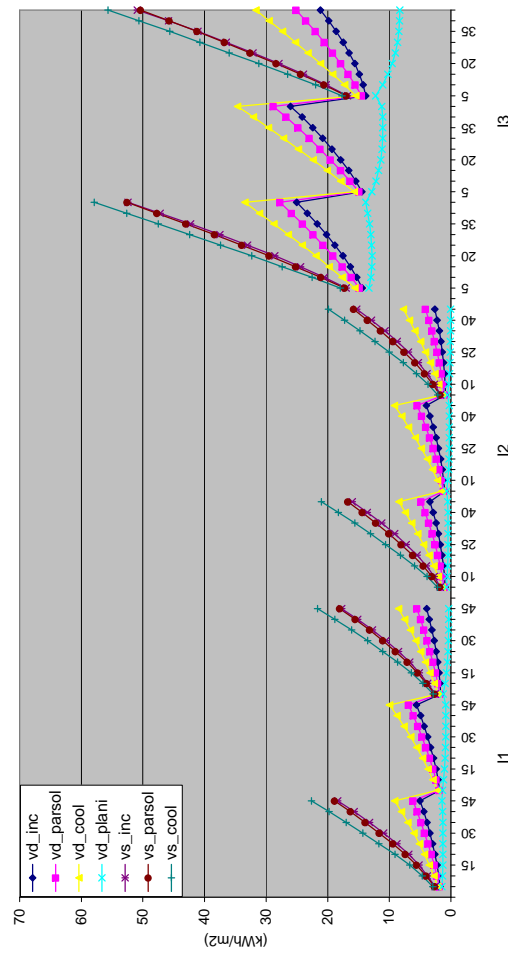
Seguidamente apresentam-se alguns dos resultados obtidos para cada uma das orientações e por fim efectua-se uma síntese e apresenta-se uma proposta para um valor de referência de consumo nominal de energia para um espaço com ocupação cont nu e baixas cargas térmicas internas.

Tendo em conta o elevado número de casos estudados, na leitura dos gráficos seguintes deve atender-se ao indicado na Figura 4.68.

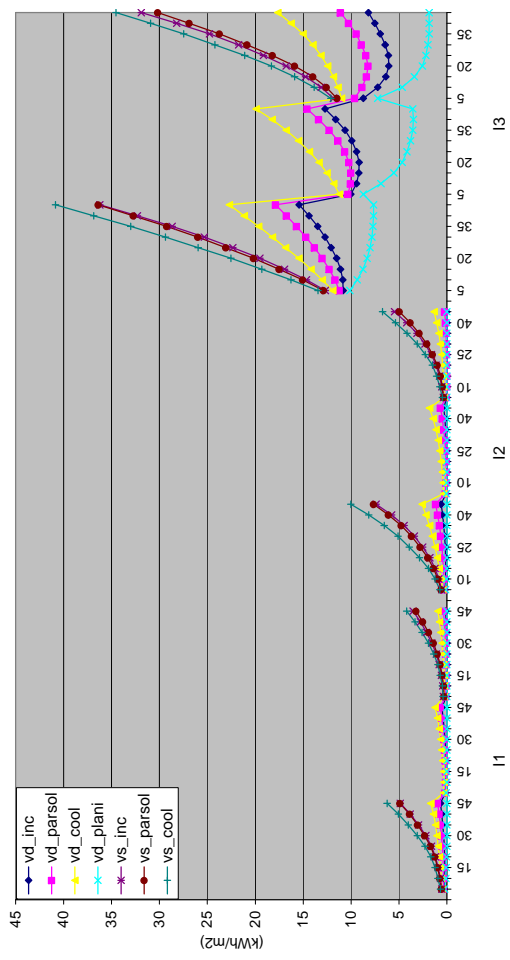
Fachada Norte



Fachada oeste



Fachada Sul



Fachada Este

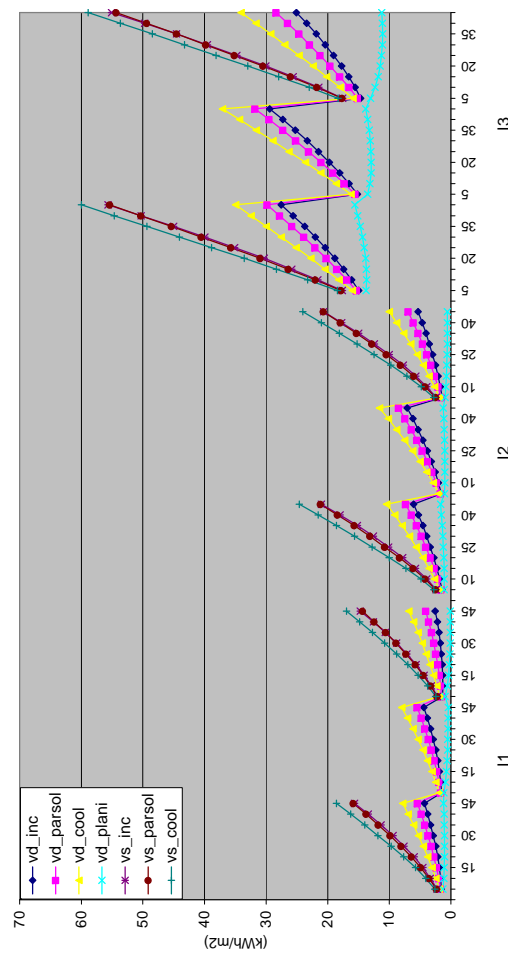


Figura 4.100 - Necessidades nominais de aquecimento (ganhos de 10 W/m²)



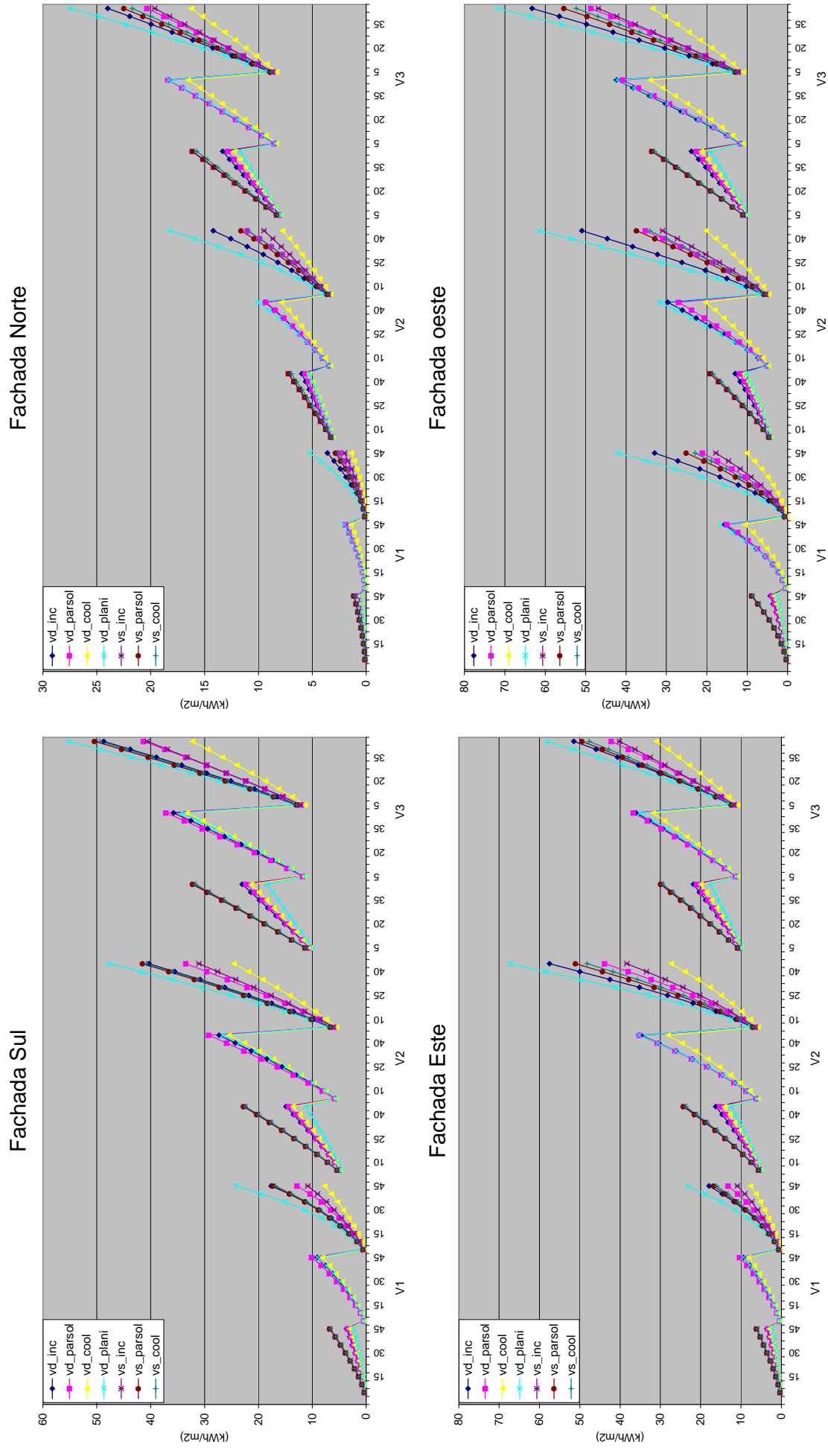


Figura 4.101 - Necessidades nominais de arrefecimento (ganhos de 10 W/m<sup>2</sup>)

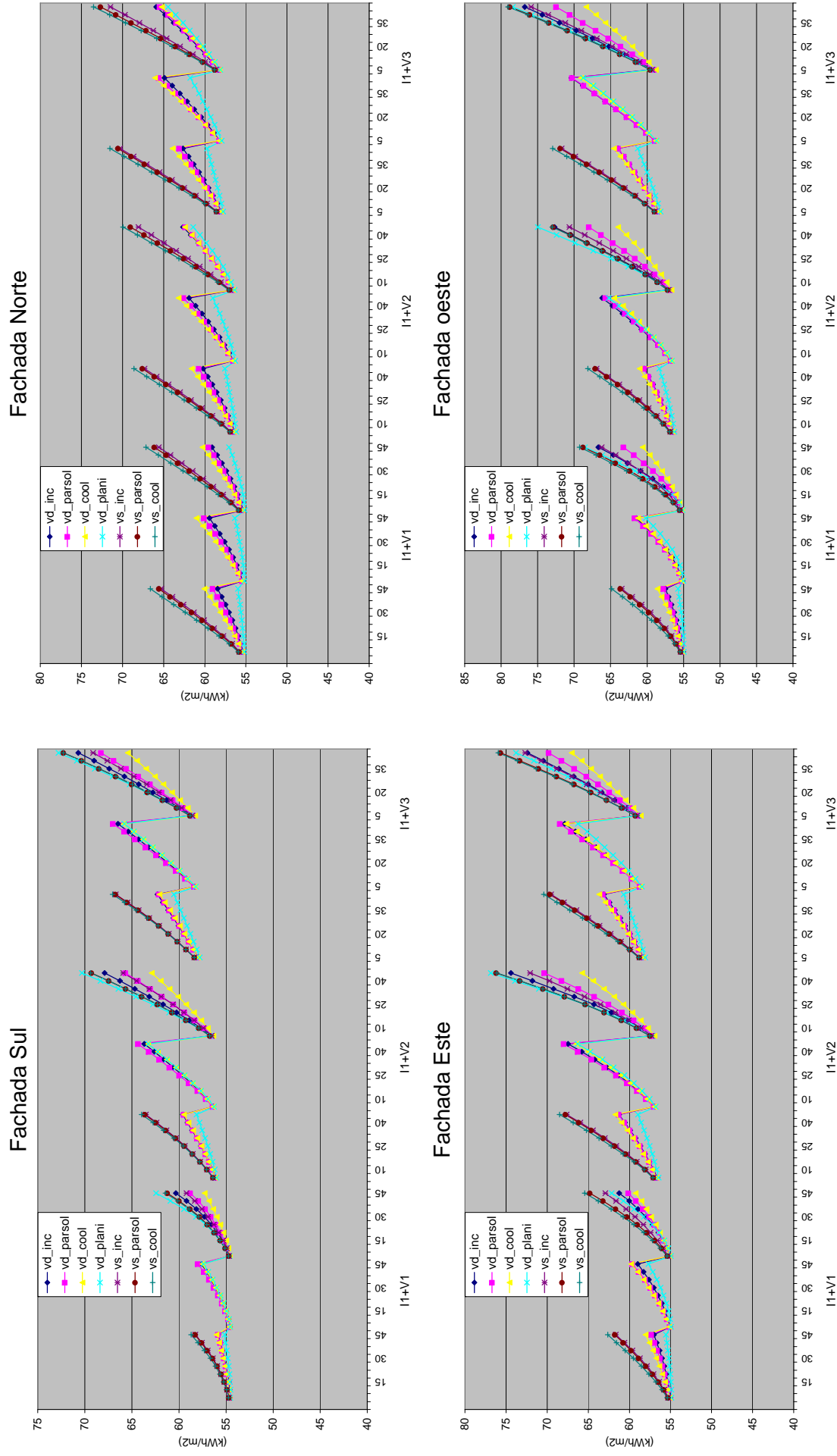


Figura 4.102 - Necessidades energéticas anuais, incluindo aquecimento, arrefecimento, iluminação e equipamentos I1+V1, V2, V3 (ganhos de 10 W/m<sup>2</sup>)

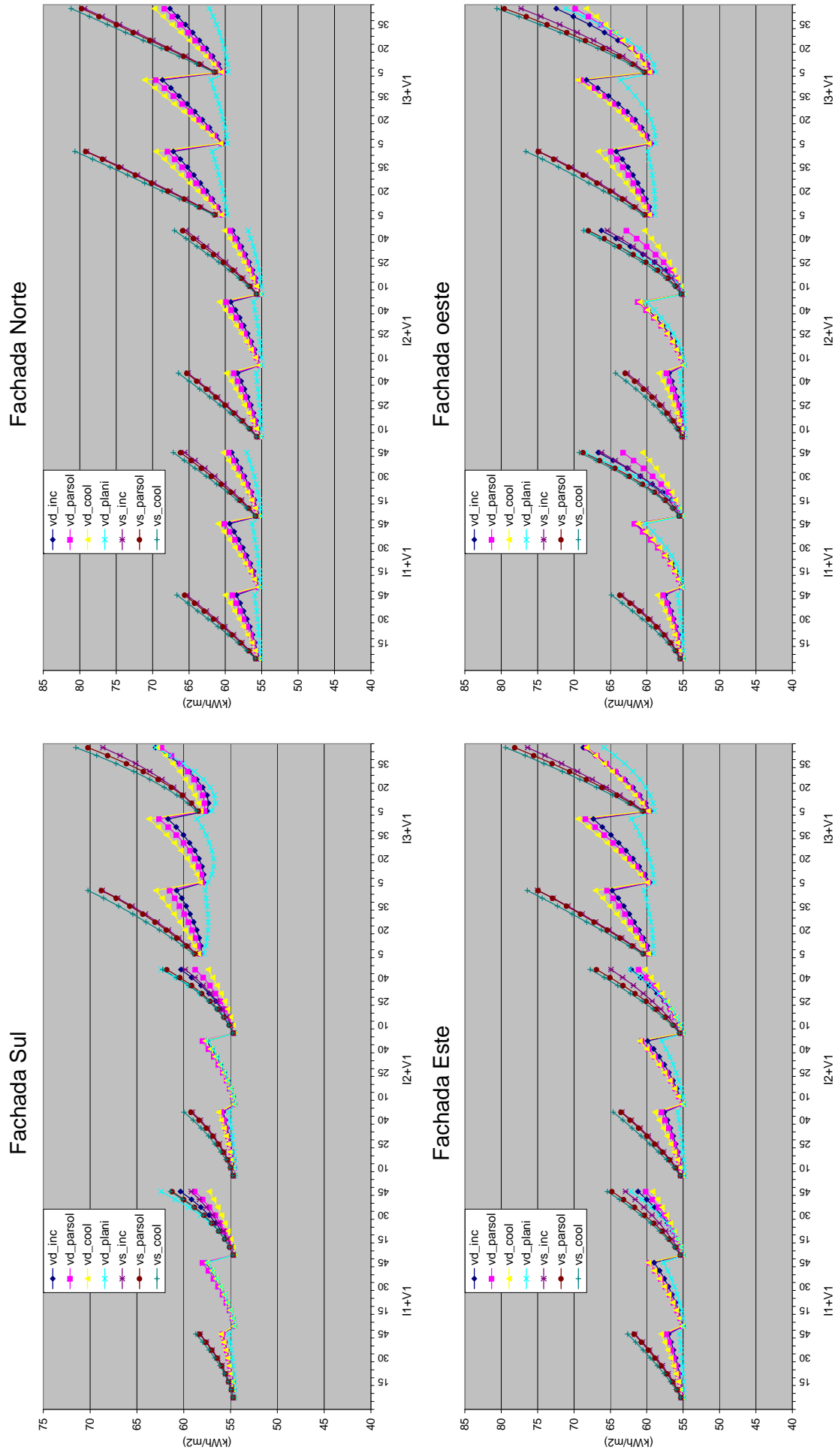
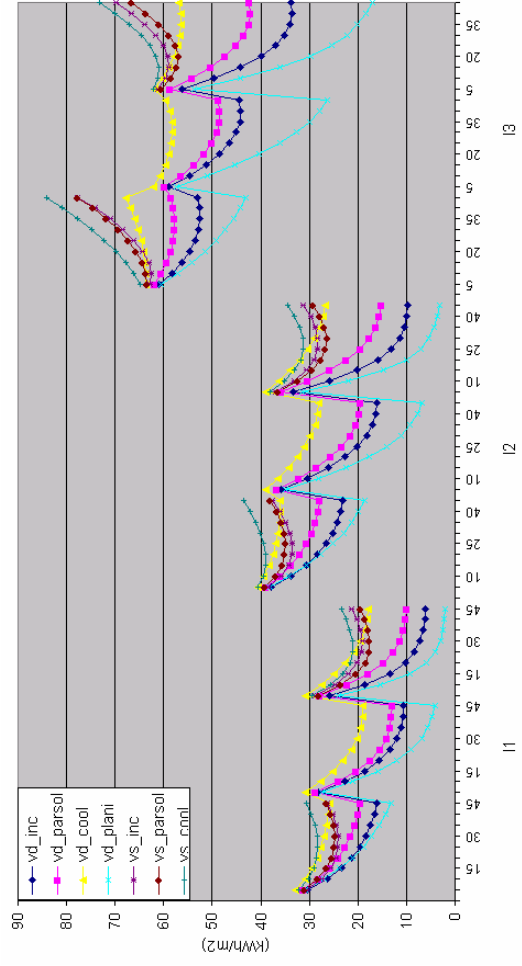
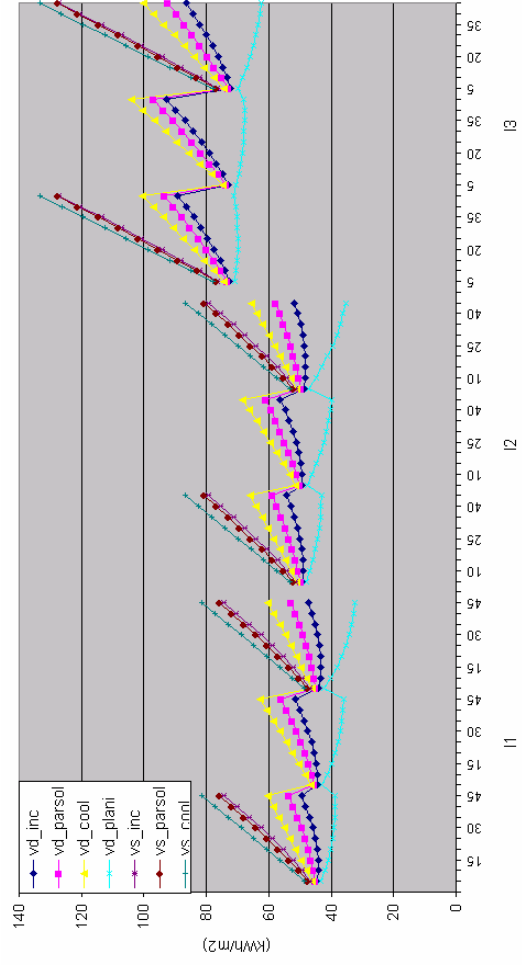


Figura 4.103 - Necessidades energéticas anuais, incluindo aquecimento, arrefecimento, iluminação e equipamentos I1, I2, I3+V1 (ganhos de 10 W/m<sup>2</sup>)

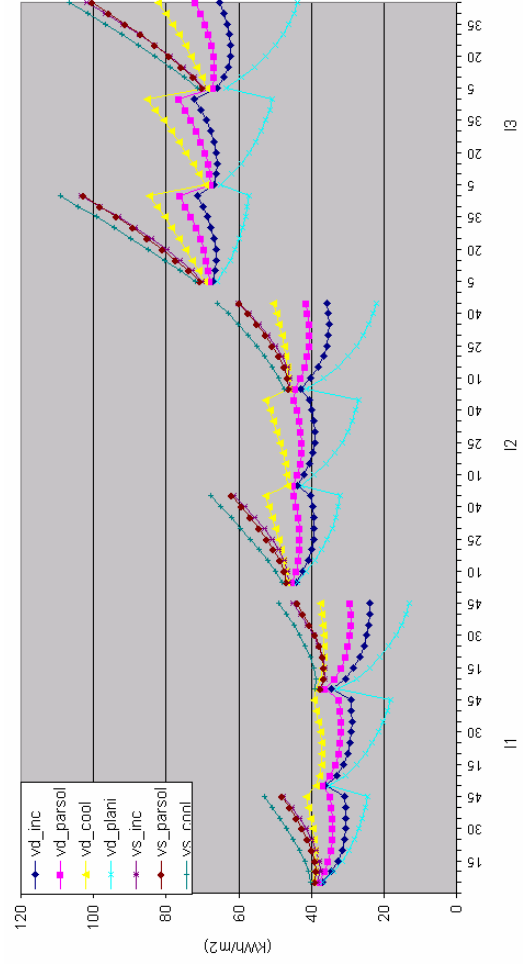
Fachada Sul



Fachada Norte



Fachada Este



Fachada oeste

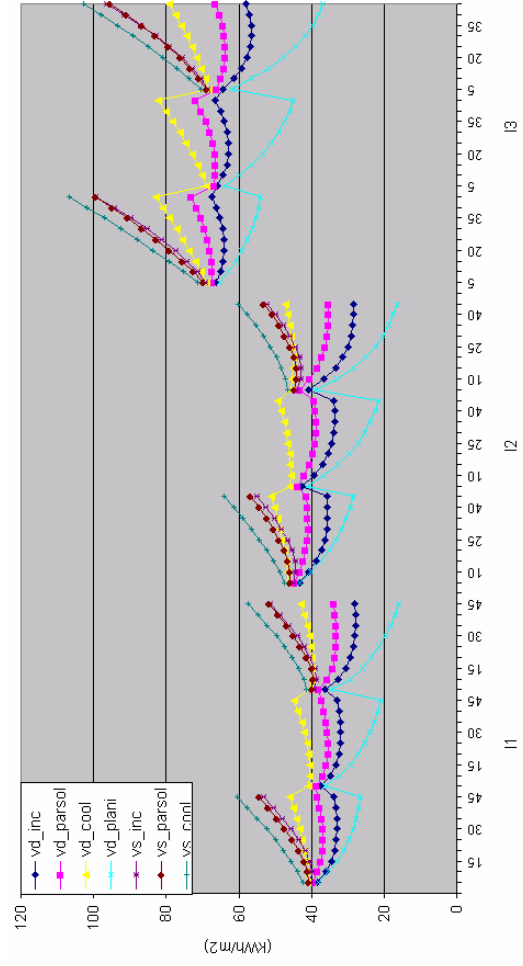
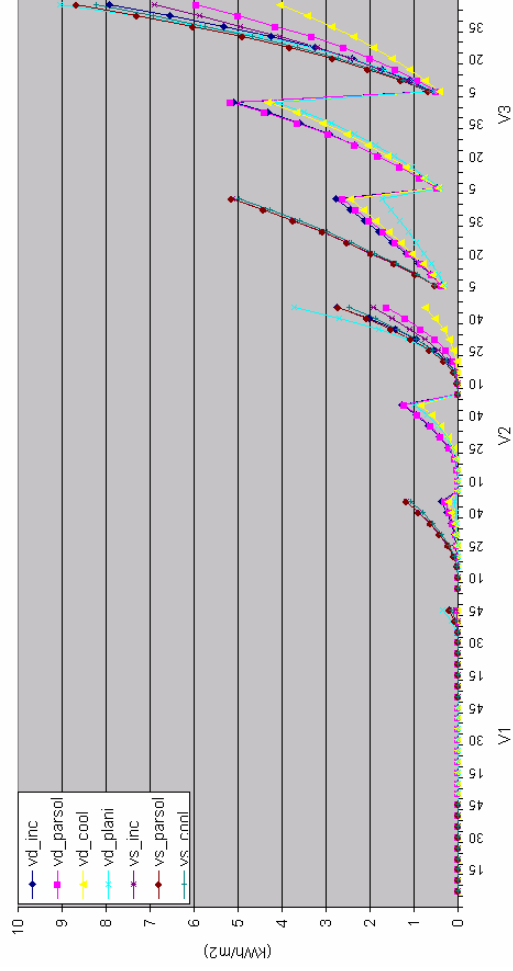
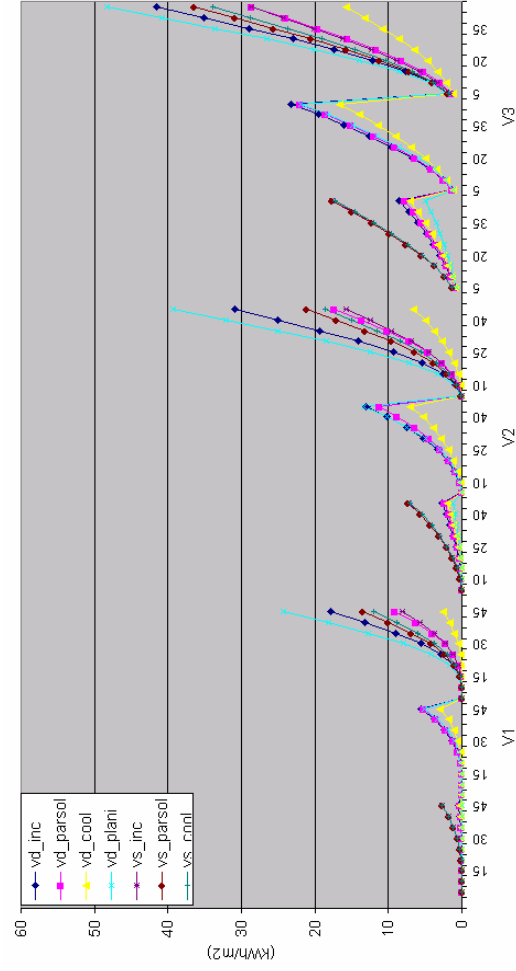


Figura 4.108 - Necessidades nominais de aquecimento (ganhos de 0 W/m<sup>2</sup>)

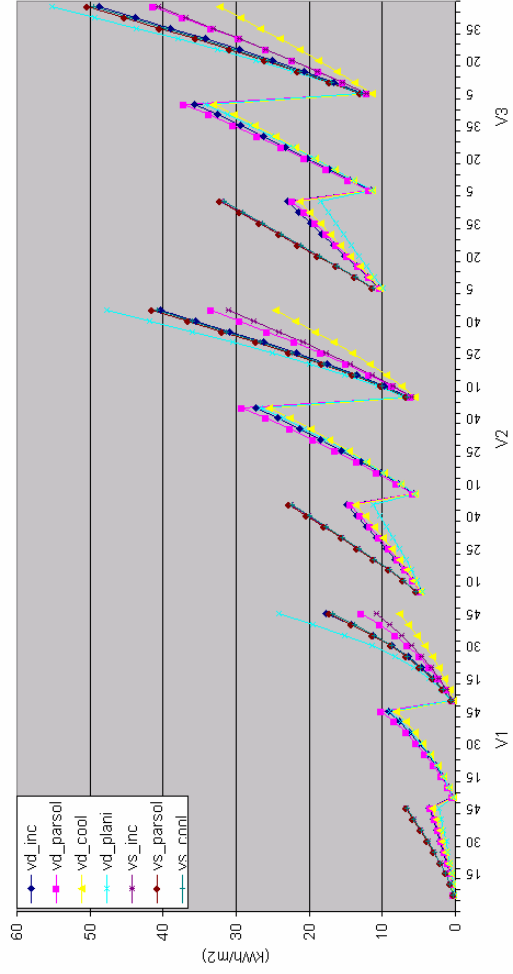
Fachada Norte



Fachada oeste



Fachada Sul



Fachada Este

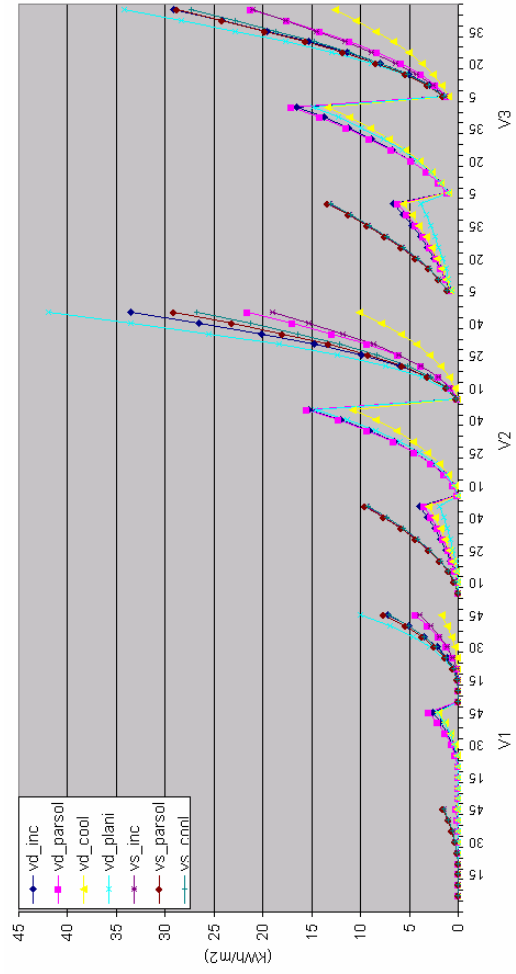


Figura 4.109 - Necessidades nominais de arrefecimento (ganhos de 0 W/m²)

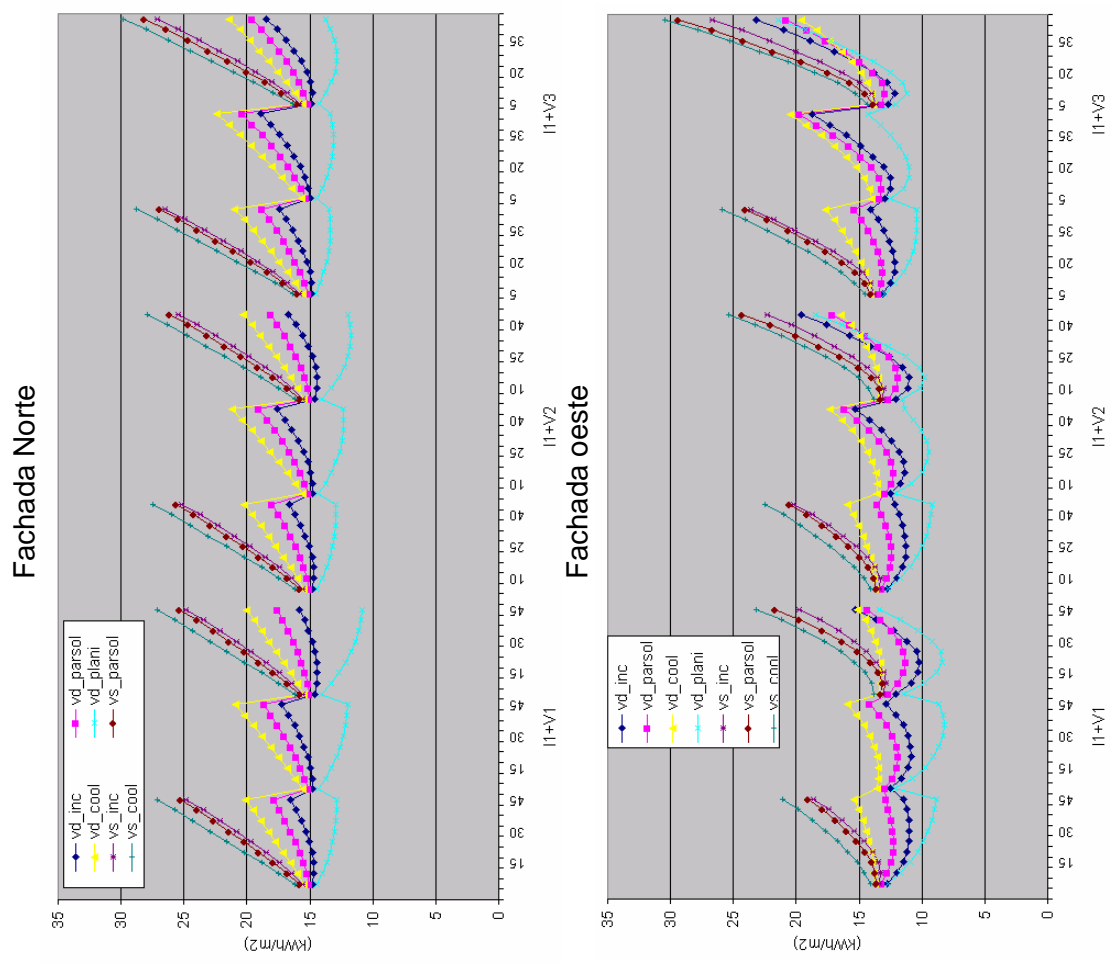
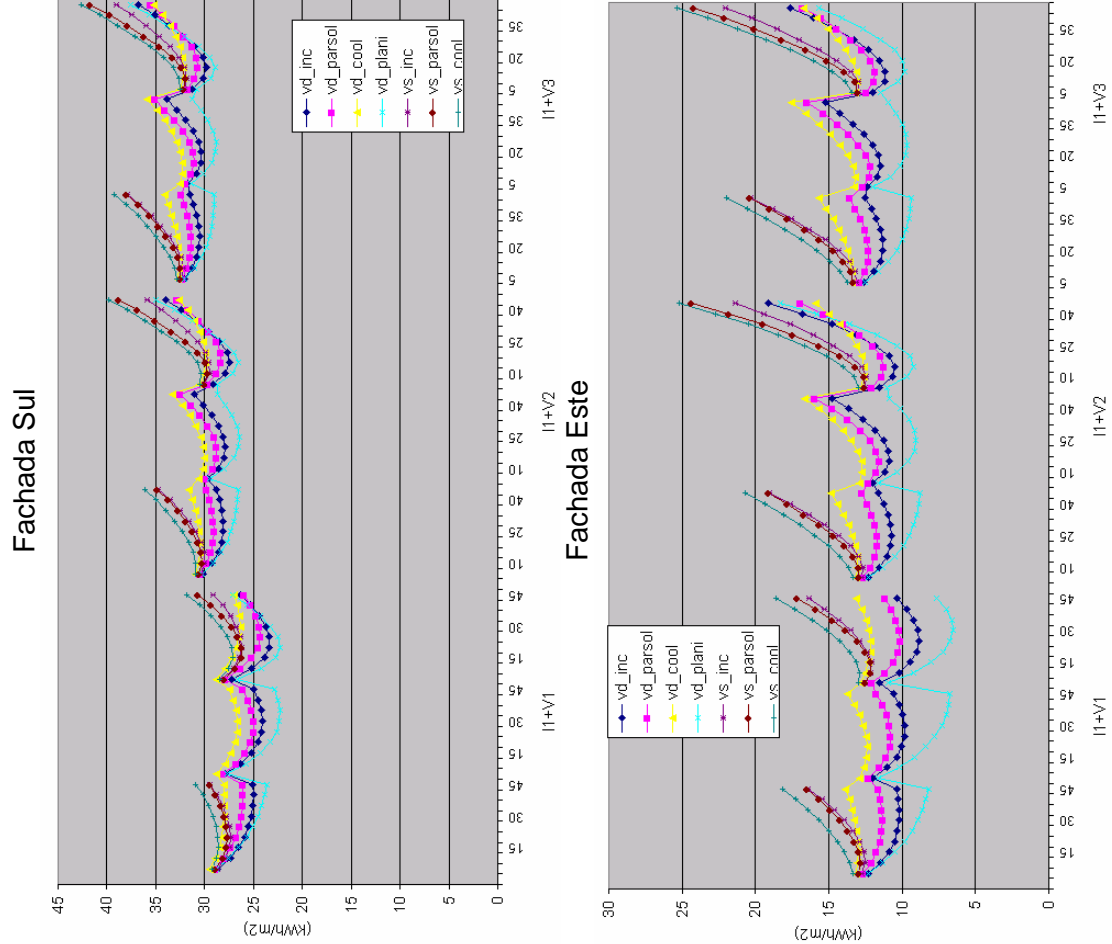


Figura 4.110 - Necessidades energéticas anuais de climatização I1+V1, V2, V3 (ganhos de 0 W/m<sup>2</sup>)

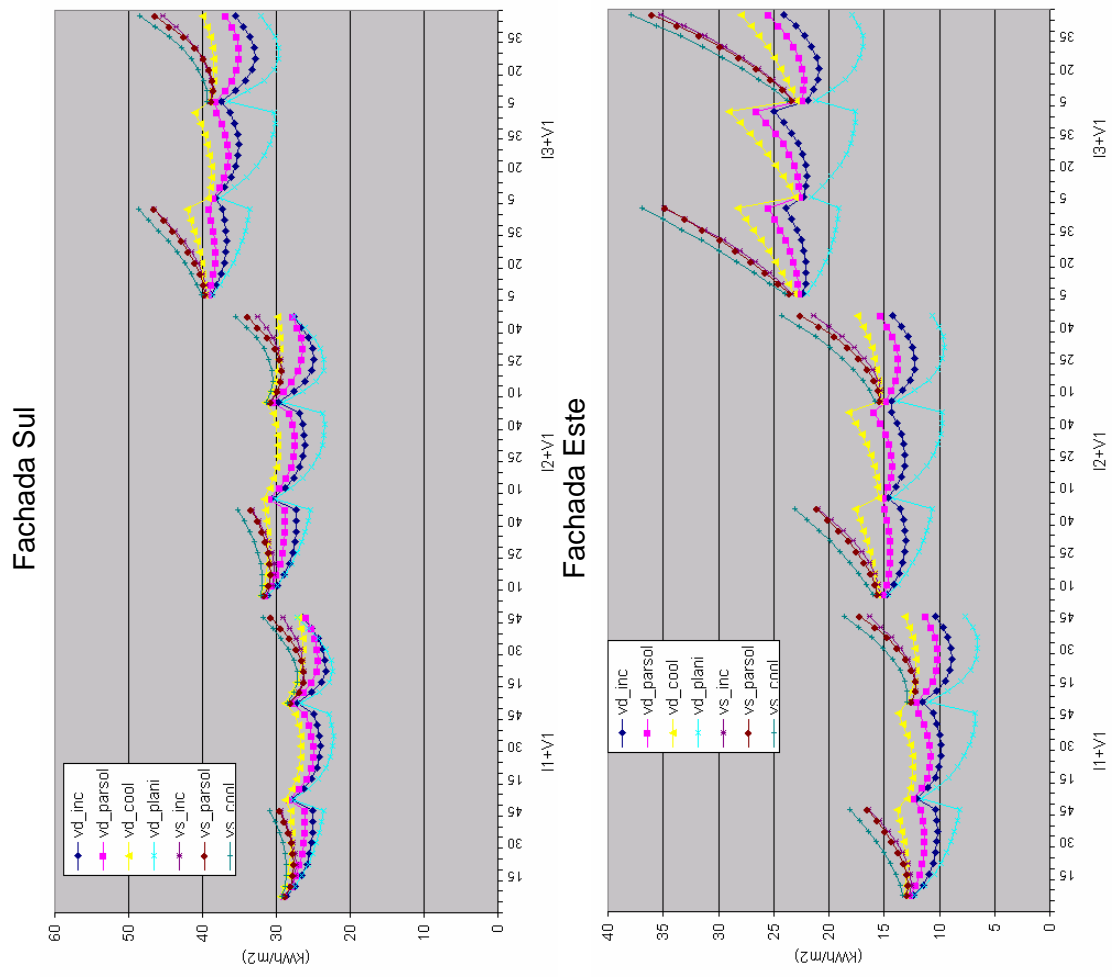
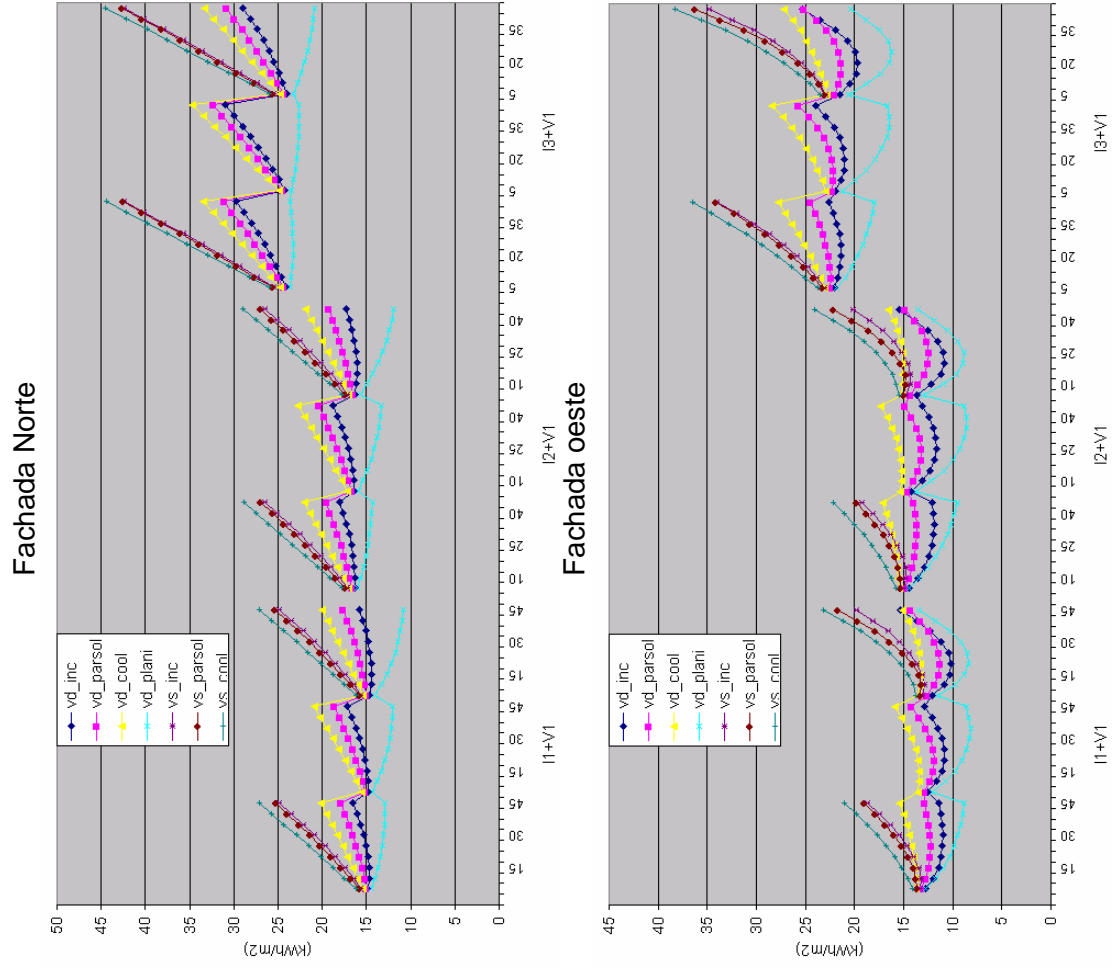


Figura 4.111 - Necessidades energéticas anuais de climatização I1, I2, I3+V1 (ganhos de 0 W/m<sup>2</sup>)

Dos resultados obtidos pode concluir-se:

- A otimização da área envidraçada depende do perfil de ocupação do espaço. Tendo em conta que as necessidades de climatização são relevantes na condição do espaço estar ocupado, no dimensionamento das áreas envidraçadas devem ser privilegiados os resultados referentes à condição com ganhos internos de  $10 \text{ W/m}^2$ .
- Na condição de ocupação contínua do espaço as necessidades energéticas são tanto menores quanto menor a área envidraçada, pelo que a dimensão é condicionada pelos requisitos de contacto visual com o exterior, ou seja, uma área superior de pelo menos 10% da área de pavimento.
- No caso de espaços não ocupados e sem ganhos internos de calor as necessidades energéticas de climatização diminuem com o aumento da área envidraçada para os vidros duplos com protecção solar exterior, tendo um valor optimizado de 15% a 25% quando o envidraçado dispõem de protecção solar interior. No caso dos vidros simples regista-se sempre um aumento das necessidades de climatização com o aumento da área envidraçada.
- A solução com vidro duplo baixo emissivo é aquela que apresenta menores necessidades energéticas anuais de climatização, apesar de em vários casos as diferenças face ao vidro duplo corrente serem pouco significativas e portanto esta alteração não ser economicamente viável.
- A solução de vidro simples, que se encontram em desuso, apresenta necessidades energéticas superiores às dos vidros duplos. Face ao pequeno acréscimo de custo dos vidros duplos face ao vidro e simples e as melhorias de conforto térmico e acústico que este proporciona, o vidro duplo deve ser a solução de referência para os envidraçados.
- A solução que permite maximizar a área envidraçada é a correspondente à solução de vidro com protecção solar exterior. No caso de espaço sem ganhos internos, é curioso registar que em alguns casos (fachada este por exemplo) as necessidades energéticas de climatização são minimizadas para protecção solar interior devido à preponderância das necessidades de aquecimento.
- A solução com estore veneziano na caixa do vidro duplo ou aplicado pelo interior é uma solução com comportamento intermédio entre a protecção exterior e a interior, que permite minimizar as tarefas de limpeza.

**Em face destes resultados pode referir-se que devem ser adoptados envidraçados com uma área que não exceda 15% da área de pavimento, independentemente da zona climática. Caso o espaço tenha ganhos de calor mais baixos, poderá ser admissível adoptar envidraçados maiores quando o vão estiver dotado de protecção solar exterior e vidros baixo emissivos e nos restantes casos a área envidraçada não deve exceder 20% na zona climática V1 e 15% nas zonas V2 e V3.**

#### 4.2.5.3- Análise do impacte de uma pala a sombrear envidraçados expostos a sul

Tendo em conta a vantagem das protecções solares exteriores para compartimentos exposto a sul foi analisado a influência de uma pala horizontal de sombreamento com um comprimento “optimizado” de 0,5 da altura do envidraçado (Figura 4.74) e ganhos térmicos internos de  $10 \text{ W/m}^2$ . Os resultados das necessidades energéticas são apresentados na Figura 4.104, na Figura 4.105, na Figura 4.106 e na Figura 4.107.



Estação Aquecimento

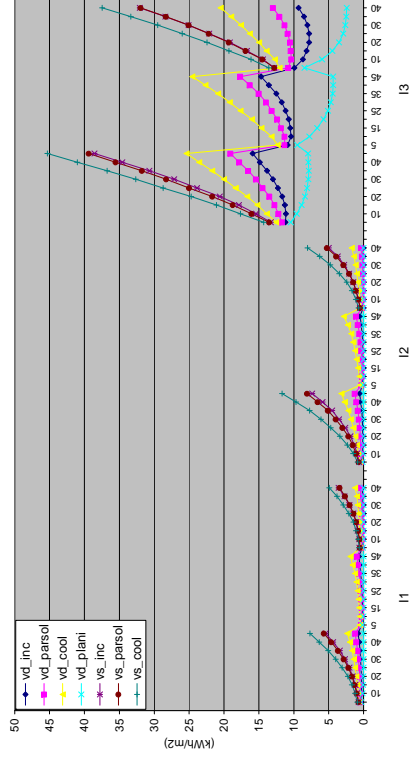


Figura 4.104 - Necessidades nominais de aquecimento para edifícios com pala de sombreamento exterior - Fachada sul

Annual I1+V1,V2,V3

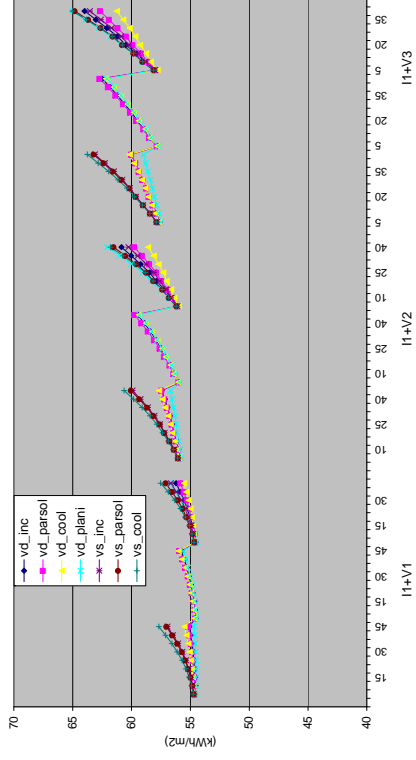


Figura 4.106 - Necessidades energéticas anuais, incluindo aquecimento, arrefecimento, iluminação e equipamentos I1+V1,V2,V3 - Fachada sul com pala de sombreamento exterior

Estação arrefecimento

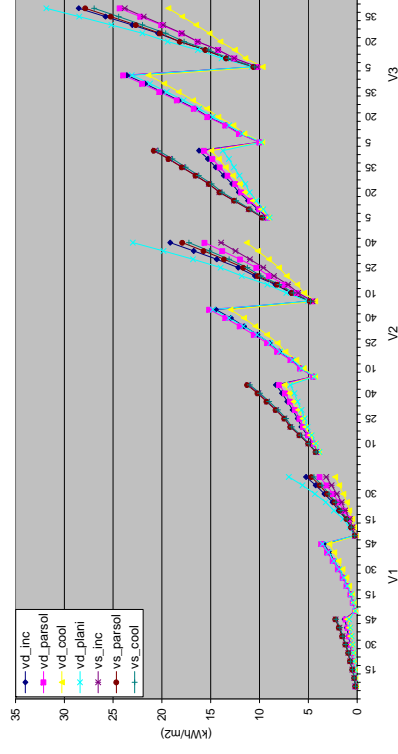


Figura 4.105 - Necessidades nominais de arrefecimento para edifícios com pala de sombreamento exterior - Fachada sul

Annual I1,I2,I3 + V1

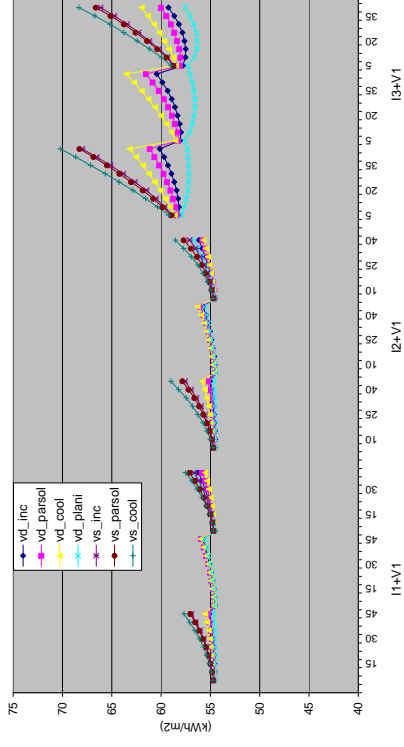


Figura 4.107 - Necessidades energéticas anuais, incluindo aquecimento, arrefecimento, iluminação e equipamentos I1,I2,I3+V1 - Fachada sul com pala de sombreamento exterior

Com base nos resultados obtidos para minimizar as necessidades energéticas os envidraçados devem apresentar uma área de sensivelmente 10% da área útil de pavimento. Para vidros baixo emissivos a área envidraçada pode ser maior, chegando a cerca de 40%

#### 4.2.5.4 - Necessidades energéticas

Com base nos valores obtidos para os casos estudados, sintetiza-se no Quadro 4.51 a estimativa das necessidades de climatização e no Quadro 4.52 a estimativa das necessidades energéticas anuais para iluminação, equipamentos e climatização, admitindo aquecimento e arrefecimento com uma bomba de calor com COP de 3 e o espaço ocupado.

Quadro 4.51 - Necessidades térmicas anuais (kWh/m<sup>2</sup>)

Zona Climática	Sul		Norte		Este		Oeste		Sul pala	
	Aq	Arre	Aq	Arre	Aq	Arre	Aq	Arre	Aq	Arre
1	0,3	2	3,5	0,3	1,7	2	2	2,3	0,3	0,6
2	0,3	10	3,5	5	1,8	11	2	10,2	0,3	7
3	11	17	20	11	16	16	15	19	11	13

Quadro 4.52 - Necessidades energéticas anuais (kWh/m<sup>2</sup>/ano)

Zona Climática	Sul	Norte	Este	Oeste	Sul pala
I1+V3	59	58	58	58	58
I1+V2	56	56	57	56	56
I1+V1	<b>55</b>	55	55	55	55
I2+V1	55	55	55	55	55
I3+V1	58	<b>60</b>	59	59	58

Em face das condições fronteiriça estabelecidas regista-se que as necessidades térmicas de aquecimento e de arrefecimento variam entre 0,3 kWh/m<sup>2</sup>/ano a 20 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Admitindo que a climatização é efectuada com bomba de calor de COP 3, as necessidades energéticas de climatização correspondem a cerca de 1% a 12% das necessidades anuais de energia eléctrica. Estes valores são cerca de metade do limite regulamentar do RCCTE que é de 51,5 kWh/m<sup>2</sup>/ano para a zona climática I1 e de 117 kWh/m<sup>2</sup>/ano para a zona climática I3, bem como do valor das necessidades de arrefecimento de 22 kWh/m<sup>2</sup>/ano para a zona climática V1sul e de 32 kWh/m<sup>2</sup>/ano para a zona climática V3sul.

Do consumo de energia indicado no Quadro 4.52, cerca de 88% a 99% refere-se aos equipamentos e ao consumo mínimo de iluminação. Deste modo, em espaços com envidraçados de dimensão “contida” (10% a 14%, Quadro 4.45 e Quadro 4.46), com controlo razoável da protecção solar, as necessidades energéticas para climatização são sensivelmente 1% a 12% das necessidades energéticas, consoante a zona climática.

No caso de espaço com baixas cargas internas deverá ser aumentada a área envidraçada quando existem protecções solares exteriores, devendo a área envidraçada situar-se entre 15% a 25% quando o envidraçado dispõem de protecção solar interior.

Destes resultados verifica-se que a aplicação de uma pala otimizada permite reduzir as necessidades de arrefecimento sem agravar as necessidades de aquecimento.

#### 4.2.6- Síntese e valores de referência de consumo nominal de energia em edifícios

No âmbito do estudo paramétrico de optimização da área envidraçada foram apreciados em detalhe dois espaços correspondentes à ocupação típica de um gabinete de escritórios e a um espaço de ocupação contínua do tipo quarto de habitação ou quarto de hotel com ocupação contínua. Os pressupostos do estudo detalhados nas secções anteriores são sintetizados no Quadro 4.53. No Quadro 4.54 e no Quadro 4.55 indicam-se os valores referentes às necessidades de aquecimento e de arrefecimento determinadas para esses espaços tendo em conta uma área envidraçada “optimizada”.

Quadro 4.53 - Síntese dos pressupostos do estudo paramétrico

	<b>Escritório</b>	<b>Contínua</b>
<b>Horas ocupação</b>	2607h	8760 h
<b>Ganhos internos</b>		
Ocupação	75 W	60 W
Iluminação	135/13,5 W	40/0 W
Equipamentos	100 W	75 W
<b>TOTAL</b>	<b>23/14 W/m<sup>2</sup></b>	<b>13/10 W/m<sup>2</sup></b>
<b>Caudal de ar</b>	1,85 rph	0,82 rph
<b>Inércia térmica</b>	Baixa	Forte
<b>Protecção solar:</b>	Actuada quando luminância superior a 1000 lux	Actuada quando radiação solar incidente superior a 500 W/m <sup>2</sup>
Estação aquecimento		
Estação arrefecimento	Actuada quando luminância superior a 1000 lux ou radiação solar incidente superior a 100 W/m <sup>2</sup>	Actuada quando a radiação solar incidente é superior a 100 W/m <sup>2</sup>

Quadro 4.54 - Necessidades térmicas - escritório (kWh/m<sup>2</sup>)

Zona Climática	Sul		Norte		Este		Oeste		Sul pala	
	Aq	Arre	Aq	Arre	Aq	Arre	Aq	Arre	Aq	Arre
1	2,0	3,0	17,5	0,5	6,7	2,7	10,4	3,7	2,7	1,1
2	3,4	8,1	18,2	3,4	11,4	8,4	10,4	7,4	4,7	5,7
3	15,2	11,1	40,7	6,7	29,6	10,4	28,3	11,4	17,8	9,1

Quadro 4.55 - Necessidades térmicas - ocupação contínua (kWh/m<sup>2</sup>)

Zona Climática	Sul		Norte		Este		Oeste		Sul pala	
	Aq	Arre	Aq	Arre	Aq	Arre	Aq	Arre	Aq	Arre
1	0,3	2	3,5	0,3	1,7	2	2	2,3	0,3	0,6
2	0,3	10	3,5	5	1,8	11	2	10,2	0,3	7
3	11	17	20	11	16	16	15	19	11	13

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que o edifício de escritórios apresenta necessidades de aquecimento superiores às do edifício de ocupação contínua. Contudo, este resultado à primeira vista contraditório é explicado pelo facto do controlo da iluminação interior no “escritório” forçar à actuação da protecção solar durante um maior período de tempo o que, além de minimizar os problemas de encandeamento, também reduz os ganhos solares. Por outro lado, atendendo à disponibilidade da luz natural, tal

permite reduzir a iluminação artificial, apresentando o edifício de escritórios ganhos térmicos internos equivalentes aos do edifício com ocupação contínua ( $14 \text{ W/m}^2$  escritório face a  $10 \text{ W/m}^2$  contínua). Por outro lado, o caudal de ventilação no edifício de escritórios é superior ao dobro do caudal de ventilação do edifício com ocupação contínua o que agrava de forma substancial (cerca de 60%) as perdas térmicas. Em relação às necessidades de arrefecimento, neste caso, o controlo da protecção solar é equivalente e o peso da diferença de caudal é menos relevante do que na estação de aquecimento (devido à menor diferença de temperatura entre o interior e o exterior na estação de arrefecimento), pelo que se justifica as maiores necessidades de arrefecimento no edifícios com ocupação contínua face ao edifícios de escritório na zona climática V2 e V3 devido ao aumento do período de ocupação.

No Quadro 4.47, no Quadro 4.48, no Quadro 4.51 e no Quadro 4.52 sintetizam-se as necessidades térmicas e de energia anuais para edifícios de escritórios e de habitação, descontando o efeito de pavimentos, coberturas, perfis das janelas e pontes térmicas.

#### **4.2.7- Avaliação do impacte das caixilharias**

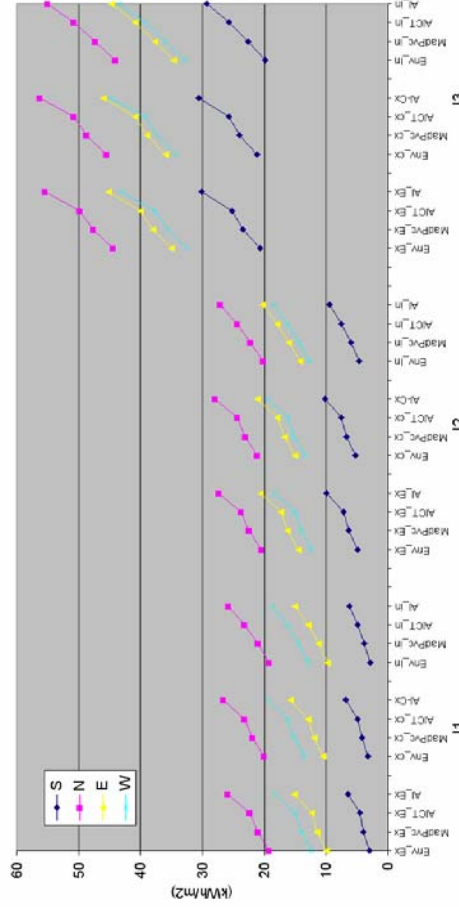
Nas secções anteriores foi avaliado o impacte da área envidraçada no desempenho térmico de edifícios, que varia consoante o clima e o dispositivo de protecção solar. Para avaliar o impacte da caixilharia considera-se uma área de vidro de 15% da área útil de pavimento. Pelo que, para avaliar o impacte da caixilharia de suporte do vidro efectua-se um estudo análogo ao das secções 4.2.3 e 4.2.5, admitindo caixilharia com uma fracção envidraçada de 30%, ou seja, um vão com cerca de 20% da área útil de pavimento e uma área de vidro de 15% da área de pavimento.

Para avaliar o impacte dos perfis considera-se caixilharia de alumínio ( $U_f=5,9 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ), caixilharia de alumínio com corte-térmico ( $U_f=3,0 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ) e caixilharia de madeira ou de PVC ( $U_f=2,0 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ) (Pinto, 2002). Neste estudo considerou-se que os caixilhos são de cor clara e que se encontra aplicado vidro duplo incolor com uma caixa-de-ar de 12 mm.

Os resultados obtidos para as quatro orientações principais são apresentados na Figura 4.108 para ocupação de escritório e na Figura 4.109 para ocupação contínua (com ganhos internos de  $10 \text{ W/m}^2$ ). Para cada zona climática são apresentados os resultados referentes à aplicação do estore veneziano no exterior, na caixa-de-ar do vidro duplo e pelo lado interior. Dos resultados obtidos verifica-se que:

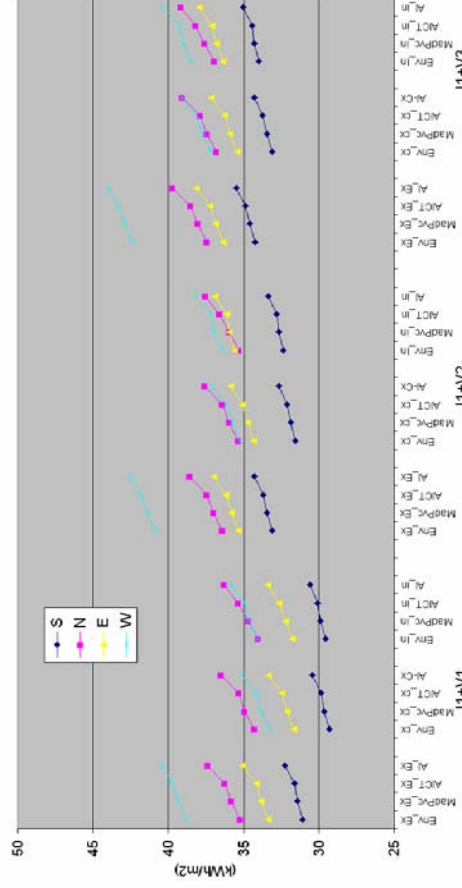
- os perfis afectam o desempenho térmico essencialmente na estação de aquecimento, pois no Verão as diferenças entre as necessidades térmicas de arrefecimento dos vãos com os diferentes perfis é mínima.
- face à situação ideal de ausência de perfis (Env) a existência de perfis de alumínio monolíticos agrava as necessidades de aquecimento em sensivelmente 6,5 a  $15 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$ , podendo os perfis de maior isolamento térmico minimizar este acréscimo. Estes resultados também evidenciam a pertinência de minorar a área dos perfis, para minorar o produto  $U_f \times A$  e portanto o acréscimo das necessidades de aquecimento.

**Estação Aquecimento**



**Necessidades térmicas de aquecimento**

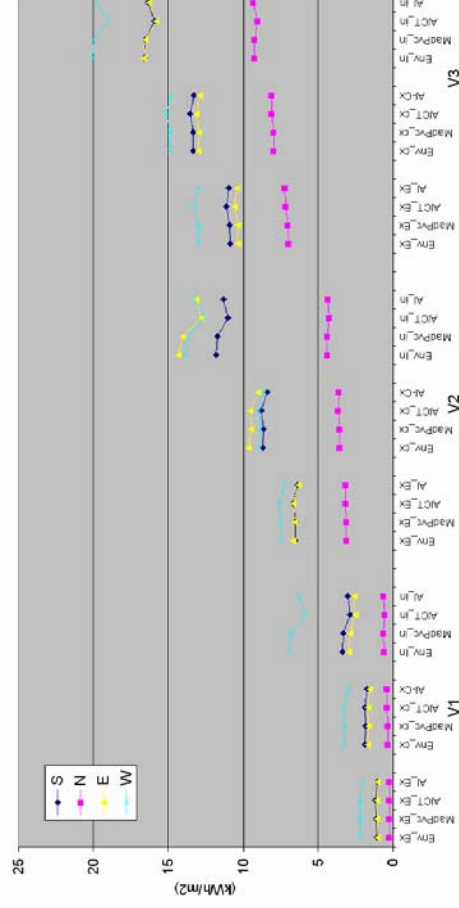
Anual I1+V1, V2, V3



**Necessidades energéticas anuais**

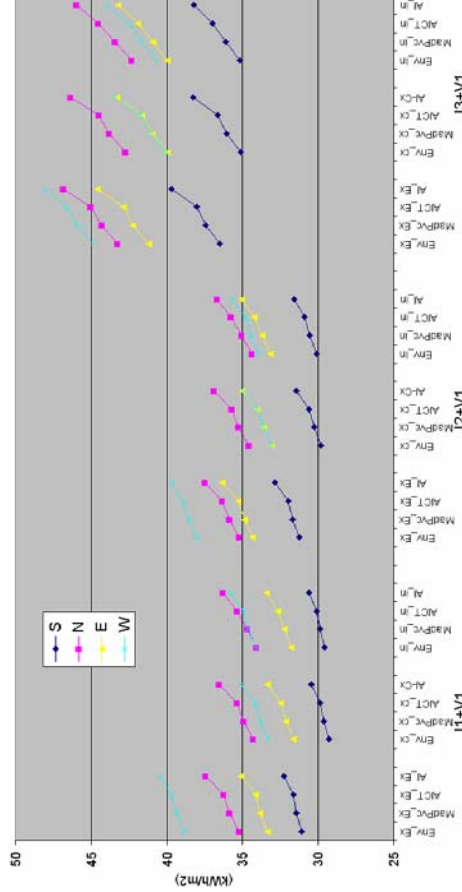
Figura 4.108 - Necessidades térmicas e energéticas do espaço gabinete - avaliação do impacto dos perfis

**Estação arrefecimento**



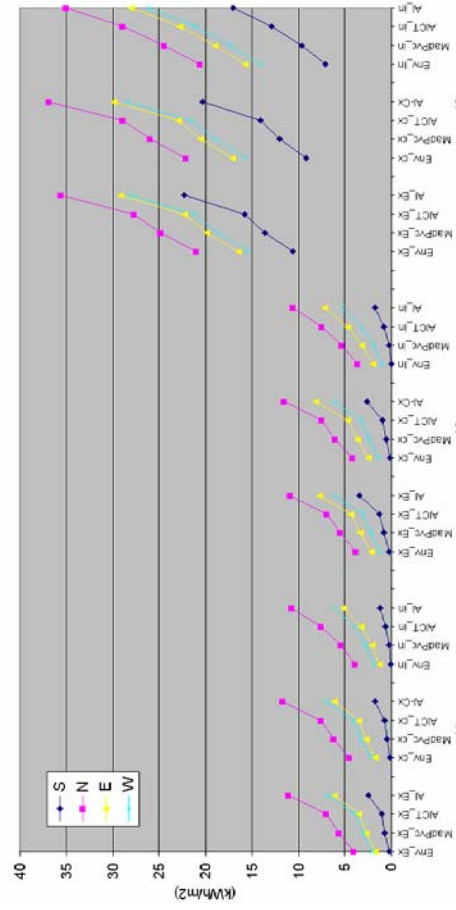
**Necessidades térmicas de arrefecimento**

Anual I1, I2, I3 + V1



**Necessidades energéticas anuais**

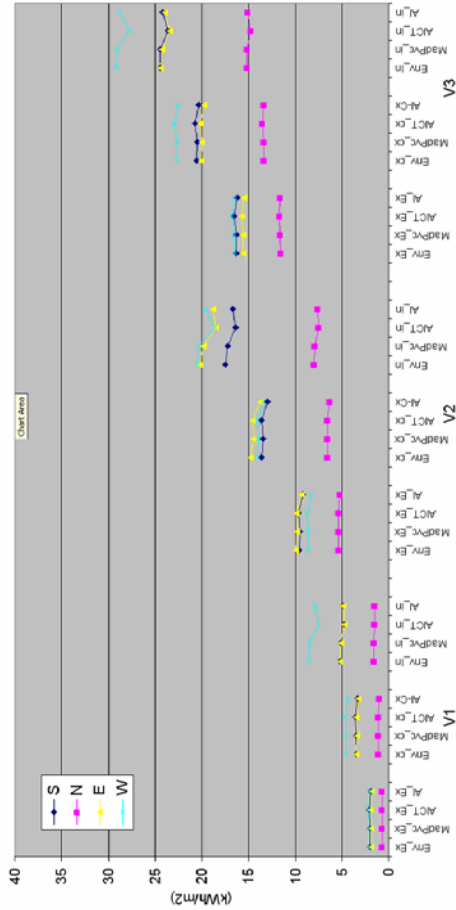
**Estação Aquecimento**



**Necessidades térmicas de aquecimento**

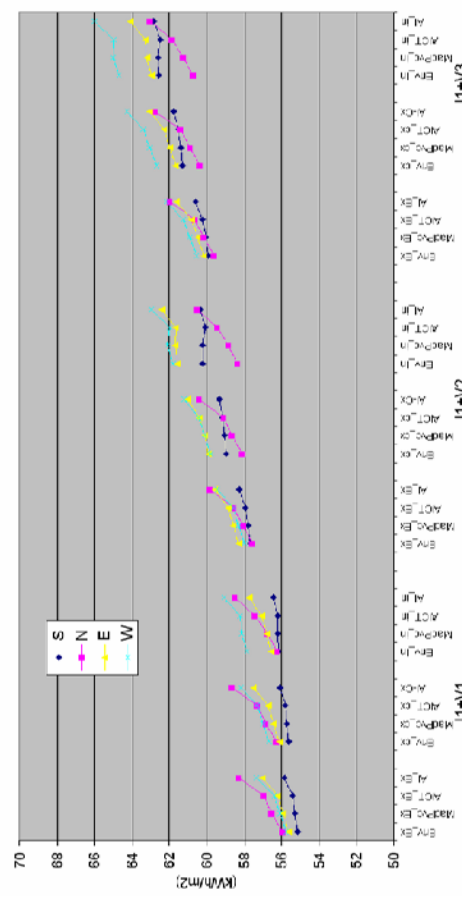
Anual I1+V1, V2, V3

**Estação arrefecimento**

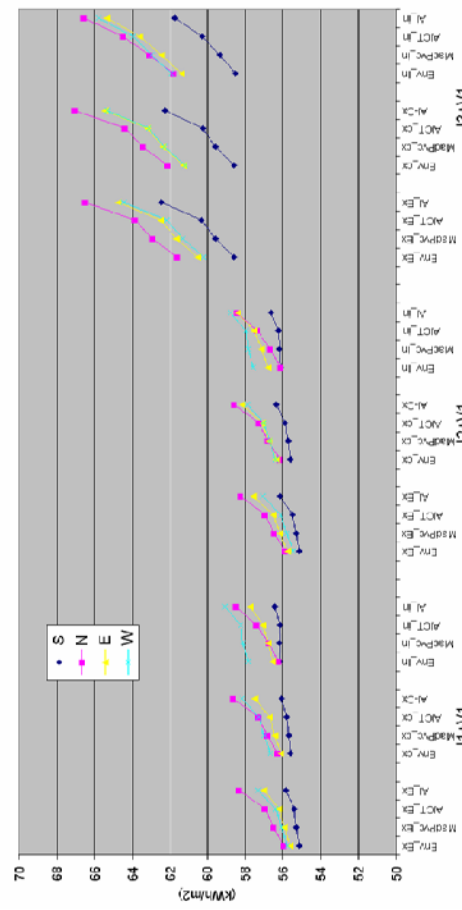


**Necessidades térmicas de arrefecimento**

Anual I1, I2, I3 + V1



**Necessidades energéticas anuais**



**Necessidades energéticas anuais**

Figura 4.109 - Necessidades térmicas e energéticas do espaço quarto (10 W/m²) - avaliação do impacto dos perfis

Legenda:

- MadPvc, envidraçado com perfis de madeira ou de PVC ( $U_f=2,0 \text{ W/m}^2/\text{K}$ );
- AICT, envidraçado com perfis de madeira ou de PVC ( $U_f=3,0 \text{ W/m}^2/\text{K}$ );
- AL, envidraçado com perfis de madeira ou de PVC ( $U_f=5,9 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ).

Das figuras anteriores (Figura 4.108 e Figura 4.109) também se regista a vantagem da localização dos vãos a Sul e da minimização dos vãos a Oeste.

#### 4.2.8- Avaliação do ciclo de vida de vãos envidraçados

Nas secções anteriores foi determinado o impacto dos envidraçados nas necessidades térmicas de climatização, na secção 4.1.6.5 foi apreciado o impacto ambiental associado à fase de construção e desconstrução dos envidraçados, pelo que nesta secção se efectua uma análise integrada. Tendo em conta a multiplicidade de soluções apreciadas na avaliação do desempenho térmico, nesta secção considera-se apenas o caso correspondente à situação de um envidraçado otimizado e no caso de ocupação de escritórios considera-se também a solução de fachada-cortina. Neste estudo foram considerados os climas de Faro, Lisboa e Bragança.

##### 4.2.8.1 - Edifícios de serviços do tipo administrativo

Na ACV da ocupação típica de escritório consideram-se os pressupostos apresentados na secção 4.2.3. Na determinação das necessidades energéticas consideram-se as implicações dos vãos envidraçados nas cargas térmicas e de iluminação. Os resultados obtidos referentes a envidraçados com vidro duplo incolor e protecção solar com estore veneziano encontram-se na Figura 4.110, enquanto a solução referente à utilização de um vidro duplo incolor baixo emissivo se encontra na Figura 4.111. Neste estudo também se inclui uma fachada-cortina 100% envidraçada e uma fachada cortina 50% envidraçada e 50% com painel sanduíche. As necessidades energéticas anuais reportam-se à unidade de área de pavimento.

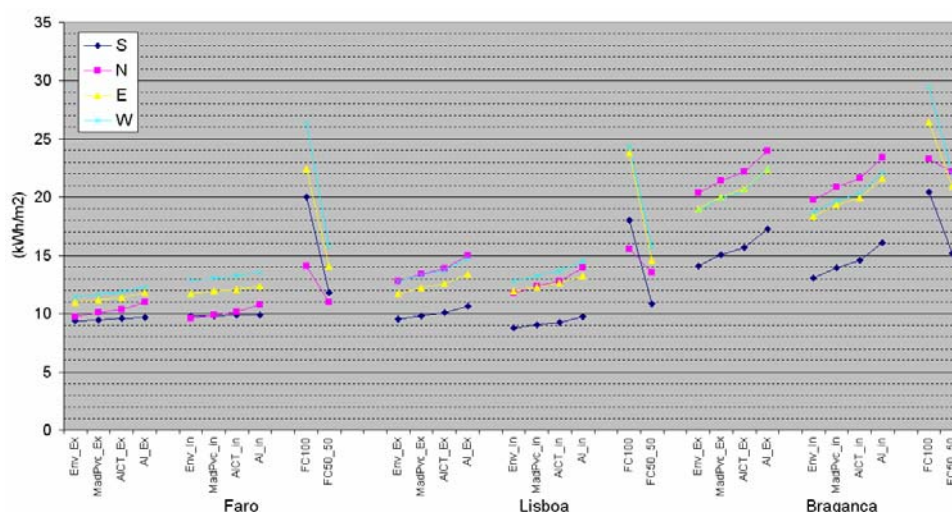


Figura 4.110 - Necessidades energéticas anuais (Aq+Arr+Luz) - vãos com vidro duplo incolor



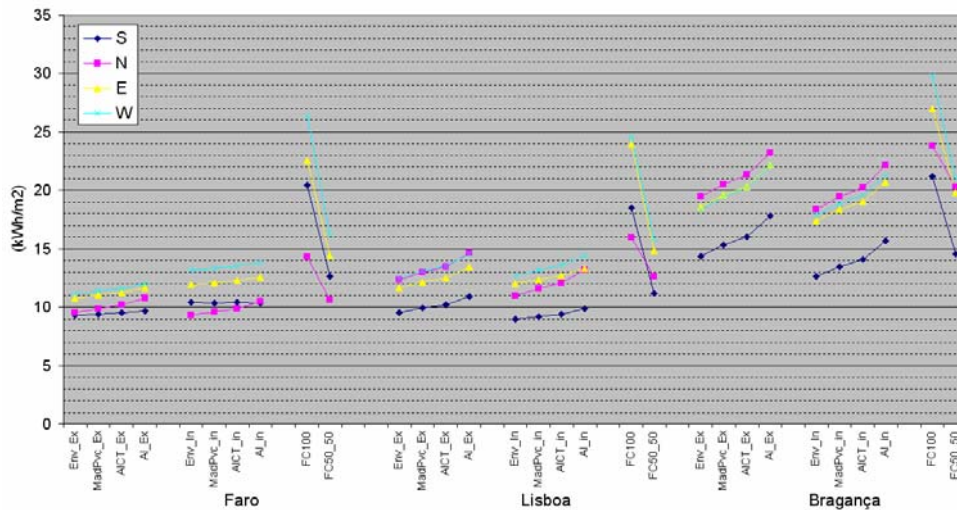


Figura 4.111 - Necessidades energéticas anuais (Aq+Arr+Luz) - vãos com vidro duplo incolor baixo emissivo

De uma forma geral a aplicação de vidros baixo emissivos e protecção pelo interior permite reduzir as necessidades de aquecimento, aumentando contudo as necessidades de arrefecimento, passando-se o oposto para a protecção solar exterior. Pelo que este efeito oposto Inverno/Verão conduz a que os vidros baixo emissivos permitam reduzir as necessidades de climatização em apenas 5% face ao vidro duplo incolor. Os perfis têm um impacte importante essencialmente na estação de aquecimento, sendo tanto maior quanto mais frio for o clima. Regista-se que os perfis de madeira aumentam em sensivelmente 6% as necessidades de climatização (face ao caso ideal de ausência de perfis), sendo esse aumento de 11% e 22% para os perfis de alumínio de corte-térmico e de alumínio. Ou seja, os perfis podem aumentar as necessidades climatização até 11 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Em concordância com resultados anterior, a aplicação de uma fachada totalmente envidraçada com protecção pelo interior apresenta pior desempenho que uma solução tradicional.

A carga ambiental associada às fachadas é apresentada na Figura 4.112 para soluções com vidro duplo corrente e na Figura 4.113 para vidro duplo baixo emissivo. Os valores correspondem a um período de vida útil de 50 anos e são expressos por unidade de área de pavimento.

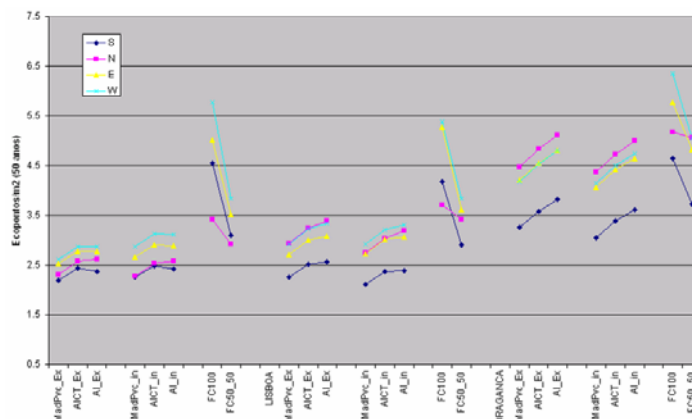


Figura 4.112 – Indicador ambiental único para o ciclo de vida de uma fachada com vidro duplo incolor



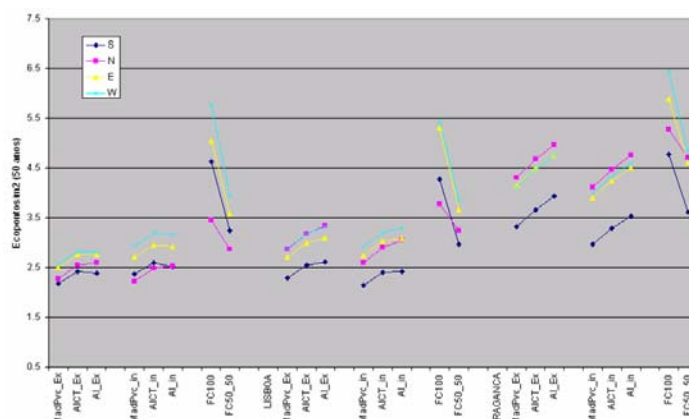


Figura 4.113 – Indicador ambiental único para o ciclo de vida de uma fachada com vidro duplo incolor baixo emissivo

Com base na ACV, regista-se o benefício da utilização de vãos envidraçados de dimensão limitada (20% da área de pavimento) e com perfis de madeira ou PVC. Apesar da vantagem do isolamento térmico e das menores necessidades energéticas dos perfis de alumínio com corte-térmico face aos perfis de alumínio monolítico, regista-se que em Lisboa e Faro o desempenho ambiental desses dois perfis é praticamente equivalente pois a poupança de energia de climatização dos perfis de alumínio de corte-térmico é equivalente à maior carga ambiental associada à maior quantidade de alumínio envolvida na produção desses perfis.

#### 4.2.8.2 - Edifícios do tipo residencial

Na ACV da ocupação de ocupação contínua de um espaço consideram-se os pressupostos apresentados na secção 4.2.5. Na determinação das necessidades energéticas consideram-se as implicações dos vãos envidraçados apenas nas cargas térmicas, pois em habitações o consumo de energia para iluminação ocorre predominantemente no período nocturno, não tendo os envidraçados uma implicação tão directa como nos edifícios de serviços.

Na determinação das necessidades energéticas de climatização anuais assumiu-se uma Bomba de calor com COP médio de 3 e um factor de utilização de climatização de 50%. Os resultados obtidos referentes a envidraçados com vidro duplo incolor e protecção solar com estore veneziano encontram-se na Figura 4.114, enquanto a solução referente à utilização de um vidro duplo incolor baixo emissivo se encontra na Figura 4.115. As necessidades energéticas anuais reportam-se à unidade de área de pavimento.

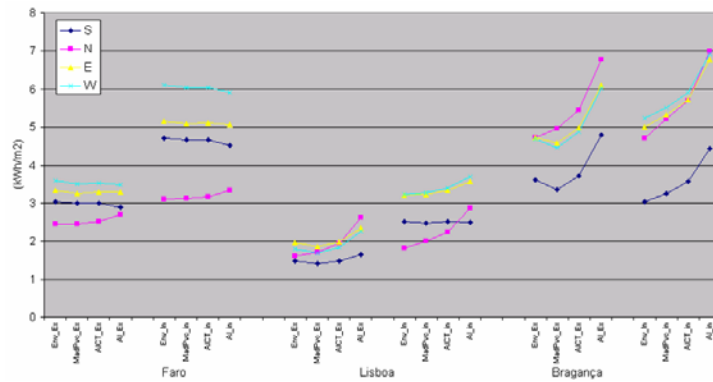


Figura 4.114 - Necessidades energéticas anuais (Aq+Arr) - vãos com vidro duplo incolor

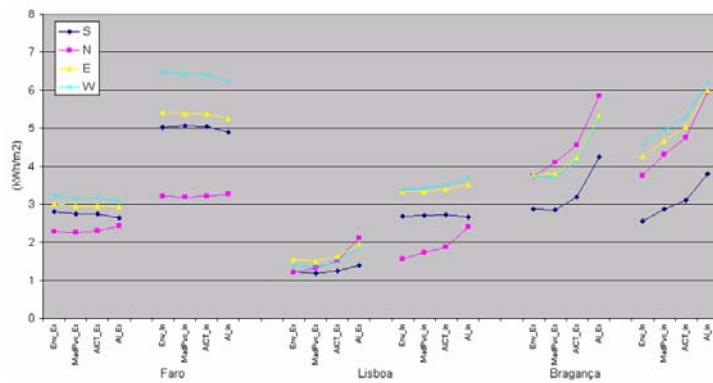


Figura 4.115 - Necessidades energéticas anuais (Aq+Arr) - vãos com vidro duplo incolor baixo emissivo

A aplicação de vidros baixo emissivos permite reduzir as necessidades de aquecimento, enquanto na estação de arrefecimento tem um efeito positivo (redução das necessidades de arrefecimento) para protecção solar exterior e o oposto para as protecções interiores. Pelo que, em Faro e para algumas exposições em Lisboa, a aplicação de vidros baixo emissivos com protecção solar interior aumenta as necessidades energéticas face à solução com vidro duplo incolor. Em relação aos perfis estes têm um impacte importante essencialmente na estação de aquecimento, sendo o impacte tanto maior quanto mais frio for o clima. Os perfis de madeira apresentam uma alteração das necessidades de climatização negligenciável face ao caso ideal (de ausência de perfis), enquanto no caso dos perfis de alumínio de corte-térmico existe um acréscimo de sensivelmente 6% e no caso dos perfis de alumínio monolítico de 18%. Ou seja, os perfis podem aumentar as necessidades de energia eléctrica para climatização com bomba de calor até 5 kWh/m<sup>2</sup>/ano.

A carga ambiental associada às fachadas é apresentada na Figura 4.116 para soluções com vidro duplo corrente e na Figura 4.117 para vidro duplo baixo emissivo. Os valores correspondem a um período de vida útil de 50 anos e são expressos por unidade de área de pavimento.

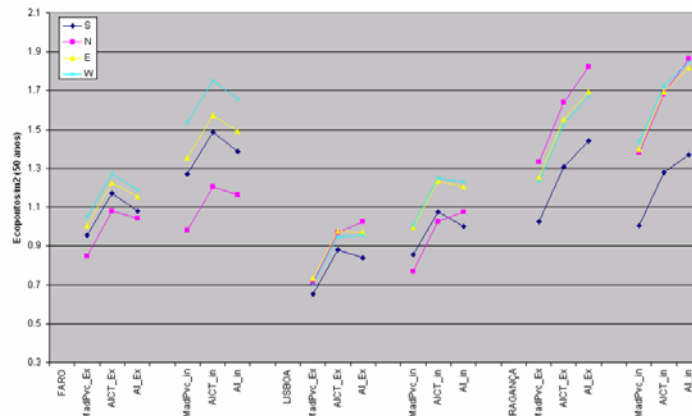


Figura 4.116 – Indicador ambiental único para o ciclo de vida de uma fachada com vidro duplo incolor - quarto

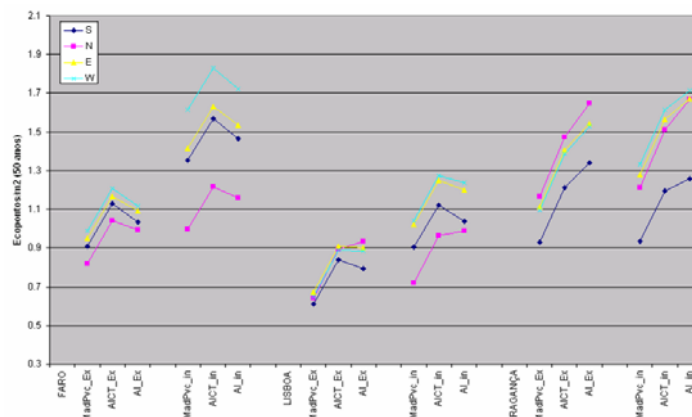


Figura 4.117 – Indicador ambiental único para o ciclo de vida de uma fachada com vidro duplo incolor baixo emissivo – quarto

Com base na ACV, regista-se o benefício da utilização de caixilharia de madeira. Apesar da vantagem do isolamento térmico e das menores necessidades energéticas dos perfis de alumínio com corte-térmico face aos perfis de alumínio monolítico, regista-se que essa poupança de energia de climatização não compensa a carga ambiental associada à maior quantidade de alumínio envolvida na produção desses perfis em climas como Faro e Lisboa.

#### 4.2.9 - Método experimental proposto para a determinação do factor solar dos vãos envidraçados e simulação com ESP-r

Tendo em conta o elevado custo de construção das células experimentais PASSYS e os seus elevados custos de exploração/utilização, considerou-se pertinente investigar a possibilidade de através do ensaio em células totalmente passivas obter as propriedades relevantes de protecção solares de vãos com base em modelos numéricos. Ou seja, através da medição da temperatura interior e das condições meteorológicas obter o valor das propriedades dos envidraçados com base na modelação em regime dinâmico da célula de teste, fazendo variar as propriedades do vão envidraçado de forma a minimizar o erro na temperatura do ar prevista.

Com essa finalidade foram adaptadas duas células de teste existentes no LNEC (Santos, 1993), reforçando o isolamento térmico pelo interior com placas de 60 mm de EPS, de forma a diminuir a constante de tempo da célula e a aumentar o acréscimo de temperatura associado aos ganhos solares, Figura 4.118. A caracterização das células experimentais e a descrição do método esquematizado na Figura 4.119 é efectuada no anexo C.



Figura 4.118 - Aspecto exterior das células de teste

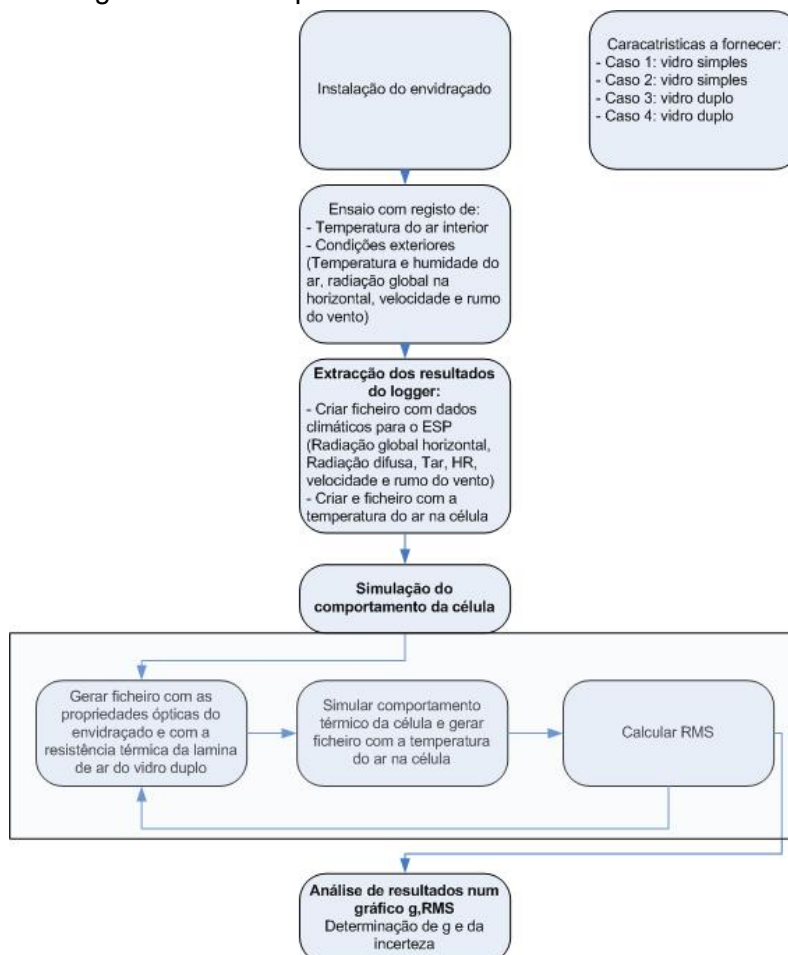


Figura 4.119 - Diagrama do método de ensaio

A campanha experimental envolveu ensaios iniciais para apreciar a equivalência do comportamento das células e ensaios de soluções envidraçadas das quais se conhecem as suas propriedades. No Quadro 4.56 indicam-se as soluções de vãos envidraçados apreciados.

Quadro 4.56 - Síntese das configurações ensaiadas e das propriedades declaradas

Tipo de envidraçado	U (W/m <sup>2</sup> /K)	g	τ	ρ	α
Vidro simples incolor Planilux de 4 mm	5,8	0,85	0,83	0,08	0,09
Vidro simples reflectante cool-lite SS414 de 6 mm	4,7	0,23	0,07	0,14 (e)	0,79
Vidro duplo incolor Planilux-Planilux 4-12-4	2,9	0,75	0,70	0,13	0,17
Vidro duplo Parsol-Planilux 6-12-4	2,8	0,46	0,37	0,07	0,56
Vidro duplo Cool-lite SS414-Planilux 6-12-4	2,5	0,15	0,06	0,13	0,81

Os resultados experimentais e numéricos do ensaio do vidro simples incolor encornam-se na Figura 4.120. Na Figura 4.121 indica-se o valor do erro RMS (eq. 4.1) obtido no decurso do processo de optimização destinado a determinar o factor solar com o modelo de simulação e no Quadro 4.57 apresenta-se o valor estimado para o factor solar do envidraçado de cada uma das células. Na Figura 4.122 apresentam-se os resultados experimentais e da simulação do vidro simples reflectante e na Figura 4.123 apresenta-se o valor do erro RMS obtido no decurso do processo de optimização para cálculo do factor solar e no Quadro 4.57 apresenta-se o valor estimado para o factor solar do envidraçado de cada uma das células.

Com base nos resultados do Quadro 4.57 verifica-se que o método experimental apresenta desvios importantes na determinação do factor solar do vidro reflectante, ou seja, o método experimental em soluções de baixo factor solar pode apresentar erros significativos, da ordem do valor do factor solar que se está a medir devido ao pequeno acréscimo da temperatura interior.

Atendendo ao âmbito desta tese, este aspecto sobre a ACV de edifício, este aspecto não foi aprofundado, contudo, os resultados experimentais obtidos servem para comprovar a fiabilidade do modelo de simulação térmica utilizado e do seu utilizador. Contudo, também mostram que podem existir múltiplas propriedades dos vidros que permitem um ajuste aceitável às temperaturas medidas no interior das células e, portanto, nas validações experimentais do desempenho térmico de alguns elementos da envolvente devem ser efectuado estudos de sensibilidade, pois a incerteza pode ser significativa.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{ar\ medida}(i) - T_{ar\ calculada}(i))^2}{n}} \quad \text{eq. 4.1}$$

Quadro 4.57 - Resultados do ensaio do vidro simples incolor

Vidro simples	Célula	Tipo de Vidro Instalado e factor dólár declarado pelo fabricante	g <sub>experimental</sub>	RMS
Incolor	1	Vidro simples incolor (g=0,85)	0,85±0,04	0,56
Incolor	2	Vidro simples incolor (g=0,85)	0,81±0,04	0,40
Reflectante	1	Vidro simples reflectante (g=0,23)	0,32±0,03	0,31
Reflectante	2	Vidro simples reflectante (g=0,23)	0,23±0,03	0,50

Lib: celula.res: Results for celula  
 Period: Tue-08-Feb@00h05(2005) to Sat-12-Feb@23h54(2005) : sim@10m, output@10m  
 Zones: celula\_1 celula\_2 solo1 Solo2 celula1\_Med celula2\_Med

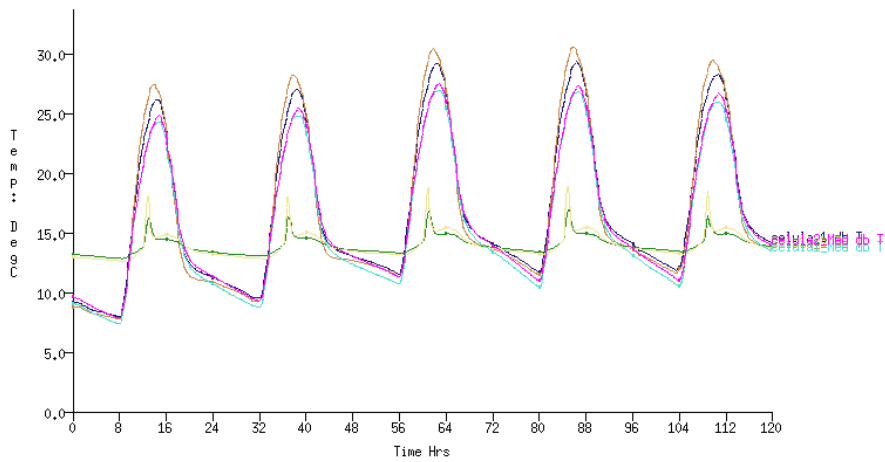


Figura 4.120 - Ensaio vidro simples incolor / vidro simples incolor - resultados experimentais e resultados numéricos

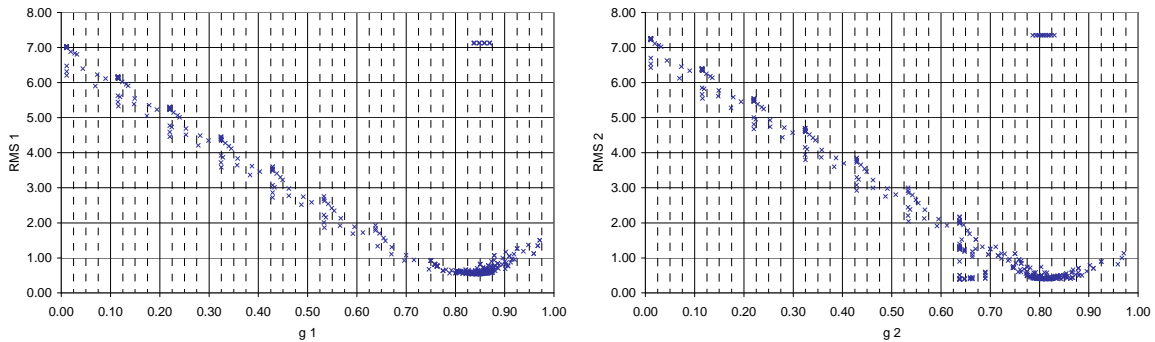


Figura 4.121 - Ensaio vidro simples incolor / vidro simples incolor

Lib: celula.res: Results for celula  
 Period: Mon-14-Mar@00h05(2005) to Thu-17-Mar@23h54(2005) : sim@10m, output@60m  
 Zones: celula\_1 celula\_2 solo1 Solo2 celula1\_Med celula2\_Med

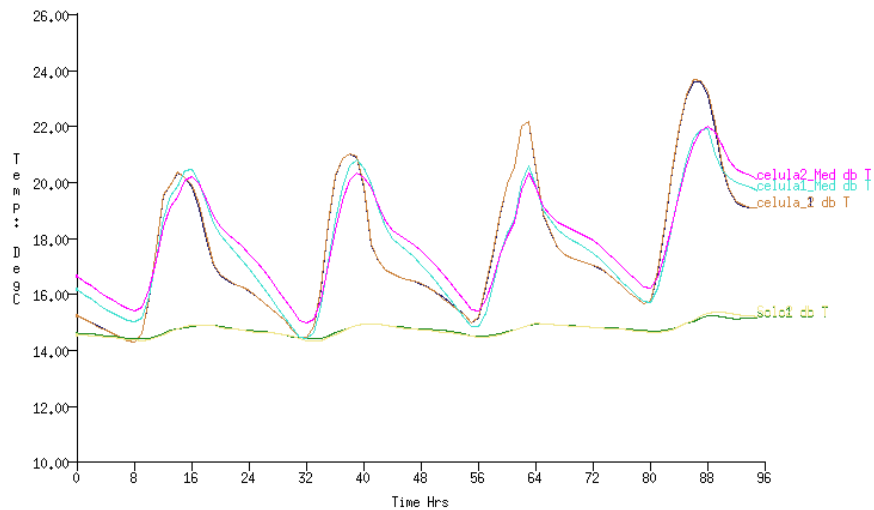


Figura 4.122 - Ensaio vidro simples cool-lite / vidro simples cool-lite - resultados experimentais e resultados numéricos

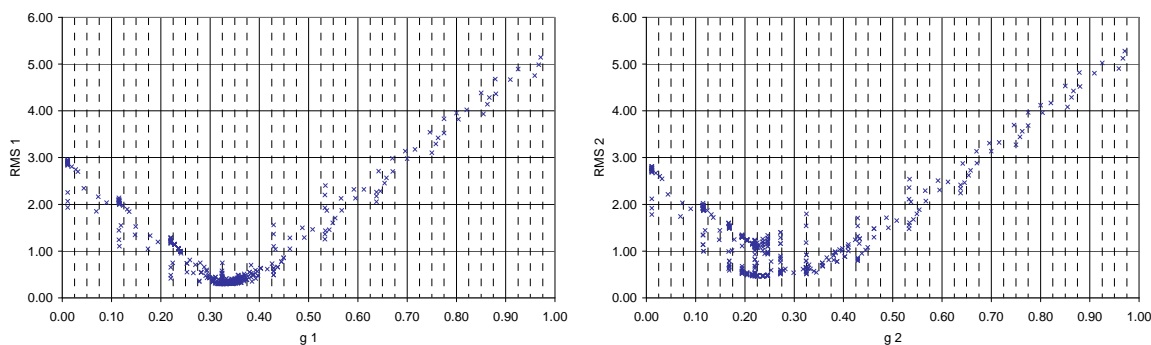


Figura 4.123 - Ensaio vidro simples cool-lite / vidro simples cool-lite - resultados do programa de optimização

#### 4.2.10- Notas conclusivas

Foi efectuado um estudo destinado a determinar as dimensões adequadas das palas horizontais de sombreamento de vãos envidraçados que minimizem as necessidades energéticas anuais, através do equilíbrio entre sombreamento no Verão e no Inverno. Dos resultados obtidos conclui-se que estas palas são adequadas essencialmente para envidraçadas expostas no quadrante sul, onde possibilitam uma redução da incidência da radiação solar de 35% na estação de arrefecimento, reduzindo em 25% a radiação incidente na estação de aquecimento. Para edifícios dominados por cargas de arrefecimento as palas devem apresentar uma dimensão de 0,6 vezes a altura do envidraçado (ou a altura do envidraçado acrescida do afastamento da pala ao envidraçado) enquanto nos restantes casos devem apresentar um valor de 0,5 da altura do envidraçado. As palas devem apresentar um afastamento ao envidraçado inferior a 0,2 ( $Y2/Y1$ ) bem como devem apresentar uma extensão lateral de pelo menos 0,5 vezes a altura do envidraçado ( $Y1$ ). No sentido de maximizar a eficácia das palas de sombreamento os envidraçados devem apresentar uma relação largura/altura superior a 1.

Foi efectuado um estudo paramétrico destinado a obter uma estimativa da área envidraçada que minimiza as necessidades energéticas anuais de climatização e de iluminação, considerando um sistema de iluminação eficiente e a utilização de um estore veneziano pelo exterior, interior a na caixa-de-ar dos vidros duplos. Desse estudo conclui-se que a área de vidro deve situar-se entre 15 a 25% da área de pavimento, em edifícios com ocupação diurna nos dias úteis (Quadro 4.45) e inferior a 15% nos edifícios com ocupação continua. Nas figuras (Figura 4.69, Figura 4.70, Figura 4.71, Figura 4.72, Figura 4.75, Figura 4.76, Figura 4.101, Figura 4.102, Figura 4.103 e Figura 4.104) apresenta-se a variação das necessidades de aquecimento, arrefecimento e das necessidades energéticas anuais função da área envidraçada. Destes resultados regista-se que deve ser evitada a utilização de vidros reflectantes com baixa transmitância e que devem ser privilegiados vidros duplos incolores com isolamento térmico reforçado. Caso sejam adoptadas palas de sombreamento nas fachadas expostas a Sul é possível adoptar áreas envidraçadas superiores às indicadas no Quadro 4.45, sem agravar de forma significativa as necessidades energéticas anuais.

No estudo foi evidenciada a importância de adoptar condições de conforto menos restritivas para reduzir as necessidades térmicas anuais. Com base nos critérios adoptados seria possível dispensar o arrefecimento e o aquecimento na zona climática I1,V1, tendo em conta o reduzido número de horas anuais com temperatura superior a 30°C e inferior a

16°C. Do estudo realizado do gabinete, regista-se que a inércia térmica terá um efeito limitado na redução das necessidades térmicas anuais, pois se por um lado permite reduzir as necessidades de arrefecimento, pode conduzir a um acréscimo das necessidades de aquecimento, pelo que pode ser possível implementar uma construção com compartimentação leve, facilmente desmontável/adaptável.

Da análise do impacte energético e ambiental das caixilharias regista-se a vantagem da utilização de perfis de madeira. Em relação aos perfis de alumínio com corte-térmico, apesar de estes conduzirem a uma redução das necessidades energéticas face aos perfis de alumínio monolítico, verifica-se que essa economia de energia não compensa a carga ambiental incorporada nos perfis das janelas, pelo que deve ser dada preferência à utilização de janelas de alumínio monolítico face ao alumínio com corte-térmico (Figura 4.110, Figura 4.111, Figura 4.112, Figura 4.113, Figura 4.114, Figura 4.115, Figura 4.116 e Figura 4.117). Dos resultados obtidos regista-se que a solução de fachada-cortina com uma área opaca de cerca de 50% da fachada permite obter um desempenho energético próximo das soluções de fachadas tradicionais, apresentando contudo um desempenho ambiental inferior às fachadas tradicionais. OS resultados evidenciam ser desaconselhada a utilização de fachadas-cortina 100% envidraçadas.

Na análise de fachada dupla pele do tipo *box-window*, regista-se que no clima português se deve privilegiar as fachadas com aberturas controladas, que fecham o canal de ar nos períodos de aquecimento e que o permitem ventilar nos períodos de arrefecimento. Caso a fachada tenha aberturas fixas devem ser privilegiadas as soluções com o canal de ar ventilado para o exterior pois, devido à elevada área envidraçada e à radiação solar disponível, os espaços adjacentes a estas fachadas são dominados pelas cargas de arrefecimento (Figura 4.93, Figura 4.94, Figura 4.95, Figura 4.96, Figura 4.97 e Figura 4.98). De uma forma geral as fachadas dupla-pele não apresentam um desempenho superior ao de uma fachada tradicional com área de vidro otimizada, podendo contudo apresentar um desempenho substancialmente superior ao das fachadas totalmente envidraçadas com vidro duplo.

Com base no estudo paramétrico foi evidenciado o potencial associado à reabilitação de edifícios existentes em relação ao sistema de iluminação e aos equipamentos (computadores pessoais), que podem permitir reduzir as necessidades energéticas anuais e as necessidades de arrefecimento (Figura 4.77, Figura 4.78, Figura 4.79 e Figura 4.80).

Desenvolveu-se um método experimental passivo para determinar o factor solar de vãos envidraçados, o qual apresenta uma incerteza relativamente elevada de  $\pm 0,10$ , o que inviabiliza a sua utilização para soluções com baixo factor solar. Contudo, dos resultados obtidos foi possível evidenciar a fiabilidade do modelo de simulação térmica utilizado neste trabalho. Com base neste estudo também é evidenciado que existe uma gama de valores significativamente elevada que pode permitir obter um erro RMS inferior a 1°C entre os valores experimentais e teóricos.

## **4.3 - VENTILAÇÃO, PERMEABILIDADE AO AR E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

### **4.3.1 - Aspectos gerais**

Tendo em conta que podem existir edifícios com permeabilidade ao ar elevada e que existem diferentes limites e recomendações considera-se relevante apreciar a



permeabilidade ao ar de edifícios portugueses e estimar a importância de alguns elementos da envolvente, nomeadamente as janelas e as caixas de estore. Com estes ensaios também se pretende estimar um valor médio da construção portuguesa e avaliar que valores suficientemente baixos podem ser atingidos com essa construção.

Com os resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar obtidos pretende-se avaliar a importância da permeabilidade ao ar no balanço energético de edifícios e na taxa de renovação de ar, pois durante muito tempo (e actualmente também) considerava-se que essas infiltrações de ar eram suficientes para assegurar a renovação do ar. Para avaliar esse impacto foram estudados edifícios com sistemas de ventilação natural e de ventilação mecânica.

Dos resultados obtidos constatou-se que em alguns casos as infiltrações de ar podem ter um impacto importante nas perdas térmicas e que noutros casos não eram suficientes para assegurar a QAI. Nesse sentido foram aferidos limites exequíveis para a permeabilidade ao ar dos edifícios que minimizem de forma razoável o impacto das infiltrações de ar nas perdas térmicas, considerando que se encontram adequadamente implementados os sistemas de ventilação.

Para realizar a apreciação do desempenho térmico dos edifícios é utilizado o modelo ESP-r no qual a modelação da ventilação se encontra acoplada ao modelo de simulação térmica, tendo sido desenvolvido pelo autor um modelo para simular o efeito de interacção vento caudal nos ventiladores estáticos e as grelhas de ventilação auto-reguláveis.

Por fim, com base no impacto das infiltrações e dos sistemas de ventilação no balanço energético dos edifícios é apreciada a eficiência energética e ambiental dos sistemas de ventilação.

#### **4.3.2 - Ensaio de pressurização**

Na realização dos ensaios de pressurização foram seguidos os princípios definidos na norma EN 13829, 2000. De forma a assegurar condições de pressão uniforme, na realização dos ensaios de pressurização as portas interiores foram mantidas abertas e todas as aberturas de ventilação foram seladas com fita-cola e plástico. Tendo em conta a dificuldade de medir a velocidade do vento em alguns locais de ensaio, esta grandeza foi substituída pela medição da diferença de pressão entre fachadas da zona a ser ensaiada.

Atendendo aos recursos disponíveis foi efectuada a medição da permeabilidade ao ar da envolvente em seis edifícios:

- i) Edifício 1: um apartamento situado num edifício multifamiliar na zona de Lisboa;
- ii) Edifício 2: um apartamento situado num edifício multifamiliar na zona de Matosinhos;
- iii) Edifício 3: uma moradia unifamiliar situada na zona de Sines;
- iv) Edifício 4: um escritório, situado num edifício de escritórios na zona de Lisboa.
- v) Edifício 5: uma moradia unifamiliar situada na zona de Sines;
- vi) Edifício 6: edifício multifamiliar situado em Gondomar, em que foram ensaiadas as 8 fracções.

Os resultados dos ensaios encontram-se apresentados no anexo D. Seguidamente é efectuada a análise dos resultados obtidos.

#### 4.3.2.1 – Análise global dos resultados dos ensaios de pressurização

No Quadro 4.58 apresenta-se uma síntese dos valores obtidos para a permeabilidade ao ar total de cada um dos espaços ensaiados. O valor de Q50 e ELA4 encontram-se adimensionalizado à unidade de área da envolvente exterior, excluindo pavimentos em contacto com o solo.

Quadro 4.58 - Permeabilidade ao ar de toda a envolvente

Edifício	Designação	FF <sup>1</sup> (m <sup>-1</sup> )	n50 (rph)	Q50 (m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup> )	ELA4 (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
1	Apart. Lisboa	0,34	2,9	8,4	1,75
2	Moradia. Sines	1,02	5,4	5,3	1,10
3	Apart. Matosinhos	0,71	7,2	10,2	2,67
4	Escritório Lisboa	0,17	1,8	10,3	2,16
5	Moradia Sines	1,45	2,4	3,5	0,8
6	RC-esq	0,28	4,2	16,1	0,4
6	RC-dir	0,26	3,7	12,4	0,2
6	1-esq	0,28	4,5	14,2	0,3
6	1-dir	0,26	7,5	19,4	0,4
6	2-esq	0,28	3,5	17,1	0,4
6	2-dir	0,26	5,4	15,7	0,4
6	3-esq	0,69	4,4	11,3	0,3
6	3-dir	0,67	5,6	8,1	0,2

Na Figura 4.124 apresenta-se uma síntese dos valores de n50 de edifícios Portugueses publicados e dos valores agora obtidos (32 resultados no total), registando-se que em apenas um caso n50 é inferior a 2 rph, tendo n50 um valor médio entre 4 e 6.

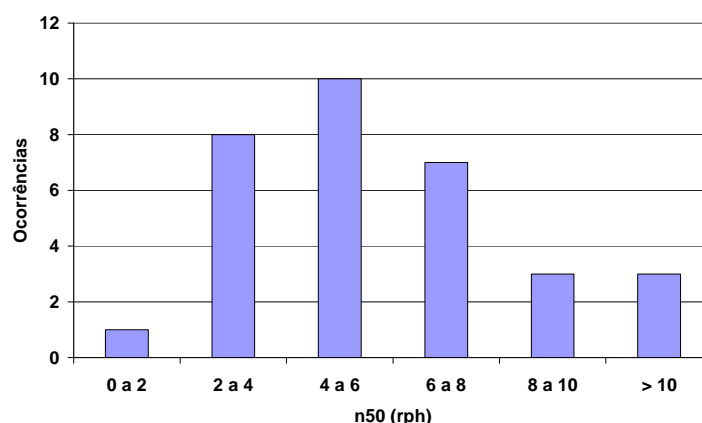


Figura 4.124 - n50 de 32 edifícios portugueses

<sup>1</sup> FF - Factor de Forma

Os edifícios 2 e 3 são aqueles que apresentam a permeabilidade ao ar (n50) mais elevada, estando de acordo com a percepção que se teve, pois eram visíveis frinchas nas caixas de estore e uma abertura para o exterior na cozinha do edifício 3, para passagem da canalização de água.

Dos resultados obtidos apenas um edifício apresenta n50 inferior a 2 rph. Contudo, se for possível vedar adequadamente as caixas de estore (existentes em todos os edifícios ensaiados) é possível obter n50 da ordem de 1,1 a 2, conforme se verificou no ensaio do edifício de Gondomar, enquanto nos edifícios 1, 2 e 3 seria obtido n50 de 2,4, 3,6 e 4,6, respectivamente. Portanto, limitar a permeabilidade ao ar das caixas de estore é importante, mas existem outras frinchas na envolvente com peso igualmente importante.

Os resultados dos edifícios enquadram-se nos valores medidos anteriormente noutros edifícios Portugueses e inferiores ao valor médio então determinado de 5 rph. Os edifícios 1, 2 e 4, apresentam uma baixa permeabilidade ao ar (EN ISO 13790: 2004). Face aos valores de referência em vigor noutros países verifica-se que os edifícios agora ensaiados cumprem de uma forma geral os critérios definidos em função de n50, mas não cumprem os critérios especificados em relação a Q50. Os valores da permeabilidade ao ar enquadram-se nos limites das estimativas baseadas nos métodos da ASHRAE (1997) e AIVC (Orme, 1999), conforme calculado no anexo D. No entanto, esses métodos de cálculo apresentam gamas de variação muito elevadas de  $\pm 80\%$ .

Nos valores de permeabilidade ao ar apresentados não se encontra incluída a permeabilidade ao ar da porta de entrada, pois esta é substituída pela porta ventiladora, encontrando-se, contudo, incluídas as eventuais fugas através das juntas da porta ventiladora.

Na Figura 4.125 encontra-se representado o valor de n50 e Q50/m<sup>2</sup> em função do factor de forma. Dessa figura regista-se que não é possível estabelecer uma correlação entre n50 ou Q50/m<sup>2</sup> e o factor de forma, apesar de à partida se poder supor que quanto maior fosse o FF maior seria a permeabilidade. A ausência de correlação crê-se advir do comportamento substancialmente diferente de componentes como as caixas de estore nos diferentes edifícios. Tendo em conta esta ausência de correlação, neste trabalho adopta-se como parâmetro para a permeabilidade ao ar o valor n50.

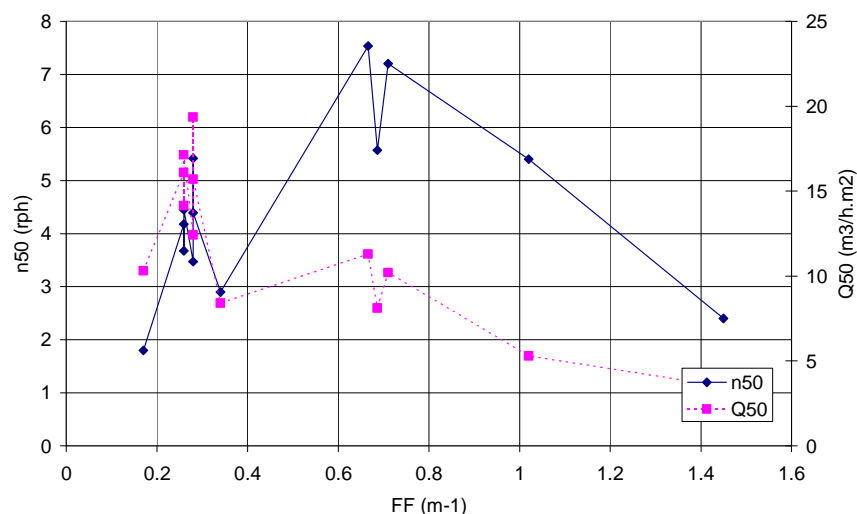


Figura 4.125 - Permeabilidade ao ar em função do factor de forma

#### 4.3.2.2 - Permeabilidade ao ar da caixilharia

Nos edifícios 1, 2, 3 e 6 foi possível determinar a permeabilidade ao ar da caixilharia. No estudo do edifício 2, foi possível verificar uma boa concordância entre o valor da permeabilidade ao ar da janela medida no ensaio de pressurização face ao ensaio efectuado em Laboratório (diferença de 28%, incerteza da curva de permeabilidade ao ar *in situ* de 17%). No edifício 1, a diferença entre a permeabilidade ao ar de todas as janelas face ao valor declarado pelo fabricante é de cerca de 17% para a diferença de pressão de 50 Pa.

Portanto, de uma forma geral verifica-se que a permeabilidade ao ar da caixilharia instalada nos edifícios é semelhante à permeabilidade ao ar da caixilharia medida em Laboratório, desde que sejam cumpridos os requisitos de montagem da mesma, incluindo, vedantes, ferragens, etc.

#### 4.3.2.3 - Permeabilidade ao ar das juntas da caixa de estore

No decurso do estudo dos edifícios 1, 2, 3 e 6 foi possível estimar a permeabilidade ao ar das juntas da caixa de estore. De forma a ser possível uma comparação do desempenho destes elementos, a permeabilidade ao ar foi adimensionalizada à unidade de comprimento da caixa de estore.

Quadro 4.59 - Estimativa da permeabilidade ao ar das caixas de estore

Edifício	Designação	Q (m <sup>3</sup> /h/m de comprimento da caixa de estore)
1	Apart. Lisboa	2,18 ΔP <sup>0,52</sup>
2	Moradia Sines	7,31 ΔP <sup>0,49</sup>
3	Apart. Matosinhos	9,93 ΔP <sup>0,52</sup>
6	3º Esq.	15,4 ΔP <sup>0,59</sup>
6	RC Dir.	2,57 ΔP <sup>0,75</sup>

Destes resultados nota-se que o expoente é próximo de 0,5 indicando que se está no regime de escoamento turbulento e, portanto, a dimensão das fendas é relativamente grande. Nos edifícios 2, 3 e no 3ºEsq o coeficiente C é relativamente superior ao valor do edifício 1 e do RC Dir., o que está de acordo com as maiores folgas visíveis na caixa de estore nestes edifícios face ao edifício 1.

Nestas circunstâncias, a permeabilidade da caixa de estore do edifício 1 é sensivelmente idêntica à permeabilidade ao ar de uma janela da classe 2 com 1 m<sup>2</sup>, sendo superior em cerca de 3 a 4 vezes no caso dos edifícios 2 e 3.

No caso de caixas de estore pré-fabricadas, de acordo com ensaios efectuados num protótipo LNEC, a permeabilidade ao ar pode ser substancialmente inferior aos valores do Quadro 4.59, podendo apresentar uma permeabilidade de cerca de 1/10 da medida no edifício 1, eq. 4.2.

$$Q(\text{m}^3 / \text{h} / \text{m}) = 0,19 \Delta P^{0,70} \quad \text{eq. 4.2}$$

Deste modo, no âmbito do RCCTE 2006, poder-se ia definir que uma caixa de estore não afecta a permeabilidade ar da envolvente quando apresenta uma permeabilidade inferior à indicada pela, eq. 4.2.

#### 4.3.2.4 - Permeabilidade ao ar da envolvente opaca

No decurso do estudo dos edifícios 1, 2 e 3 foi possível obter uma estimativa da permeabilidade ao ar da envolvente opaca, deduzindo a contribuição das janelas e das caixas de estore. No Quadro 4.60 é apresentada uma estimativa da permeabilidade ao ar da zona opaca adimensionalizada em relação à envolvente opaca exterior e em relação à envolvente opaca total do volume interior (deduzida das superfícies em contacto com o solo). Nesses valores encontra-se incluída a zona corrente e as juntas entre paredes e pavimentos.

Quadro 4.60 - Estimativa da permeabilidade ao ar da envolvente opaca ( $\text{m}^3/\text{h}.\text{m}^2$  de área opaca)

Edifício	Designação	Área opaca exterior	Área opaca total (ext+int)
1	Apart. Lisboa	0,346 $\Delta P^{0,765}$	<b>0,076 <math>\Delta P^{0,785}</math></b>
2	Morada. Sines	0,322 $\Delta P^{0,615}$	<b>0,322 <math>\Delta P^{0,615}</math></b>
3	Apart. Matosinhos	0,110 $\Delta P^{0,619}$	<b>0,046 <math>\Delta P^{0,619}</math></b>

Os valores indicados na terceira coluna (área opaca exterior) correspondem de certa forma a uma majoração da permeabilidade ao ar da envolvente opaca exterior, enquanto os valores da quarta coluna corresponderão a uma minoração desse valor. Efectivamente, no primeiro caso toda a permeabilidade ao ar interior se concentra na envolvente exterior, enquanto no segundo caso o valor a permeabilidade ao ar da envolvente é distribuída uniformemente entre paredes exteriores e interiores.

Comparando estes valores com os propostos no método de cálculo da AIVC (Orme, 1999), verifica-se que os valores da terceira coluna são significativamente superiores aos valores propostos pela AIVC, enquanto os valores indicados na quarta coluna se ajustam mais aos valores propostos, corroborando a opinião emitida no parágrafo anterior. Salienta-se que o valor máximo proposto pela AIVC é cerca de 4 vezes superior ao valor médio, o que demonstra a enorme variabilidade de resultados possíveis, não sendo portanto de estranhar as grandes diferenças indicadas no Quadro 4.60.

Com base nos valores estimados para a envolvente opaca deduz-se que à partida não é possível atribuir a variação da permeabilidade ao ar da envolvente opaca à solução construtiva (parede de alvenaria de tijolo simples, parede dupla de alvenaria, ou parede de alvenaria com blocos de betão, caixa de ar e isolante térmico e revestimento interior com gesso cartonado).

#### 4.3.2.5 - Distribuição de frinchas

Dos ensaios dos edifícios 1, 2 e 3 é possível estimar a distribuição da permeabilidade ao ar do edifício pelos principais componentes da envolvente: janelas, caixas de estore e envolvente opaca. A distribuição relativa é apresentada no Quadro 4.61

Quadro 4.61 - Peso relativo da permeabilidade ao ar dos componentes da envolvente

Edifício	Designação	Janelas	Caixa de Estore	Envolvente opaca
1	Apart. Lisboa	11%	15%	74%
2	Morada. Sines	7%	29%	64%
3	Apart. Matosinhos	5%	49%	46%
6	Apartamento	16%	57%	27%
6	Apartamento	6%	84%	10%

Apesar das janelas pertencerem à classe 2 de permeabilidade ao ar, estas correspondem apenas a cerca de 5 a 16 % da permeabilidade total da envolvente do edifício. Este é um valor surpreendente, pois usualmente considera-se que as janelas e as suas juntas móveis são o principal elemento de infiltração do ar.

Destes resultados verifica-se que a permeabilidade ao ar não atribuída às janelas é relativamente elevada 40% a 90%, existindo uma parcela importante associada às caixas de estore.

Portanto, para assegurar uma baixa permeabilidade ao ar da envolvente do edifício, além da especificação da permeabilidade ao ar da caixilharia, será necessário comprovar a baixa permeabilidade da envolvente opaca e de eventuais caixas de estore. Na Figura 4.126 apresentam-se os resultados do estudo mas detalhado do apartamento mais permeável ( $n_{50}=7,2$ ) e do apartamento menos permeável ( $n_{50}=3,1$ ), do edifício multifamiliar de Gondomar. Como se pode constatar, se forem seladas as juntas da caixa de estore, a permeabilidade da envolvente em ambos os casos ficaria próxima de  $n_{50}=1,4$ , o que já é um valor relativamente baixo e que pode ser obtido sem aumentar a complexidade da construção.

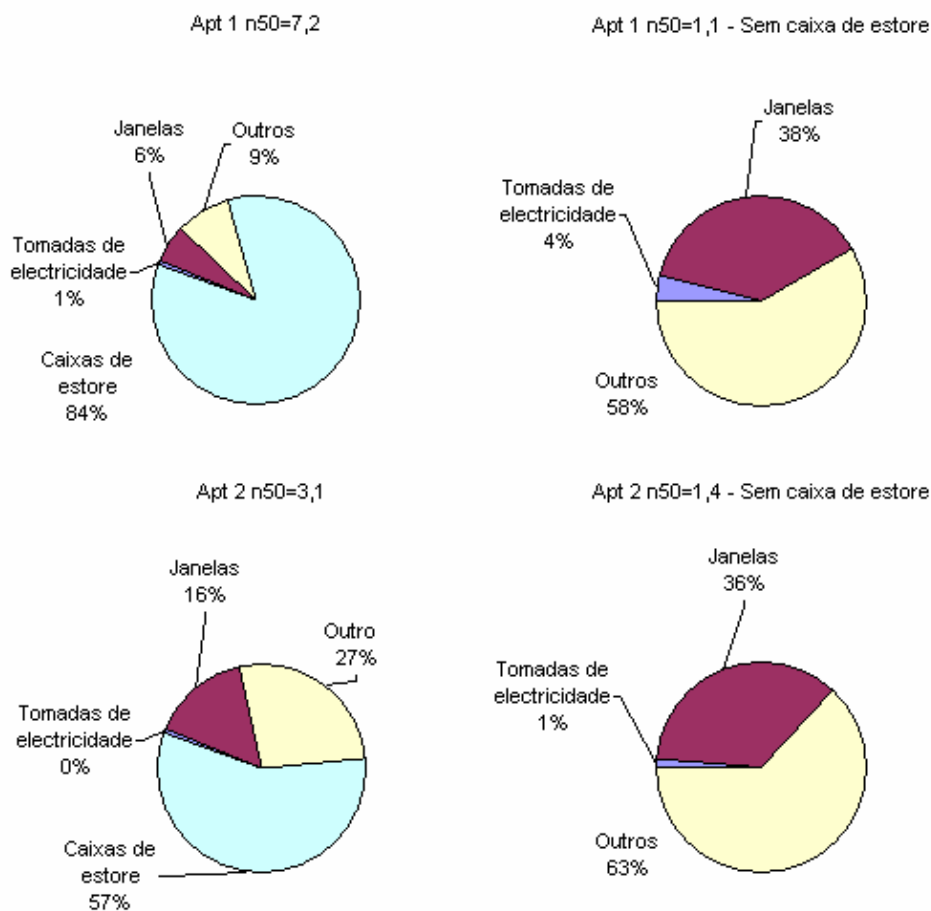


Figura 4.126 - Resultados do ensaio de pressurização em Gondomar

### 4.3.3- Estudo de limites para a permeabilidade ao ar da envolvente

A permeabilidade ao ar da envolvente deve ser limitada de forma a minimizar infiltrações de ar excessivas, minimizar as perdas caloríficas excessivas e a não afectar o bom funcionamento dos sistemas de ventilação.

A admissão de ar novo da ventilação em habitações e de pequenos edifícios é usualmente realizada directamente através de aberturas situadas nas fachadas do edifício. Para definir limites para a permeabilidade ao ar da envolvente um primeiro critério pode ser limitar a permeabilidade ao ar para satisfazer as condições de dimensionamento das aberturas de ventilação dos edifícios, secção 4.3.3.1. Um segundo critério pode se baseado em limitar o caudal de infiltrações para vento intenso, secção 4.3.3.2, tendo neste caso em conta as condições de exposição ao vento do edifício.

#### 4.3.3.1- Critério I: condição de dimensionamento das aberturas de admissão de ar

Nos edifícios com ventilação natural ou híbrida as aberturas de admissão de ar são dimensionada para permitir admitir o caudal de base para uma diferença de pressão de 10 Pa eq. 4.3 (NP 1037-1, 2002), enquanto para edifícios com ventilação mecânica é adoptada uma diferença de pressão de 20 Pa, eq. 4.4 (Pinto, 2006). Este critério quando aplicado a edifícios conduz a limites relativamente baixos para a permeabilidade ao ar da envolvente, Quadro 4.62. Os caudais de ventilação de base  $Q_b$  foram determinados de acordo com o método apresentado no capítulo 3.

$$n50 \leq Q_b/Vol \times (50/20)^{0.67} \quad \text{edifícios com ventilação mecânica} \quad \text{eq. 4.3}$$

$$n50 \leq Q_b/Vol \times (50/10)^{0.67} \quad \text{edifícios com ventilação natural ou híbrida} \quad \text{eq. 4.4}$$

Quadro 4.62 - Aplicação do critério I a alguns edifícios

Tipologia	Apart T1	Apart T2	Apart T3	Apart T4	Moradia
Área pavimento (m <sup>2</sup> )	53	65	82	105	135
$Q_b$ (m <sup>3</sup> /h)	90	130	180	235	285
n50 Ventilação natural	1,9	2,3	2,6	2,6	2,5
n50 Ventilação mecânica	1,2	1,5	1,6	1,7	1,6

Admitiu-se pé-direito de 2,5 m

Tendo em conta os valores limite do Quadro 4.62 e os valores de n50 típicos (Figura 4.124), verifica-se que este critério é muito restritivo e que a generalidade dos edifícios portugueses não o satisfaz.

#### 4.3.3.2- Critério II: Limitar as infiltrações de ar a $Q_b$ em pelo menos 95% do tempo

No critério I não é tido em conta o efeito da acção do vento, pelo que foi efectuado um estudo que atendesse as acções que promovem as infiltrações de ar. Para esse efeito foi definido o Critério II que consiste em limitar as infiltrações de ar ao caudal de ventilação de base sob condições de vento forte, por exemplo, para a velocidade do vento com uma probabilidade de ser excedida em 5% do tempo durante um ano. Este segundo critério tem em conta a exposição do edifício ao vento, o sistema de ventilação adoptado. A condição de 5% advém das regras de dimensionamento para conforto.

#### 4.3.3.2.1- Acção do vento

Para estimar a acção do vento devem ser adoptados os dados meteorológicas existentes para o local em estudo, podendo em alternativa ser adoptados modelos numérico. Tendo em conta a existência no RCCTE (2006) de uma classificação da exposição ao vento dos edifícios, que se encontra baseada no trabalho de Viegas (1995) e no RSA (1983), na classificação da acção do vento adopta-se essa estrutura de classificação dos locais, Quadro 4.63.

Quadro 4.63 - Classificação da exposição ao vento dos locais

	Região A			Região B		
	Rug I Cidade	Rug II Urbano	Rug III Plano	Rug I Cidade	Rug II Urbano	Rug III Plano
H ≤ 10 m	1	2	3	1	2	3
10 < H ≤ 18 m	1	2	3	2	3	4
18 < H ≤ 28 m	2	3	4	2	3	4
< 28H ≤ 60 m	3	4	4	3	4	4

$$U_{\text{edifício}} = FC \times U_{\text{est. meteorológica}} \quad \text{eq. 4.5}$$

Para essas classes de exposição ao vento, no Quadro 4.64 encontram-se as velocidades médias do vento propostas por Viegas (1995), sendo possível desta forma calcular os factores de correcção. Para obter a velocidade média que é excedida em 5% do tempo é considerado o ano climático de referência de Lisboa (pertence à classe 1 e tem uma velocidade média de 3,6 m/s), para o qual é estimada a velocidade de 8,9 m/s que não é excedida em 5% do tempo durante um ano. No Quadro 4.64 apresenta-se a velocidade do vento e a pressão dinâmica do vento aplicável às restantes classes de exposição.

Tendo em conta o efeito de protecção criado por edifícios próximos, nos documentos aplicáveis ao estudo da ventilação natural são apresentados valores médios de Cp, tendo em conta se o edifício se encontra protegido (Orme, 1999). Neste trabalho para os edifícios protegidos considera-se o efeito de protecção incorporado na velocidade do vento, sendo considerado um FC de 0,8. O factor FC de 0,8 é um factor conservativo, pois em, alguns casos chegam a ser de 0,5. O nível de protecção criado pelas obstruções pode ser determinado com base na altura da obstrução (Hobs), da largura da obstrução (Wobs) e na distância desta ao edifício (Dobs), Quadro 4.65, EN 15242, 2007. As classes de exposição ao vento podem ser obtidas no Quadro 4.66.

Quadro 4.64 - Acção do vento para o estudo da permeabilidade ao ar

Classe de exposição	FC	Velocidade média 50% (m/s)	Velocidade 5% (m/s)	Pdin 5% (Pa)
Abrigada	0,80	2,9	7,1	30
1	1,00	3,6	8,9	50
2	1,11	4,0	9,9	60
3	1,56	5,6	13,8	115
4	1,92	6,9	17,1	175



Quadro 4.65 - Tipo de protecção ao vento função da obstrução

Tipo de protecção	
Sem protecção	Dobs/Hobs > 4
Normal	1.5 < Dobs/Hobs < 4
Protegido	Dobs/Hobs < 1.5

Considera-se obstrução se: Wobs/Wedificio > 0,5

Quadro 4.66 - Correção da classe de exposição ao vento função do tipo de protecção criada por obstruções próximas

Protecção	Região A									Região B								
	Rug I			Rug II			Rug III			Rug I			Rug II			Rug III		
	Cidade			Urbano			Plano			Cidade			Urbano			Plano		
	Não	Nor	Prot.	Não	Nor	Prot.	Não	Nor	Prot.	Não	Nor	Prot.	Não	Nor	Prot.	Não	Nor	Prot.
H ≤ 10 m	1	A	A	2	1	A	3	3	A	2	1	A	2	1	A	3	3	A
10 < H ≤ 18 m	1	A	A	2	1	A	3	3	A	2	1	A	3	3	A	4	3	1
18 < H ≤ 28 m	2	1	A	3	3	A	4	3	1	2	1	A	3	3	A	4	3	1
< 28H ≤ 60 m	3	3	A	4	3	1	4	3	1	3	3	A	4	3	1	4	3	1

As classes de protecção são definidas no Quadro 4.65.

#### 4.3.3.2.2 - Geometrias estudadas

Para apreciar o impacto da permeabilidade ao ar da envolvente e definir limites foram considerados apartamentos com duas fachadas opostas expostas ao vento e uma moradia unifamiliar com 2 e 4 fachadas expostas ao vento, Quadro 4.67.

Quadro 4.67 - Informação dos casos de estudo detalhados

	Pavimento (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Q <sub>b</sub> (m <sup>3</sup> /h)	U <sub>paredes</sub> (W/m <sup>2</sup> /K)	U <sub>w</sub> (W/m <sup>2</sup> /K)	U <sub>cob</sub> (W/m <sup>2</sup> /K)	A <sub>win</sub> /A <sub>floor</sub>
Apartamento T1	53	135	86	0,78	3,5	-	20%
Apartamento T4	105	260	235	0,78	3,5	-	20%
Moradia 2 fach.	135	340	285	0,78	3,5	0,50	20%
Moradia 4 fach.	135	340	285	0,78	3,5	0,50	20%

Para estudar os limites da permeabilidade ao ar da envolvente foi implementado um modelo nodal em Excel, com um nó interior e um nó em cada uma das fachadas expostas ao vento. A permeabilidade ao ar foi considerada uniformemente distribuída pelas fachadas exteriores. Foram efectuadas simulações com as fachadas exteriores segmentadas em quatro faixas horizontais, para tentar avaliar o efeito de chaminé no interior do edifício, mas não foram registadas diferenças significativas face ao modelo indicado na Figura 4.127.

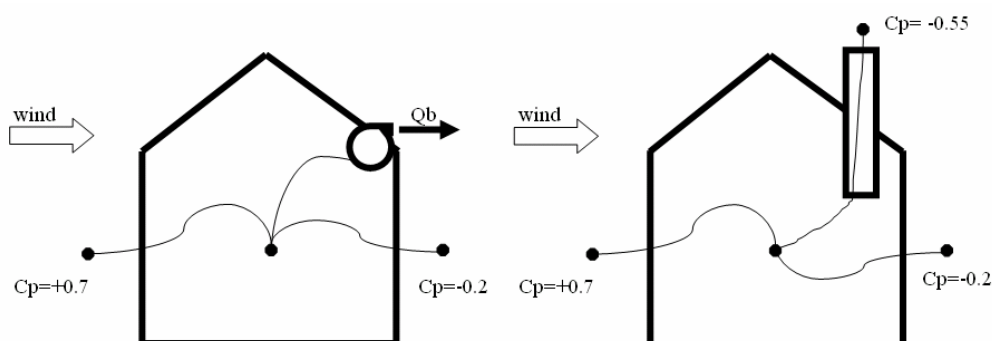


Figura 4.127 - Exemplo do modelo nodal considerado

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos da aplicação deste método a edifícios com ventilação mecânica e natural.

#### 4.3.3.2.3- Permeabilidade ao ar em edifícios com ventilação mecânica

Na simulação do sistema de ventilação mecânica foi considerada a extracção contínua do caudal de ventilação de base ( $Q_b$ ), a admissão de ar através de aberturas de ventilação auto-reguláveis a partir de 20 Pa (Figura 4.128) e a infiltração de ar por cada uma das fachadas de acordo com a lei de potência, eq. 4.6. Na eq. 4.6,  $n_{fac}$ , é o número de fachadas expostas ao vento.

$$Q = n50 \times Vol / n_{fac} / 50^{0.67} \times \Delta P^{0.67} \quad \text{eq. 4.6}$$

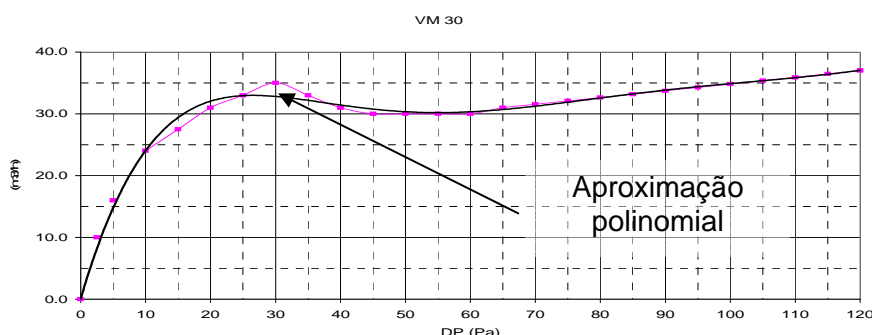


Figura 4.128 - Curva da grelha auto-regulável de 30 m<sup>3</sup>/h a 20 Pa

Neste estudo foram consideradas as 5 classes de exposição ao vento indicadas no Quadro 4.64 e para os coeficientes de pressão foram adoptados os valores correspondentes aos edifícios baixos (quadro F1, Orme, 1999) para um ângulo de 0°<sup>(1)</sup>.

No Quadro 4.68 apresenta-se o valor de  $n50$  determinado de forma a limitar a infiltração excessiva de ar de acordo com o critério II.

Quadro 4.68 - Limites para a permeabilidade ao ar da envolvente ( $n50$ ) para os dois casos de estudo em função da classe de exposição ao vento

Tipologia	V (m <sup>3</sup> )	Q <sub>b</sub> (m <sup>3</sup> /h)	Grelhas	n <sub>fach</sub>	n50				
					Classe de exposição ao vento (Quadro 4.63 e Quadro 4.66)				
					Abrigo	1	2	3	4
Apart T1	135	86	3	2	3,4	2,4	2,1	1,3	0,9
Apart T4	260	235	8	2	4,8	3,5	3,0	1,8	1,3
Moradia	340	285	10	2	4,5	3,3	2,8	1,7	1,2
Moradia	340	285	10	4	6,0	4,3	3,6	2,0	1,5

Dos resultados do Quadro 4.68 regista-se uma redução de  $n50$  admissível função da exposição ao vento e com o número de fachadas expostas ao vento. Tendo em conta que a acção predominante para as infiltrações de ar é o vento, após o tratamento dos resultados do Quadro 4.68, é possível exprimir de forma aproximada o limite recomendável para a permeabilidade ao ar da envolvente pela eq. 4.7. Os limites determinados pela eq. 4.7, são

<sup>1</sup> C<sub>p</sub>N=+0,7, C<sub>p</sub>S= -0,2, C<sub>p</sub>E=C<sub>p</sub>W= -0,5

10% inferiores aos que se obtêm com o modelo nodal para a classe 1 e cerca de 10% superiores no caso da classe 4. As constantes 47 e 63 da eq. 4.7 derivam de:

$$47 = 50^{0,67} \times 2 / [(C_{p0} - C_{p180})/2]^{0,67}$$

$$63 = 50^{0,67} \times 4 / [C_{p0} - (C_{p0} + C_{p90} + C_{p180} + C_{p270})/4]^{0,67}$$

$$\begin{aligned} n50 &\leq 47 \times Q_b / \text{Vol} / (P_{\text{dyn}})^{0,67} && \text{edifícios com 2 fachadas expostas} \\ n50 &\leq 63 \times Q_b / \text{Vol} / (P_{\text{dyn}})^{0,67} && \text{edifícios com 4 fachadas expostas} \end{aligned} \quad \text{eq. 4.7}$$

Os limites do critério II permitem uma permeabilidade a ar superior à do critério I (Quadro 4.62), sendo os resultados dos dois critérios próximos apenas para a classe 4 de exposição ao vento.

Se em vez de se admitir um caudal de infiltração igual ao caudal de base, se impusesse a ausência de infiltrações para velocidades do vento que não são excedidas em mais de 5% do tempo, obtinham-se limites n50 de 0,2 h<sup>-1</sup>, o que é um valor extremamente baixo, tendo em conta os valores n50 típicos existentes nos edifícios portugueses.

#### 4.3.3.2.4 - Apreciação dos critérios estabelecidos para a ventilação mecânica

Para avaliar o impacto dos limites de permeabilidade ao ar no desempenho térmico dos edifícios com ventilação mecânica, o apartamento T1 e a moradia com duas e quatro fachadas expostas ao vento foram apreciados recorrendo ao programa de simulação térmica em regime dinâmico ESP-r, para as cinco classes de exposição ao vento (Quadro 4.64). Para a classe de exposição ao vento 1, foram apreciados quatro cenários:

- Cenário 1, edifício ideal sem infiltração de ar (n50=0) apenas a existência de grelhas;
- Cenário 2, grelhas de admissão e n50 de acordo com o critério I;
- Cenário 3, grelhas de admissão de ar e n50 de acordo com o critério II;
- Cenário 4, grelhas de admissão de ar e n50 que limite a renovação de ar a 4 vezes o caudal de base em não mais de 5% do tempo.

Os resultados obtidos no decurso do estudo são apresentados no Quadro 4.69, na Figura 4.129 e na Figura 4.131. Nas figuras apresenta-se o acréscimo das necessidades de aquecimento determinadas para um temperatura interior de 20°C, face ao caso ideal sem infiltrações de ar (Quadro 4.69) expresso em kWh/m<sup>2</sup> e em percentagem face ao valor das necessidades nominais de aquecimento do caso ideal.

Quadro 4.69 - Necessidades nominais de aquecimento dos dois edifícios estudados assumindo ausência de infiltrações - caso ideal

kWh/m <sup>2</sup>	Bragança	Lisboa	Paris
Apartamento T1	16,8	1,9	37,0
Moradia	67,0	27,1	100,1

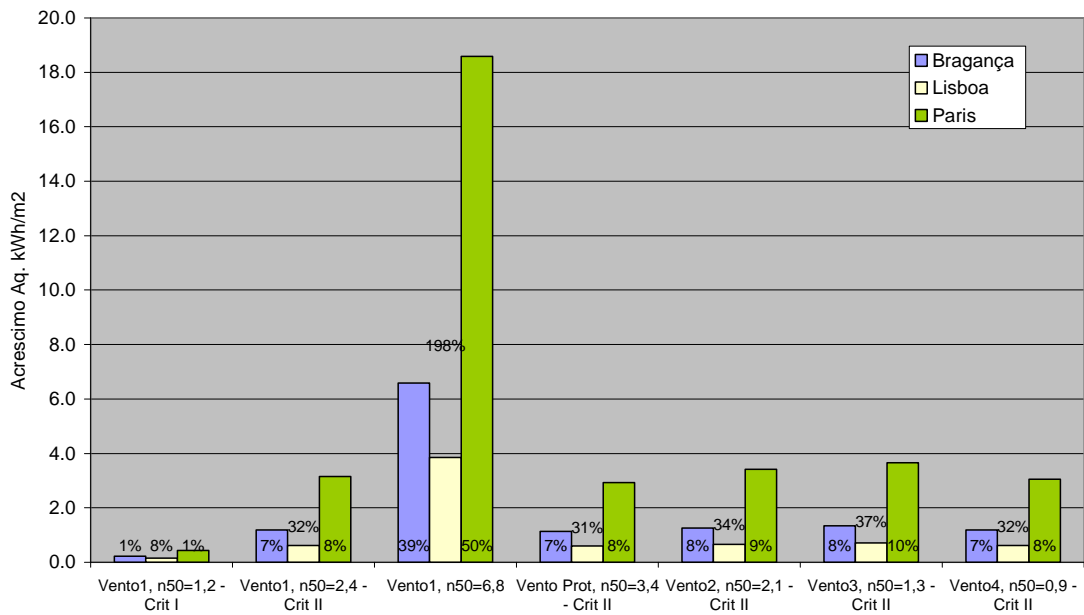


Figura 4.129 - Acréscimo das necessidades de aquecimento - Apartamento com 3 grelhas de admissão de ar VM30 - Ventilação mecânica

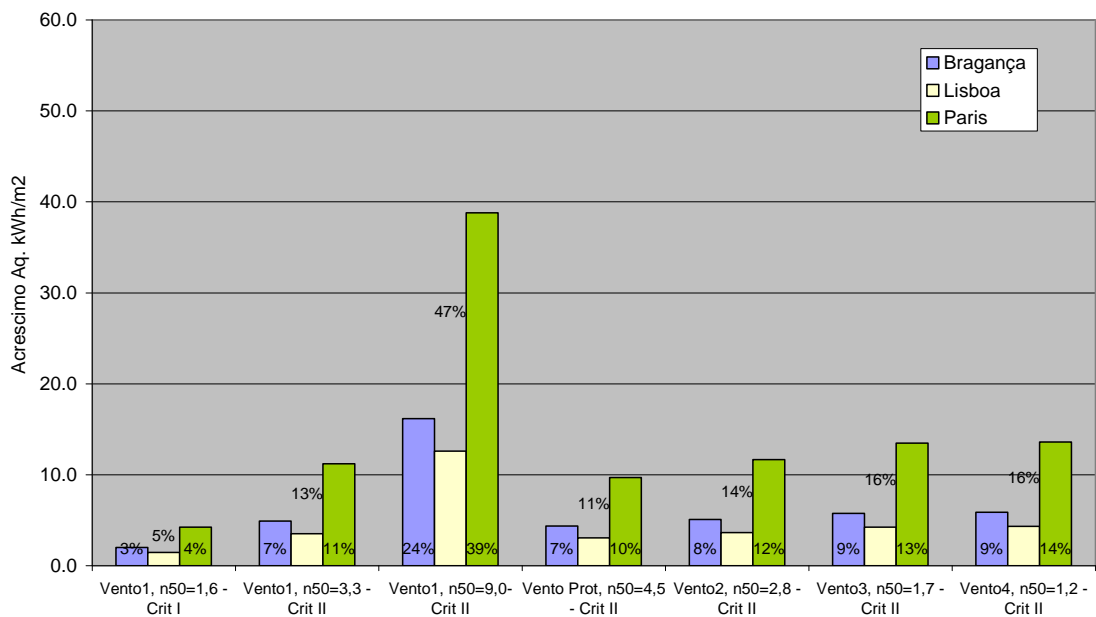


Figura 4.130 - Acréscimo das necessidades de aquecimento - Moradia (nfac=2) com 10 grelhas de admissão de ar VM30 - Ventilação mecânica

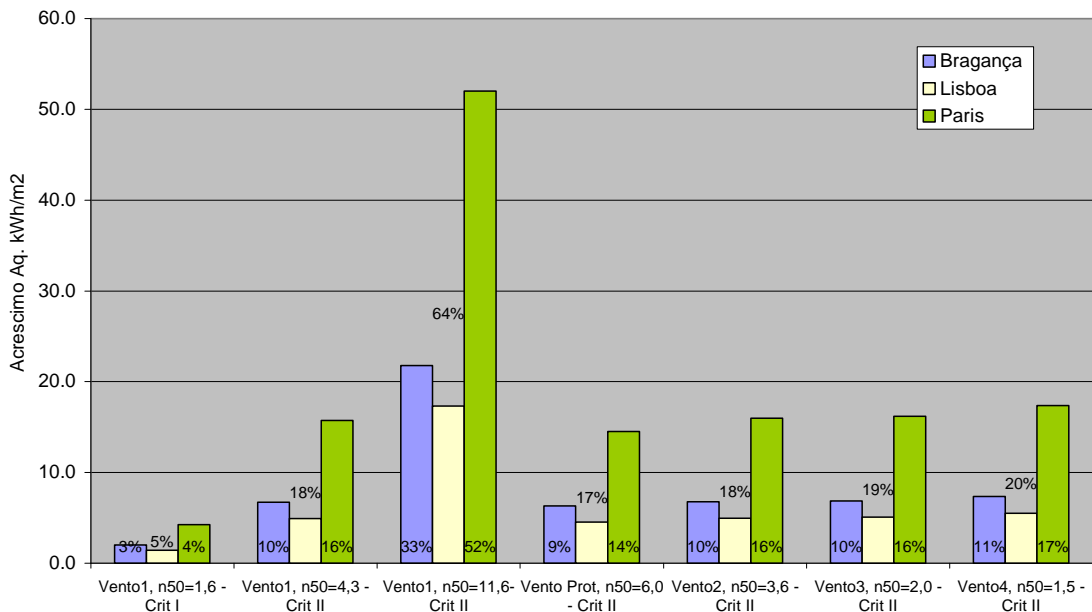


Figura 4.131 - Acréscimo das necessidades de aquecimento - Moradia (nfac=4) com 10 grelhas de admissão de ar VM30 - Ventilação mecânica

Dos resultados obtidos com o modelo de simulação térmica pode concluir-se:

- A existência de uma envolvente permeável ao ar corresponde sempre a um acréscimo das necessidades de aquecimento, que será tanto maior quanto maior a permeabilidade ao ar da envolvente. Na ausência de requisitos mínimos de permeabilidade ao ar esta pode corresponder a um acréscimo importante das necessidades de aquecimento (50% no cenário 4 - terceiro conjunto de barras nos gráficos, face aos cenários 2 e 3).
- Considera-se que é aceitável os limites da permeabilidade dependerem da classe de exposição ao vento conforme se conclui dos diversos resultados obtidos para as condições que satisfazem o critério II, nas quais o acréscimo das necessidades de aquecimento é praticamente constante (2º, 4º, 5º, 6º e 7º conjunto de barras dos gráficos).
- o critério de limitar as infiltrações ao caudal de base em 95% do tempo como primeira aproximação parece razoável, pois se for admitido que o caudal de infiltração pode ser de  $3 \times Q_b$  em mais de 5% do tempo (cenário 4 face ao cenário 3) regista-se um grande incremento nas necessidades térmicas. Contudo, se for comparado o critério II com o critério I, regista-se que o critério II conduz a um maior acréscimo das necessidades de aquecimento do que o critério I, todavia, este acréscimo nas necessidades de aquecimento do critério II face ao critério I é de sensivelmente 10% em Bragança e de 18% em Lisboa, pelo que se considera que o critério II constituindo uma primeira forma de limitar uma parcela importante do balanço térmico dos edifícios, possibilitando limites exequíveis n50 de 6,0 nas zonas protegidas a 0,9 para os locais mais expostos. Para edifícios de maior eficiência energética preconiza-se que o caudal de infiltrações seja limitado a 20% do caudal de base em não mais de 5% do tempo, o que conduz a valores próximos de 40% dos valores do critério II:

Classe exposição	Critério II				Critério II adaptado (40% Critério II)			
	Apart. T1	Apart. T4	Moradia 2 fach	Moradia 4 fach	Apart. T1	Apart. T4	Moradia 2 fach	Moradia 4 fach
Prot	3,4	4,8	4,5	6,0	1,4	1,9	1,8	2,4
1	2,4	3,5	3,3	4,3	1,0	1,4	1,3	1,7
2	2,1	3,0	2,8	3,6	0,8	1,2	1,1	1,4
3	1,3	1,8	1,7	2,0	0,5	0,7	0,7	0,8
4	0,9	1,3	1,2	1,5	0,4	0,5	0,5	0,6

No critério II, para o mesmo edifício e a mesma classe de exposição ao vento a permeabilidade ao ar permitida é tanto maior quanto maior for o caudal base, o que possibilita também um maior acréscimo das perdas térmicas para maiores caudais de ventilação. Este aspecto é perceptível da comparação da Figura 4.129 (apartamento 0,64 rph e  $n50=2,4$ ) e Figura 4.130 (moradia 0,84 rph e  $n50=3,3$ ). Para evitar esta limitação uma das formas pode ser estabelecer um valor fixo para a relação  $Q_b/Vol$  da eq. 4.7, deixando a permeabilidade de depender do caudal de ventilação. Por exemplo, adoptando o caudal mínimo de ventilação permitido no RCCTE (2006),  $Q_b/Vol$  toma o valor 0,6.

Dos resultados do modelo nodal verificou-se ser adequado variar o limite da permeabilidade ao ar com o número de fachadas expostas ao vento (Quadro 4.68), sendo os limites  $n50$  mais restritivos para edifícios com duas fachadas expostas ao vento do que com quatro fachadas expostas ao vento. Contudo, do estudo do desempenho térmico do edifício regista-se que as infiltrações de ar e o consequente acréscimo das perdas térmicas são superiores no edifício com as 4 fachadas expostas ao vento. Esta diferença é causada por se estar a adoptar a velocidade e o rumo do vento variável no estudo do desempenho térmico, ao contrário do que sucedeu no modelo nodal em que se considerava o vento a incidir na perpendicular a uma das fachadas principais, pelo que, na simulação anual os edifícios com 2 fachadas expostas estes são “beneficiados” com a variação do rumo do vento, pois em vários momentos o vento terá um menor ângulo de incidência, que conduz a menores valores de  $C_p$  e consequentemente a menores infiltrações de ar. Este aspecto não invalida o resultado correspondente à situação mais restritiva de vento a incidir na perpendicular às fachadas, pelo que se considera adequado distinguir as situações com duas e quatro fachadas expostas ao vento.

Para estes casos de estudo (sistemas de ventilação mecânico apenas com exaustão) na metodologia do RCCTE (2006) era prevista uma taxa de infiltrações de zero, pois o desequilíbrio entre o caudal extraído por meios mecânicos é superior a 0,6 rph. Deste modo, este estudo evidencia que especificar limites para a permeabilidade ao ar da envolvente dos edifícios constitui uma oportunidade de melhoria para assegurar a eficiência energética nos edifícios.

Com base nos valores  $n50$  medidos, estabelecer limites da ordem de 1,5 requer um maior cuidado em alguns elementos da construção mas não requer grandes alterações na construção nem a utilização de novos materiais, ao contrário do que sucede quando são impostos  $n50$  inferiores a 1, situação para a qual em princípio será necessário ter cuidados especiais na obturação dos tubos das instalação eléctrica, juntas das canalizações, remates das paredes às lajes, etc. pelo que a adopção do critério II é uma solução de compromisso que se considera aceitável.

Do estudo realizado também se registou que o impacte da permeabilidade a ar da envolvente nas necessidades de arrefecimento é negligenciável, não sendo por isso apresentado.

#### 4.3.3.2.5- Permeabilidade ao ar em edifícios com ventilação natural - grelhas de admissão auto-reguláveis a partir de 20 Pa

Os limites para a permeabilidade ao ar da envolvente de edifícios com ventilação natural é relativamente mais complexa de determinar do que no caso dos edifícios com ventilação mecânica, pois numa primeira fase tem de ser assegurado o caudal de ventilação de base  $Q_b$  em mais de 50% do tempo entre Outubro e Abril (período da estação de aquecimento em que as janelas têm tendência a permanecer fechadas) e depois deve ser limitada a infiltração excessiva de ar de forma a minimizar as perdas térmicas e os eventuais problemas de conforto.

Neste estudo foi considerada a aplicação de aberturas auto-reguláveis a partir de 20 Pa indicadas na Figura 4.128, conforme se encontra previsto na norma NP 1037-1, 2002 e no RCCTE (2006). Para calcular o número de grelhas destinado a promover o caudal de ventilação de base foi utilizado o modelo de simulação detalhado e o modelo nodal indicado na Figura 4.127. O escoamento do ar através das chaminés (da cozinha e das instalações sanitárias) foi analisado utilizando o modelo ( $m=p.C.\Delta P^{0.5}$ ) e foi considerada uma altura de chaminé de 5 m. Admitindo que as chaminés estão de acordo com a NP 1037-1, são adoptados os valores de C a seguir indicados e obtidos no decurso de ensaios de pressurização:

- Apartamento:            Ccoz= 50,        Cis= 20
- Moradia:                Ccoz=100,      Cis=3×20

No apartamento foi considerada a existência de uma instalação sanitária enquanto na moradia foi considerada a existência de três instalações sanitárias.

No topo das chaminés foi considerada a aplicação de um ventilador estático que foi simulado utilizando o modelo de Gonzales (1984), ( $\varnothing 300\text{mm}$ ,  $C_p=-0,55$ ,  $\zeta=1,22$ ,  $B=0,8$ ,  $n=0,18$ ). Para esse efeito foi desenvolvido código pelo autor para permitir a simulação deste componente e que se encontra disponível na versão 11.3 do ESP-r.

Com base nestas premissas foram analisados quatro cenários com o modelo de simulação:

- Caso 1: determinação do número de aberturas necessárias para assegurar o caudal  $Q_b$  em 50% do tempo entre Outubro e Abril, com  $n_{50}=0$ ;
- Caso 2: determinar o valor de  $n_{50}$  necessário para assegurar o caudal de base  $Q_b$  em 50% do tempo entre Outubro e Abril na ausência de aberturas de ventilação
- Caso 3: simulação com 75% das grelhas de admissão de ar do caso 1 e 25% do valor de  $n_{50}$  determinado no caso 2;
- Caso 4: simulação com 25% das grelhas de admissão de ar do caso 1 e 75% o valor de  $n_{50}$  determinado no caso 2.

Os resultados obtidos encontram-se indicados no Quadro 4.70, no Quadro 4.71, na Figura 4.132 e na Figura 4.133.

Quadro 4.70 - Necessidades de aquecimento no apartamento com duas fachadas expostas - ventilação natural grelhas auto-reguláveis a 20 Pa

Classe vento	Bragança			Lisboa			Paris		
	Nº Grelhas	n50	Aq (kWh/m <sup>2</sup> /a)	Nº Grelhas	n50	Aq (kWh/m <sup>2</sup> /a)	Nº Grelhas	n50	Aq (kWh/m <sup>2</sup> /a)
	Ideal	0	10,4	Ideal	0	1,2	Ideal	0	22,9
1	56	0	32,3	18	0	2,8	17	0	32,5
1	42	4,8	30,3	13	2,1	2,9	13	2,0	32,6
1	14	14	27,3	4,5	6,2	3,2	4,4	6,0	33,1
1	0	19	25,5	0	8,2	3,3	0	8,0	32,9
4	21	0	22,1	6,8	0	1,2	6,8	0	22,9
4	16	2,2	24,1	5,1	0,8	1,3	5,1	0,9	24,7
4	5,3	6,7	27,3	1,7	2,5	2,5	1,7	2,6	30,7
4	0	9,0	28,5	0	3,3	3,2	0	3,4	33,1

Quadro 4.71 - Necessidades de aquecimento na moradia quatro fachadas expostas - ventilação natural grelhas auto-reguláveis a 20 Pa

Classe vento	Bragança			Lisboa			Paris		
	Nº Grelhas	n50	Aq (kWh/m <sup>2</sup> /a)	Nº Grelhas	n50	Aq (kWh/m <sup>2</sup> /a)	Nº Grelhas	n50	Aq (kWh/m <sup>2</sup> /a)
	Ideal	0	31,7	Ideal	0	12,8	Ideal	0	47,4
1	164	0,0	50,9	67	0,0	15,1	53	0,0	53,8
1	123	7,6	49,8	50	3,9	15,3	40	3,2	54,2
1	41	22,9	47,5	17	11,8	15,5	13	9,6	54,9
1	0	30,5	46,3	0	15,8	15,6	0	12,8	55,2
4	53	0,0	37,8	28	0,0	12,8	25	0,0	48,4
4	40	3,2	40,2	21	1,6	13,3	19	1,3	50,5
4	13	9,6	44,4	7	4,8	14,7	6	4,0	54,0
4	0	12,8	46,4	0	6,3	15,3	0	5,3	55,3

VN apartamento

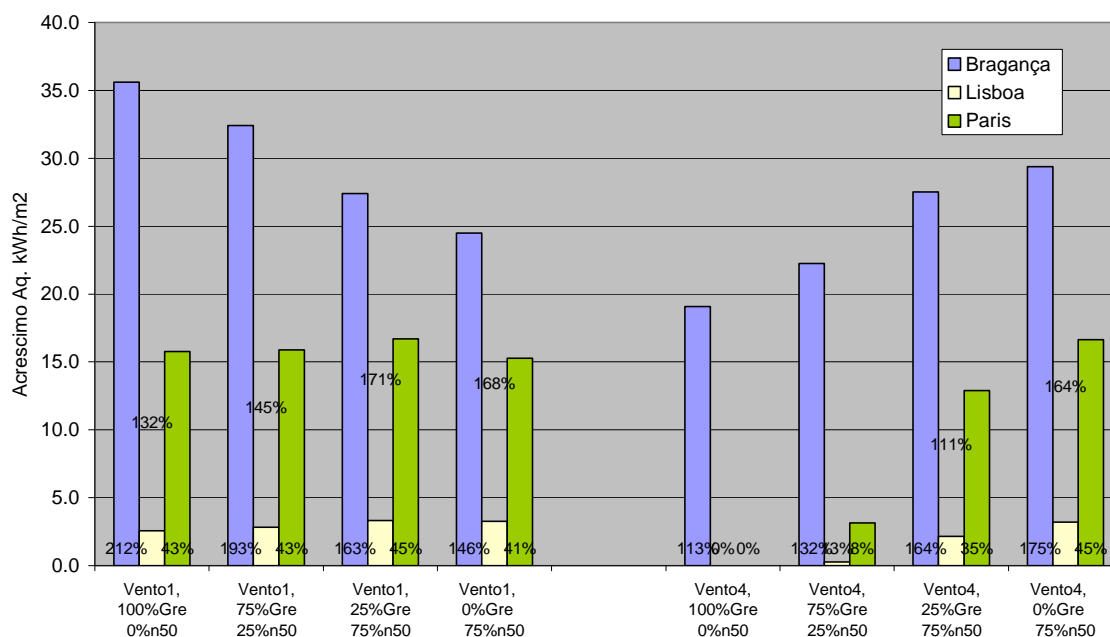


Figura 4.132 - Acrescimo das necessidades de aquecimento - Apartamento com grelhas de admissão de ar VM30 - Ventilação natural



#### VN Moradia

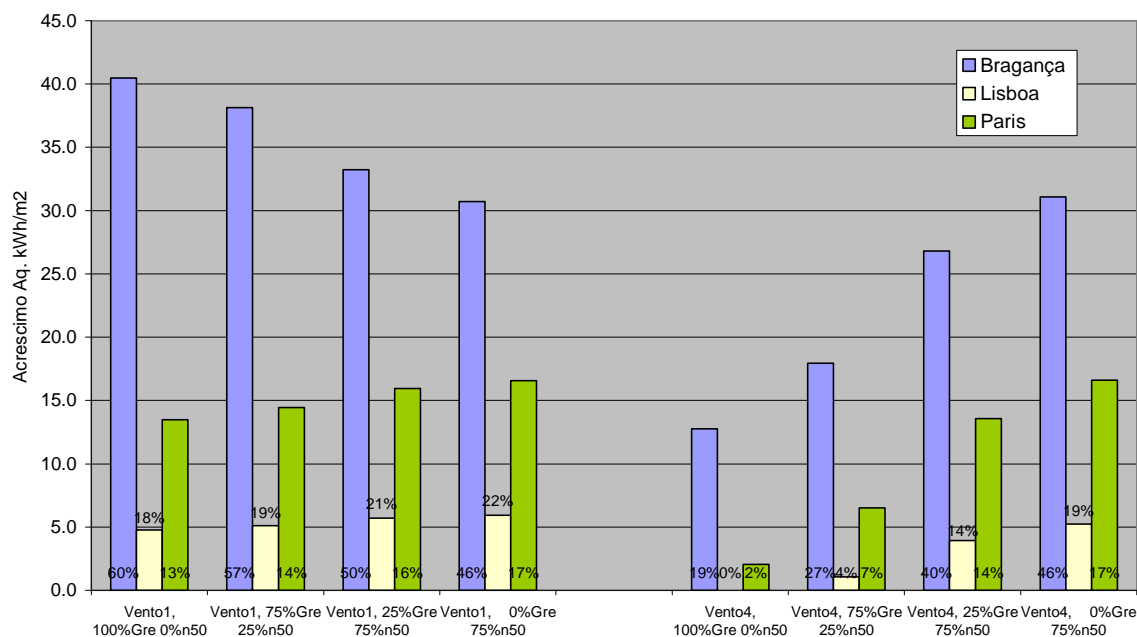


Figura 4.133 - Acréscimo das necessidades de aquecimento - Moradia com grelhas de admissão de ar VM30 - Ventilação natural

Refere-se que de acordo com os critérios de dimensionamento de grelhas auto-reguláveis a 20 Pa (NP 1037-1, 2002), seriam necessárias 7 grelhas de 30 m<sup>3</sup>/h para o apartamento e 14 grelhas para a moradia.

Dos resultados apresentados é possível concluir:

- Para assegurar o caudal de ventilação de base num período de tempo razoável (50% do tempo entre Outubro e Abril) em edifícios com ventilação natural é necessário um maior número de grelhas do que o previsto para os edifícios com ventilação mecânica. Este número de grelhas é superior ao que se obtém com o critério de dimensionamento de 10 Pa. Apenas na condição de se considerar 25% de grelhas e 75% de n50 é obtido um número aceitável de grelhas de ventilação.
- Este maior número de grelhas deve-se à menor acção do vento em Bragança face a Lisboa, bem como a uma maior temperatura exterior em Lisboa (11°C) que minimiza o efeito de chaminé previsto para Paris (6°C).
- Os resultados de Bragança apresentam um número excessivo de grelhas e n50, devido à menor velocidade média do vento, bem como nos dados do ano climático de referência em cerca de 30% do tempo existe vento com rumo de W ou de E, portanto perpendicular às fachadas com as grelhas no apartamento com duas fachadas expostas ao vento. A baixa acção do vento (classe 1) conduz a diferenças de pressão inferiores a 20 Pa (mesmo para vento intenso) não entrando em funcionamento a auto-regulação do caudal nas grelhas e portanto, nesse caso, não existe vantagem das grelhas face às frinchas!
- Este requisito de maior número de grelhas para assegurar o caudal de base está de acordo com os resultados obtidos no modelo simplificado de Fracastoro (2001 e 2002), pois no clima de Lisboa em média existe uma baixa diferença de pressão efectiva.

- É interessante registar que em Lisboa e Paris o acréscimo das necessidades de aquecimento na moradia é em tudo semelhante ao edifício com ventilação mecânica, sendo esse acréscimo ligeiramente superior no caso do apartamento. Este resultado está associado ao facto de os sistemas de ventilação natural poderem apresentar um caudal médio inferior a  $Q_b$ , apesar de satisfazerem à condição de fornecer o caudal  $Q_b$  em mais de 50% do tempo. Efectivamente, em 50% do tempo o caudal de ventilação é de aproximadamente  $Q_b$  (devido à utilização das grelhas auto-reguláveis), mas nos restantes 50% do tempo, devido à menor acção do vento e da diferença de temperatura este caudal pode ser inferior a  $Q_b$ , conduzindo a um valor médio inferior a  $Q_b$ .
- Na ausência de grelhas de ventilação, para assegurar o caudal de ventilação de base é necessário dispor de edifícios muito permeáveis  $n_{50}$  de 8 a 15 ( $n_{50}$  de 3 a 6 na exposição ao vento 4). Pelo que, tendo em conta o valor  $n_{50}$  médio de 4 medido em edifícios portugueses, para um adequado funcionamento dos sistemas de ventilação natural é imprescindível dotar o edifício com grelhas de admissão de ar.
- Dado que se necessita de um número elevado de grelhas em ventilação natural seria razoável admitir uma permeabilidade ao ar superior à de edifícios com sistemas de ventilação mecânica. Contudo, dos resultados apresentados para a classe 4 de exposição ao vento regista-se que será adequado limitar a permeabilidade a 25% do valor de  $n_{50}$ , o que conduz a um valor próximo do critério II (eq. 4.7), pelo que se considera razoável admitir valores de permeabilidade iguais para edifícios com ventilação natural e mecânica.

Estes resultados evidenciam as limitações dos sistemas de ventilação natural em locais pouco expostos ao vento, situação para a qual é necessária uma elevada área de aberturas para ser possível assegurar os caudais de ventilação permanente inerentes a assegurar uma qualidade do ar interior satisfatória. Por outro lado, também evidenciam a necessidade de serem adoptadas grelhas de ventilação auto-reguláveis com um ponto de funcionamento a partir de diferenças de pressão tão baixas quanto possível, por exemplo, de 2 Pa como na Holanda, de forma a limitar a utilização de um elevado número de grelhas auto-reguláveis a partir de 20 Pa.

#### 4.3.3.2.6 - Permeabilidade ao ar em edifícios com ventilação natural e grelhas auto-reguláveis a partir de 2 Pa

Tendo em conta o excessivo número de grelhas necessário para assegurar os caudais de ventilação pretendidos quando se utilizam aberturas auto-reguláveis a partir de 20 Pa, foi também estudado o caso correspondente à aplicação de grelhas auto-reguláveis a partir de 2 Pa, Figura 4.134.

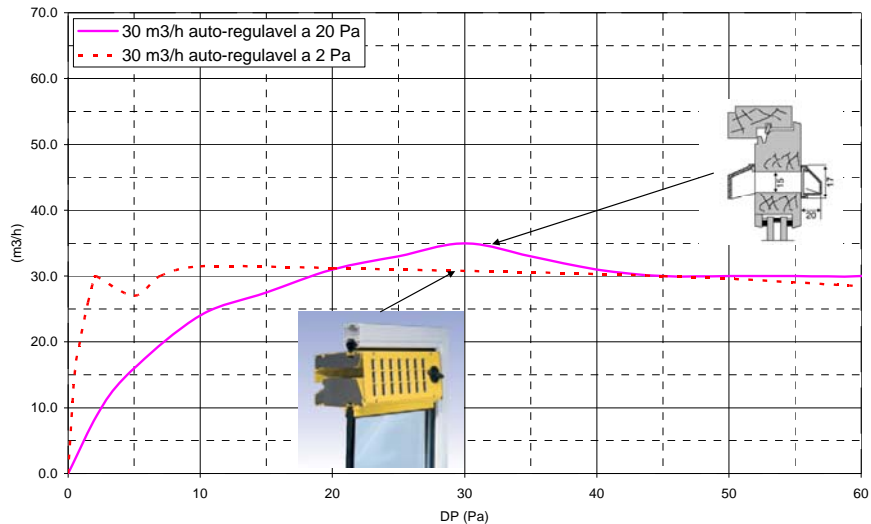


Figura 4.134 - Curva da grelha auto-regulável de 30 m³/h a 2 Pa e a 20 Pa

Para efeitos de simulação foram adoptados os pressupostos referidos na alínea anterior, com excepção de se ter admitido a aplicação de grelhas auto-reguláveis a partir de 2 Pa. Na simulação, estas grelhas foram aproximadas por uma curva de caudal constante.

Com base nestas premissas foram analisados os quatro cenários com o modelo de simulação detalhada:

- Caso 1: determinação do número de aberturas necessárias para assegurar o caudal  $Q_b$  em 50% do tempo entre Outubro e Abril, com  $n_{50}=0$ ;
- Caso 2: considerar 50% do valor limite obtido do critério II
- Caso 3: considerar o valor limite obtido do critério II;
- Caso 4: considerar o dobro do valor limite obtido do critério II.

Neste caso foi também analisado o caso correspondente à existência de chaminés de ventilação natural e um segundo caso correspondente a serem aplicados exaustores ou ventax que obstruem a evacuação natural do ar pelas condutas, Figura 4.135. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 4.136, na Figura 4.137, na Figura 4.138 e na Figura 4.139.

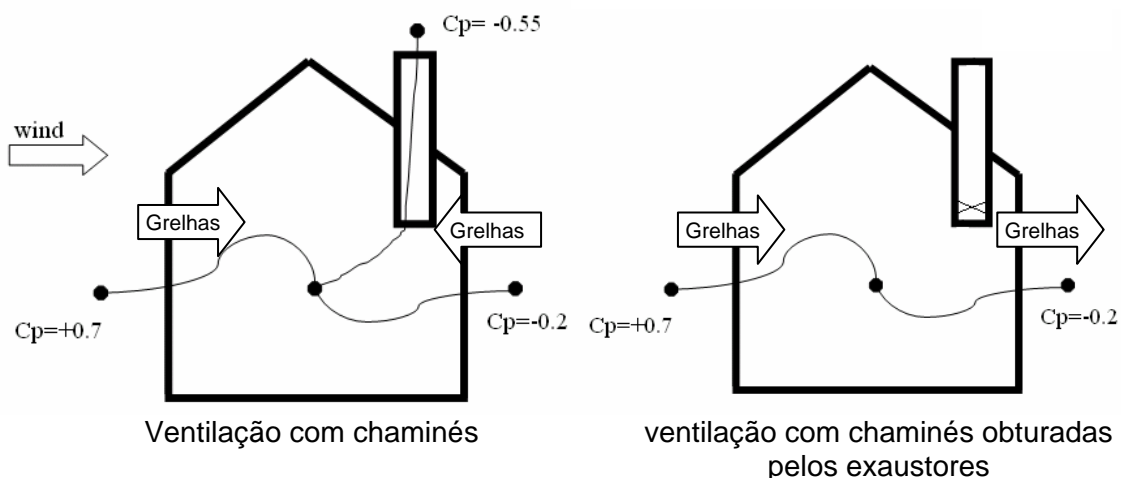


Figura 4.135 - Exemplo das condições de ventilação apreciadas no apartamento

VN grelhas auto-reguláveis a 2 Pa, com chaminé - apartamento

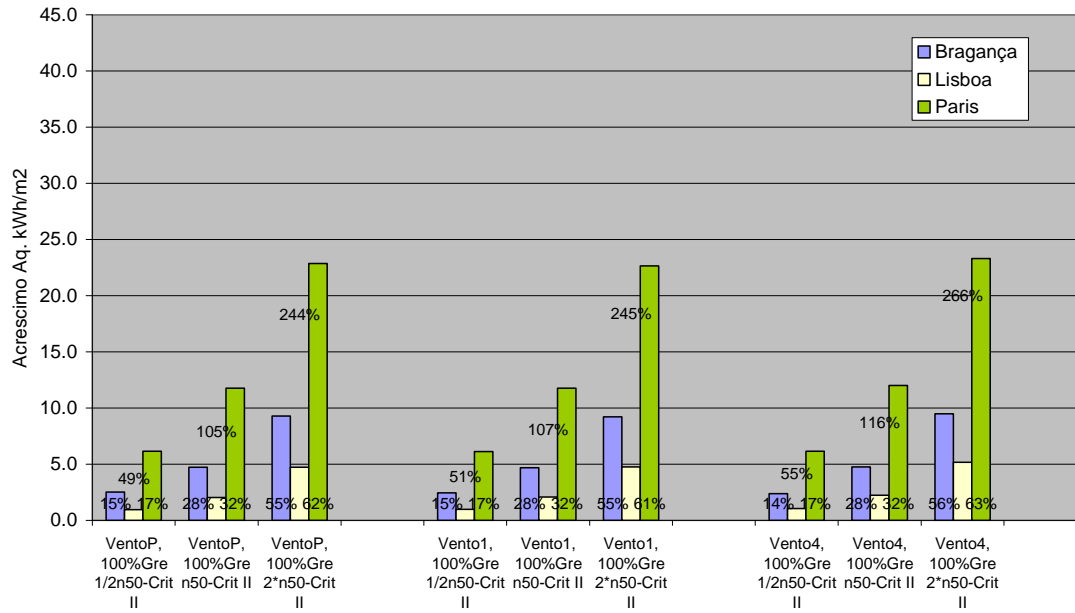


Figura 4.136 - Acréscimo das necessidades de aquecimento - Apartamento com grelhas de admissão de ar auto-reguláveis a 2 Pa - Ventilação natural

VN grelhas auto-reguláveis a 2 Pa, com chaminé - Moradia

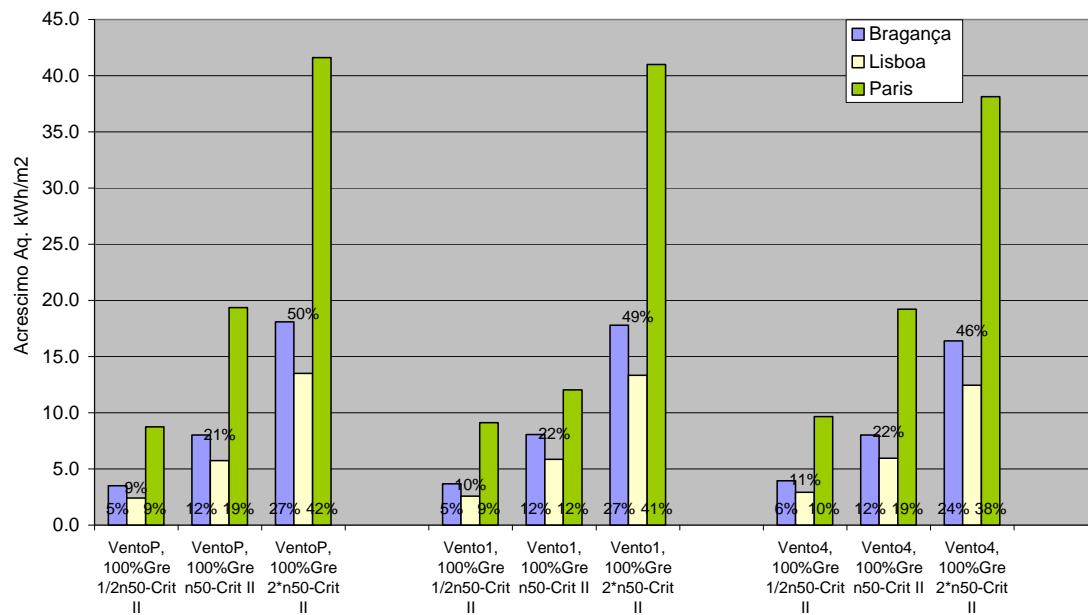


Figura 4.137 - Acréscimo das necessidades de aquecimento - Moradia com grelhas de admissão de ar auto-reguláveis a 2 Pa - Ventilação natural

VN grelhas auto-reguláveis a 2 Pa, sem chaminé - apartamento

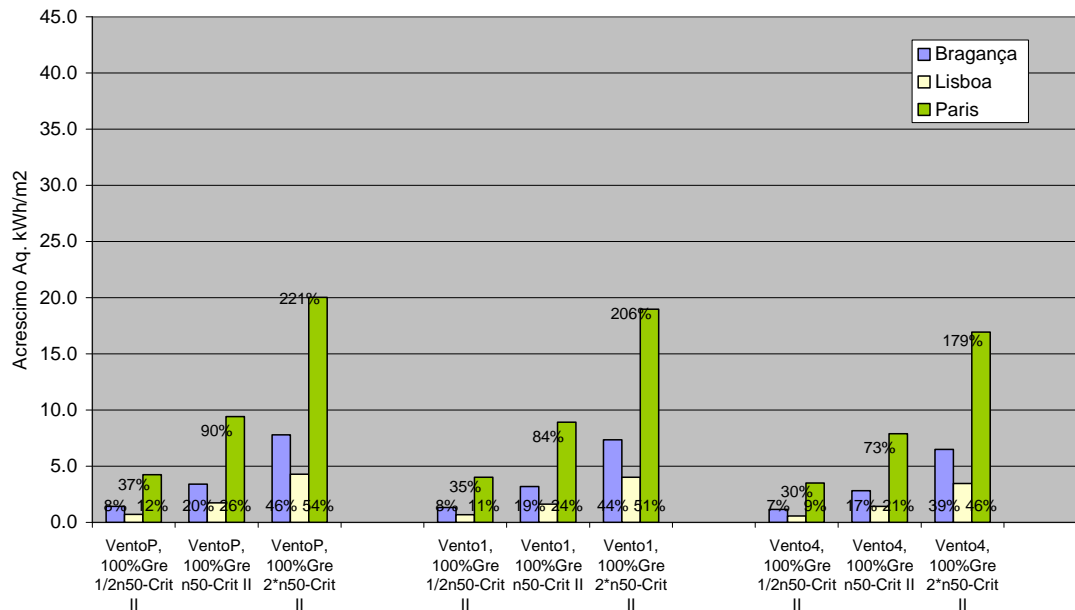


Figura 4.138 - Acréscimo das necessidades de aquecimento - Apartamento com grelhas de admissão de ar auto-reguláveis a 2 Pa - Ventilação natural chaminés obturadas

VN grelhas auto-reguláveis a 2 Pa, sem chaminé - Moradia

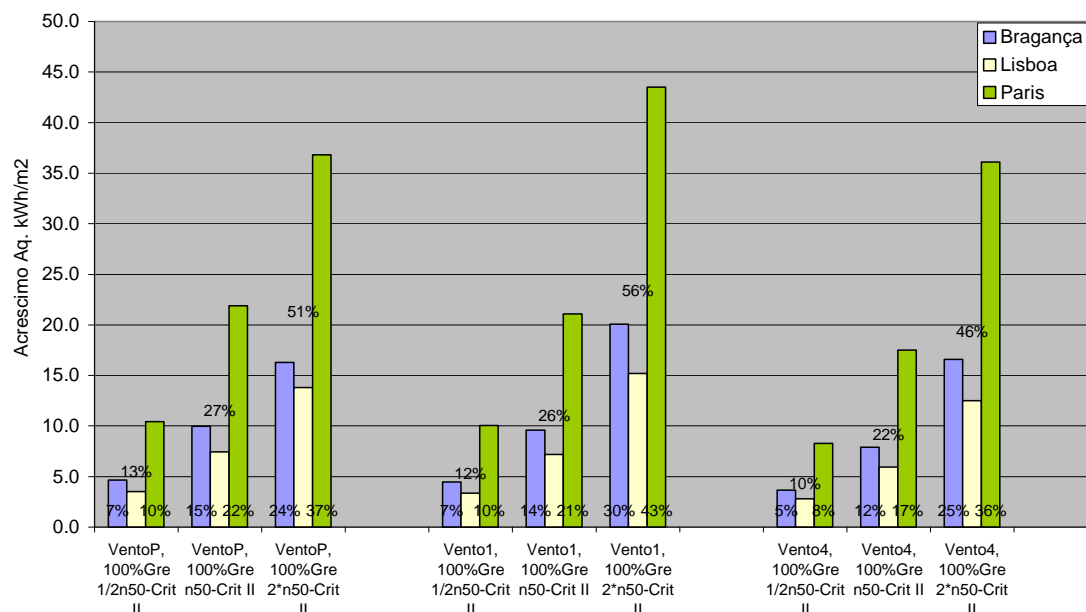


Figura 4.139 - Acréscimo das necessidades de aquecimento - Moradia com grelhas de admissão de ar auto-reguláveis a 2 Pa - Ventilação natural chaminés obturadas

Dos resultados anteriores é possível concluir:

- A aplicação das grelhas auto-reguláveis a 2 Pa permitem uma adequada admissão de ar a baixa pressão e nestas circunstâncias a envolvente afecta de forma mais significativa o desempenho energético do edifício face aos casos de edifícios com ventilação mecânica.

- Apesar do incremento registado nas necessidades de aquecimento (face à solução com ventilação mecânica) considera-se que continua a ser adequado limitar n50 ao valor da ventilação mecânica (eq. 4.7), podendo em edifícios onde se pretenda uma maior eficiência energética ser adoptado 40% do valor do critério II, o qual possibilita reduzir em sensivelmente 50% o acréscimo das necessidades de aquecimento, conforme foi preconizado para a ventilação mecânica.
- Estes resultados evidenciam que a utilização das grelhas auto-reguláveis a partir de 2 Pa conduzem a menores necessidades de aquecimento do que a situação correspondente à aplicação de grelhas auto-reguláveis a partir de 20 Pa, para os locais abrigados e da classe de exposição 1.

#### 4.3.3.3 - Proposta de limites para a permeabilidade ao ar

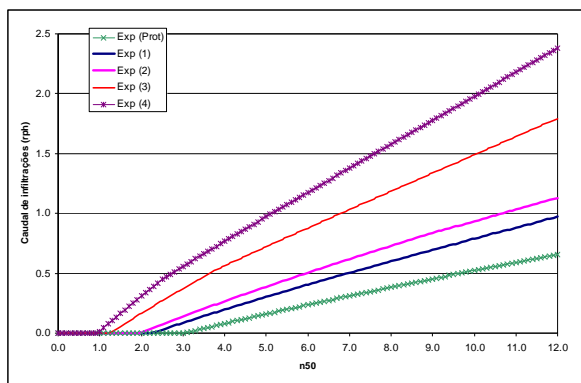
Com base no estudo efectuado, preconiza-se que a permeabilidade ao ar dos edifícios seja limitada de acordo com os valores do Quadro 4.72.

Quadro 4.72 - Proposta para limites de n50

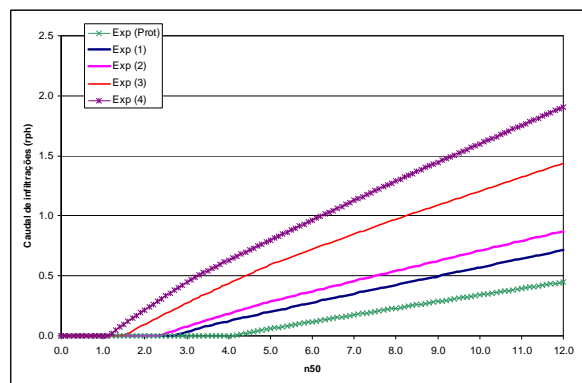
Nº fachadas expostas ao vento		Construção corrente		Edifícios de elevada eficiência energética	
		2 fach	4 fach	2 fach	4 fach
Classe exposição ao vento	Abrigada	2,9	3,8	1,1	1,5
	1	2,1	2,8	0,8	1,1
	2	1,8	2,5	0,7	1,0
	3	1,2	1,6	0,5	0,6
	4	0,9	1,2	0,4	0,5

Os valores do quadro anterior foram obtidos com o critério II (eq. 4.7) admitindo um caudal de ventilação ( $Q_b/Vol$ ) de 0,6 rph.

Dos resultados do estudo não se considera relevante estabelecer uma distinção entre edifícios com ventilação mecânica ou natural. Caso existisse essa distinção esta até deveria requerer uma menor permeabilidade para os edifícios com ventilação natural face aos edifícios com ventilação mecânica. De forma a possibilitar uma estimativa do caudal de infiltrações de ar apresenta-se nas figuras seguintes a taxa de infiltração de ar para a velocidade média do vento para cada uma das classes de exposição, função da permeabilidade da envolvente, para vento incidente na perpendicular a uma das fachadas principais e para sistemas VMC e de ventilação natural. É de registar que os edifícios com n50 que satisfazem os limites indicados no Quadro 4.72 apresentam um caudal de infiltrações de zero para a velocidade média do vento.

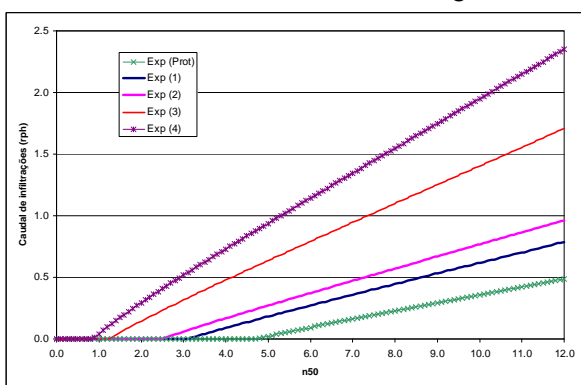


2 fachadas expostas ao vento

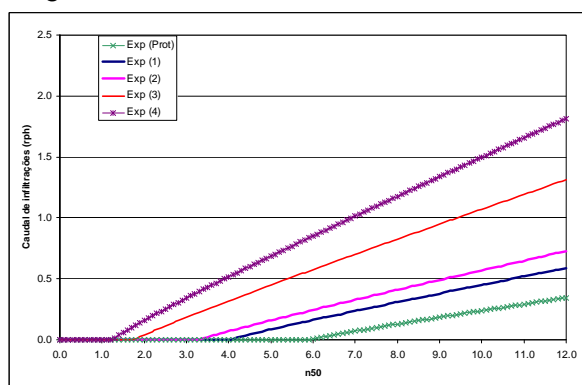


4 fachadas expostas ao vento

Figura 4.140 – Ventilação natural - Caudal de infiltração de ar para a velocidade média do vento - grelhas auto-reguláveis a 2 Pa

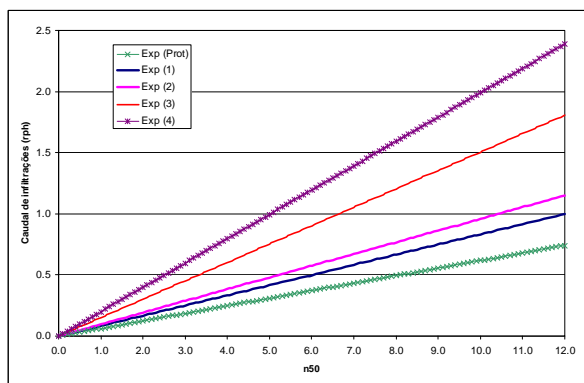


2 fachadas expostas ao vento

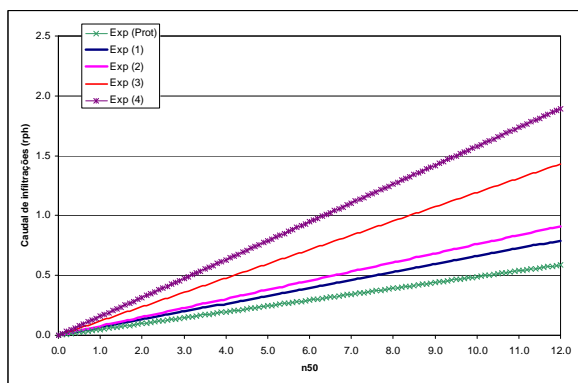


4 fachadas expostas ao vento

Figura 4.141 – Sistema VMC - caudal de infiltração de ar para a velocidade média do vento - Desequilíbrio de caudal de 0,6 rph e grelhas VM30

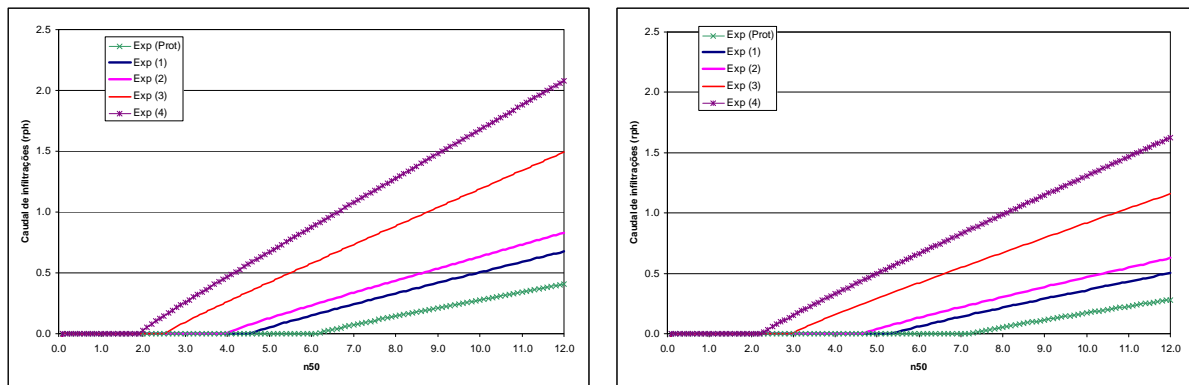


2 fachadas expostas ao vento



4 fachadas expostas ao vento

Figura 4.142 – Sistema VMC - Caudal de infiltração de ar para a velocidade média do vento - Desequilíbrio de caudal de 0,0 rph e frinças a envolvente



2 fachadas expostas ao vento

4 fachadas expostas ao vento

Figura 4.143 - Sistema VMC - Caudal de infiltração de ar para a velocidade média do vento - Desequilíbrio de caudal de 0,6 rph e frinchas da envolvente

As perdas térmicas associadas à ventilação e ao caudal de infiltrações de ar podem ser obtido pela eq. 4.8.

$$Q_v(\text{kWh}) = 0,024 \times 0,34 [Q_b(\text{m}^3/\text{h}) + Q_{\text{inf}}(\text{rph}) \times \text{vol}(\text{m}^3)] \text{GD} \quad \text{eq. 4.8}$$

em que:

- $Q_v$  são as perdas devido à ventilação e às infiltrações de ar, em kWh
- $Q_b$  é o caudal de ventilação de base, em  $\text{m}^3/\text{h}$
- $Q_{\text{inf}}$ , é o caudal de infiltrações obtido nas figuras anteriores, em rph
- $\text{Vol}$ , é o volume interior do edifício ou espaço, em  $\text{m}^3$
- $\text{GD}$ , são os graus dias de aquecimento aplicáveis função da zona climática.

#### 4.3.4 - Eficiência energética e ambiental de sistemas de ventilação

Nas secções anteriores foi avaliada a importância do caudal de ventilação e de infiltrações de ar no desempenho térmico dos edifícios e foram propostos limites de forma a reduzir o seu impacto na eficiência energética dos edifícios.

Dos resultados apresentados, os sistemas de ventilação mecânica, por imporem maiores diferenças de pressões, usualmente conduzem a menores caudais de infiltração que os sistemas de ventilação natural e a menores necessidades energéticas. Contudo, aos sistemas de ventilação mecânica acresce a parcela correspondente à energia para funcionamento do sistema, bem como a carga ambiental associada aos materiais que o compõem, que como foi mostrado na secção 4.1.6.7.1 é superior ao dos sistemas de ventilação natural.

Na secção 4.1.6.7.1 o edifício foi analisado considerando o caso ideal de ausência de infiltrações de ar. Nesta secção são apresentados os resultados da análise considerando os três sistemas de ventilação: sistema de ventilação VMC, sistema de ventilação natural com grelhas auto-reguláveis a 2 Pa e um sistema misto com exaustores e ventax e grelhas auto-reguláveis a 2 Pa. Em todos os casos considera-se que a permeabilidade ao ar da envolvente se encontra limitada de acordo com os valores do Quadro 4.72.



#### 4.3.4.1 - Determinação do desempenho energético e ambiental de diferentes sistemas de ventilação em edifícios de habitação

Nesta secção são apresentados os resultados da análise de eficiência energética e ambiental de sistemas de ventilação do edifício multifamiliar estudado no capítulo 5.

O edifício apresenta uma altura de 11 m e encontra-se situado em meio urbano, região A, pelo que face aos critérios do Quadro 4.63 enquadra-se na classe 2 de exposição ao vento. Nesse sentido, face aos resultados do estudo da permeabilidade ao ar é recomendada uma permeabilidade ao ar n50 inferior a 1,8 para edifícios com duas fachadas expostas ao vento (Quadro 4.72).

Este estudo compreendeu a análise dos seguintes sistemas de ventilação:

- caso ideal com taxa de ventilação constante e sem infiltrações de ar
- edifício dotado de sistema de ventilação do tipo VMC e envolvente com n50 de 1,8;
- edifício dotado de sistema de ventilação com exaustores, envolvente dotada de grelhas de ventilação auto-reguláveis a 2 Pa e com n50 de 1,8;
- edifício dotado de sistema de ventilação natural e com chaminés, envolvente dotada de grelhas de ventilação auto-reguláveis a 2 Pa e com n50 de 1,8;
- edifício dotado de sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor com uma eficiência de 50% e envolvente com n50 de 1,8.

Conforme resulta do dimensionamento nos apartamentos de tipologia T2 é considerada uma taxa de ventilação de 0,8 rph e nos apartamentos de tipologia T3 é previsto um caudal de 0,93, perfazendo um caudal de ventilação total do edifício de 1360 m<sup>3</sup>/h.

Para analisar os diferentes sistemas de ventilação, ao modelo térmico do edifício foi adicionada a rede de ventilação que é constituída por cerca de 30 nós, 25 componentes e cerca de 100 ligações.

Na análise do sistema VMC e do sistema de ventilação com recuperação de calor apresentam-se os resultados referentes ao desempenho térmico do edifício, bem como esses resultados acrescidos do consumo de energia do ventilador. Para esse efeito e face ao dimensionamento realizado foi determinado um consumo específico de 0,20 W/(m<sup>3</sup>/h) para o sistema VMC e um valor de 0,48 W/(m<sup>3</sup>/h) para o sistema com recuperação de calor. Na determinação deste valor foi considerada uma eficiência média do motor e do ventilador de 35%. Este valor é concordante com os limites definidos em França para este tipo de sistemas. Para se obter uma equivalência do consumo de energia eléctrica do ventilador com as necessidades térmicas do edifício, nos gráficos (Figura 4.144, Figura 4.145 e Figura 4.146) o consumo de energia eléctrica do ventilador foi multiplicado por 3, porque se admitiu a utilização de bombas de calor para aquecimento ambiente com um COP de 3.

As necessidades térmicas apresentadas na Figura 4.144, na Figura 4.145 e na Figura 4.146 foram determinadas considerando o edifício de acordo com o especificado no capítulo 5, em que nos elementos opacos se encontra aplicado 60 mm de isolante térmico e se encontram aplicadas janelas de alumínio e vidro duplo corrente. As necessidades térmicas foram determinadas para as condições de conforto adaptativo de 18°C no Inverno e 27°C no Verão. No Verão foi considerado que em condições favoráveis eram abertas janelas em fachadas opostas.

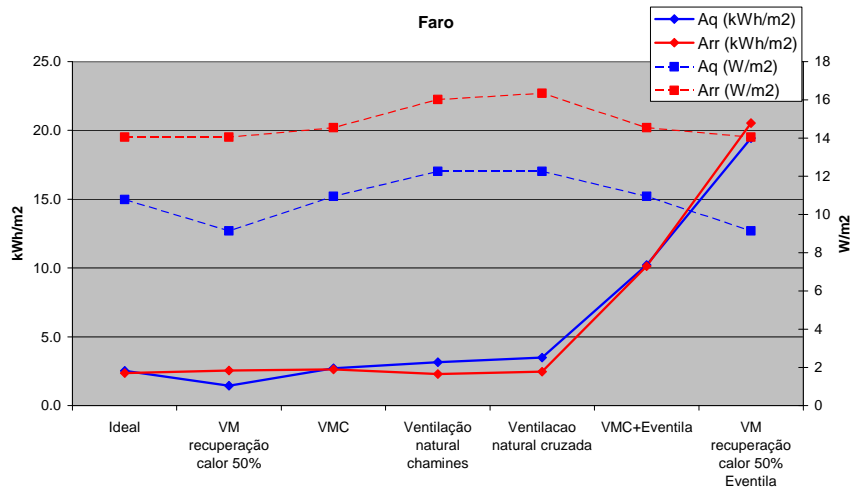


Figura 4.144 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Faro

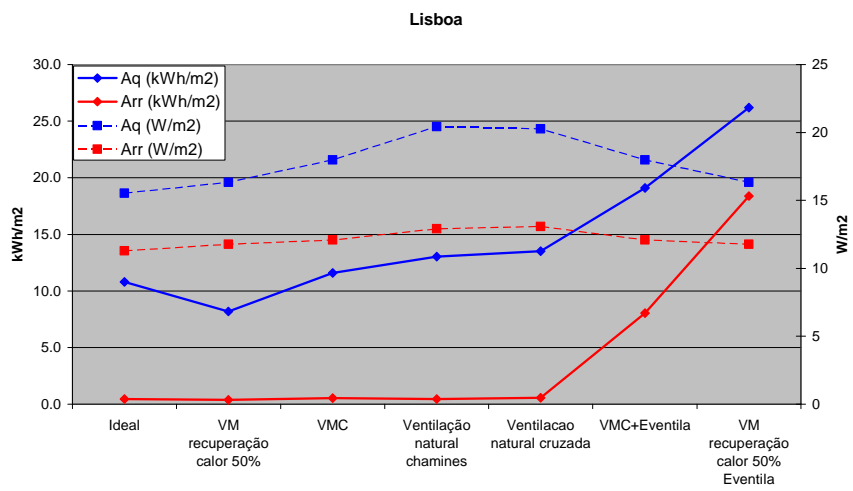


Figura 4.145 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Lisboa

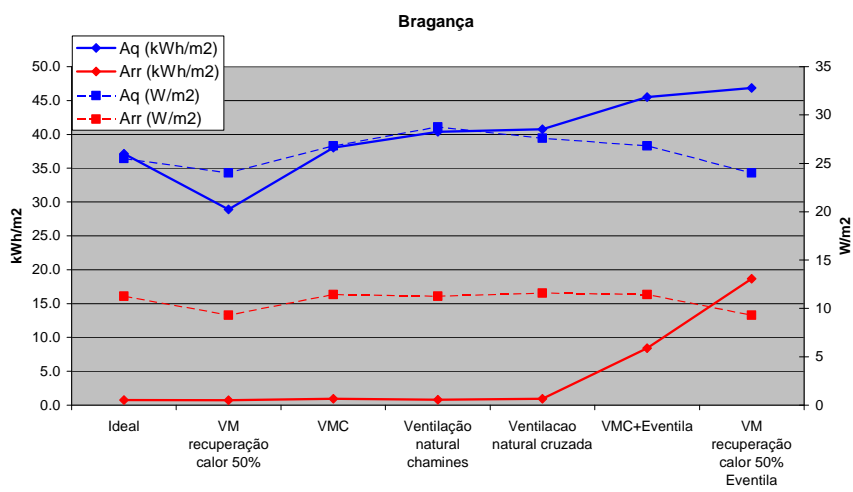


Figura 4.146 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Bragança

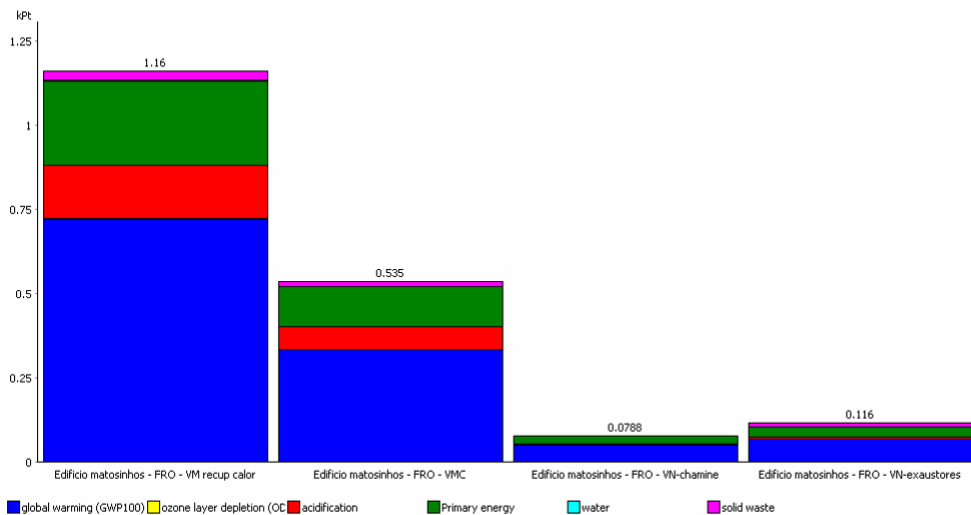


Figura 4.147 - Indicador único do desempenho ambiental do edifício com diferentes sistemas de ventilação - Faro

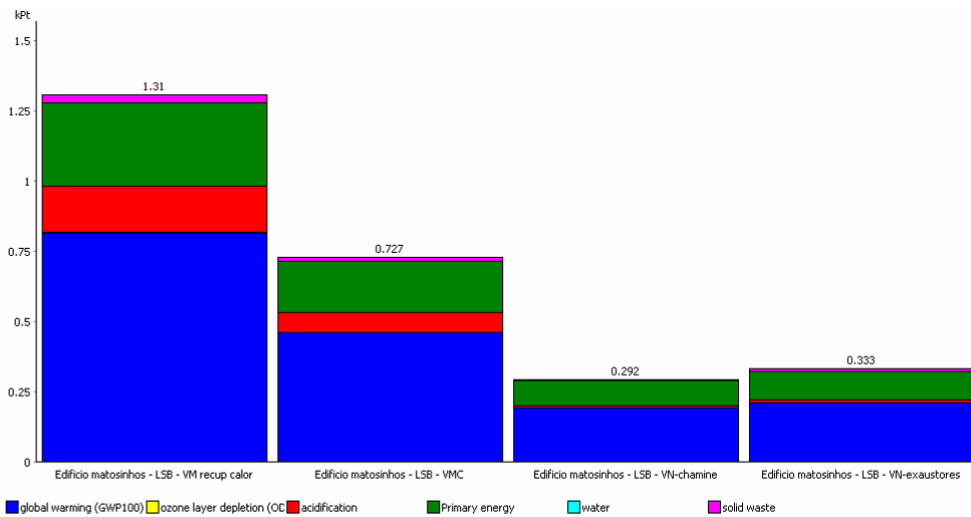


Figura 4.148 - Indicador único do desempenho ambiental do edifício com diferentes sistemas de ventilação - Lisboa

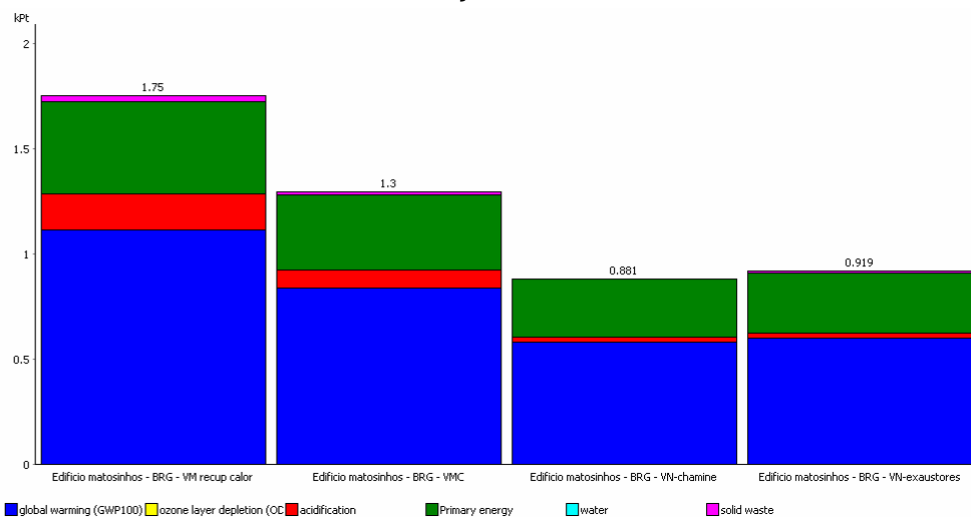


Figura 4.149 - Indicador único do desempenho ambiental do edifício com diferentes sistemas de ventilação - Bragança

Dos resultados obtidos é interessante registar que os sistemas com ventilação natural são os mais eficientes em relação ao desempenho energético, mesmo quando comparados com sistemas mecânicos com recuperação de calor. Os sistemas de ventilação mecânica apesar de terem menores necessidades térmicas, são penalizados pelo consumo de energia eléctrica do funcionamento contínuo dos ventiladores.

Estes resultados do consumo de energia conjugados com os impactes dos materiais (secção 4.1.6.7.1) indicam que a solução mais sustentável é a dos sistemas de ventilação natural. Os resultados da ACV referentes aos sistemas de ventilação do edifício (Figura 4.147, Figura 4.148 e Figura 4.149), incluindo os materiais, as necessidades térmicas e os consumos de energia dos ventiladores evidenciam ainda de forma mais vincada a vantagem da ventilação natural e da ventilação mista (natural e exaustores), em detrimento dos sistemas mecânicos centralizados. Refere-se que entre o sistema de ventilação com melhor desempenho e o de pior desempenho pode existir uma variação da carga ambiental de 1000 ecopontos!

#### 4.3.4.2- Avaliação do desempenho ambiental - temperatura de 22 e 24,5°C

Na secção anterior as necessidades térmicas foram determinadas para as condições aplicáveis a edifícios não arrefecidos, admitindo os limites de conforto adaptativo definidos no capítulo 3 e que correspondem à primeira medida para redução das necessidades térmicas. Os resultados da secção anterior evidenciaram a vantagem dos sistemas de ventilação natural nessas condições. Nesta secção são consideradas as condições de conforto médias dos edifícios climatizados de 22°C no Inverno e de 24,5°C no Verão.

Com estas temperaturas de conforto existe um aumento significativo das necessidades térmicas para todas as soluções de ventilação, não se registando diferenças importantes face às conclusões retiradas na secção anterior. Efectivamente, os sistemas com ventilação natural continuam a ser os mais eficazes. Para estas novas condições, na localidade mais fria (Bragança, Figura 4.150), regista-se que os sistemas de ventilação mecânica com recuperação de calor se tornam mais eficientes que os sistemas VMC apenas com extracção e apresentam um desempenho ligeiramente superior ao do edifício com ventilação natural. Contudo, tendo em conta a carga ambiental associada ao sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor, mesmo para essas condições de ambiente interior, continua a verificar-se que as soluções de ventilação natural são as mais eficientes, Figura 4.151.

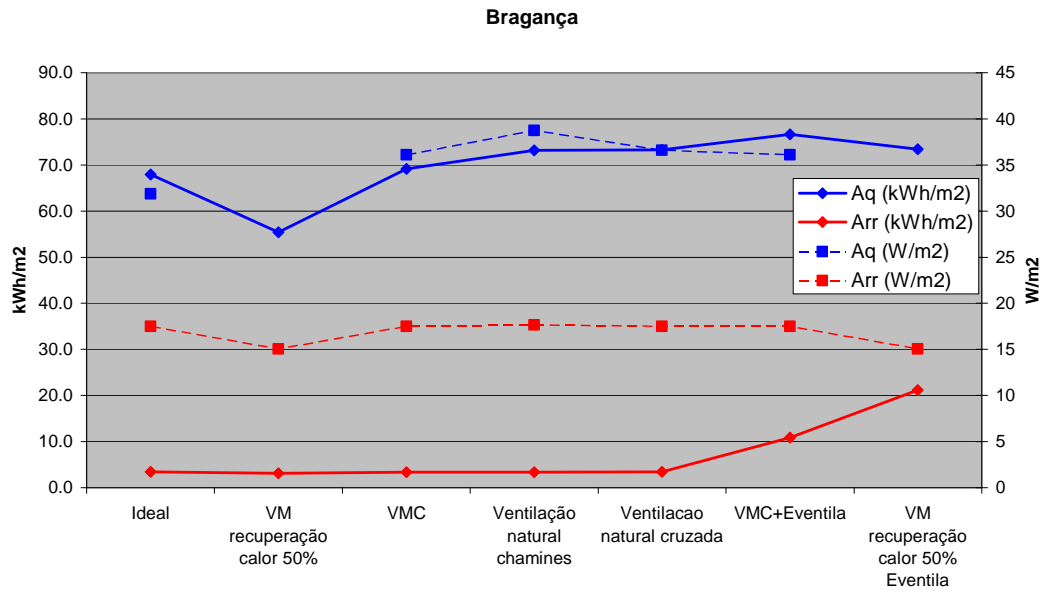


Figura 4.150 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Bragança

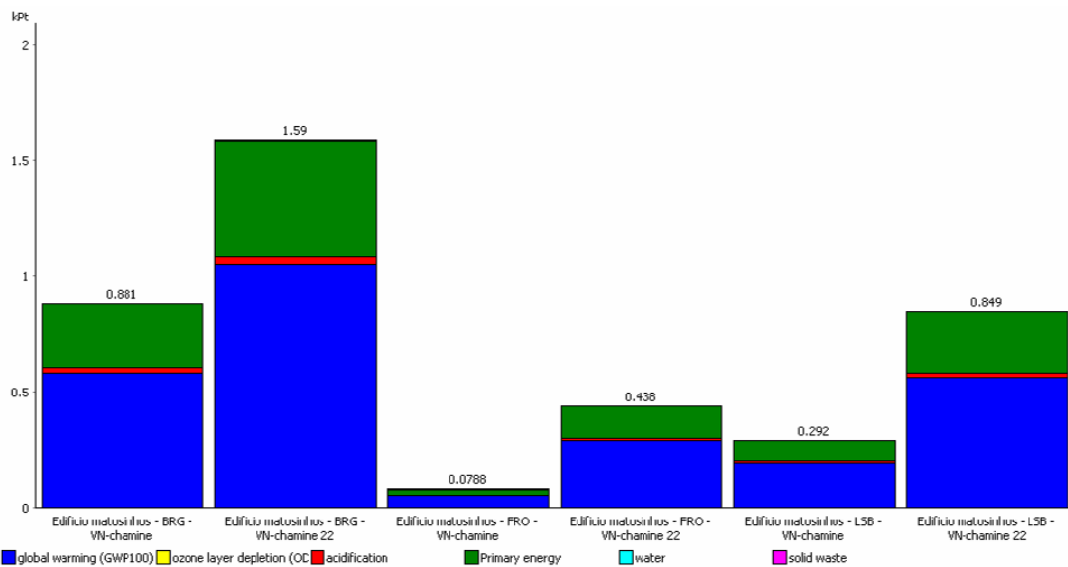


Figura 4.151 - Indicador único do desempenho ambiental do edifício com diferentes sistemas de ventilação

#### 4.3.4.3- Avaliação do desempenho ambiental - envolvente permeável

Na secção 4.3.4.1 as necessidades térmicas foram determinadas para o edifício com uma envolvente que satisfaz aos requisitos propostos, ou seja n50 de 1,8. Nesta secção é avaliado o desempenho do edifício considerando uma envolvente com o valor médio dos edifícios portugueses (Figura 4.124), ou seja, n50 de 5. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.152, na Figura 4.153 e na Figura 4.154

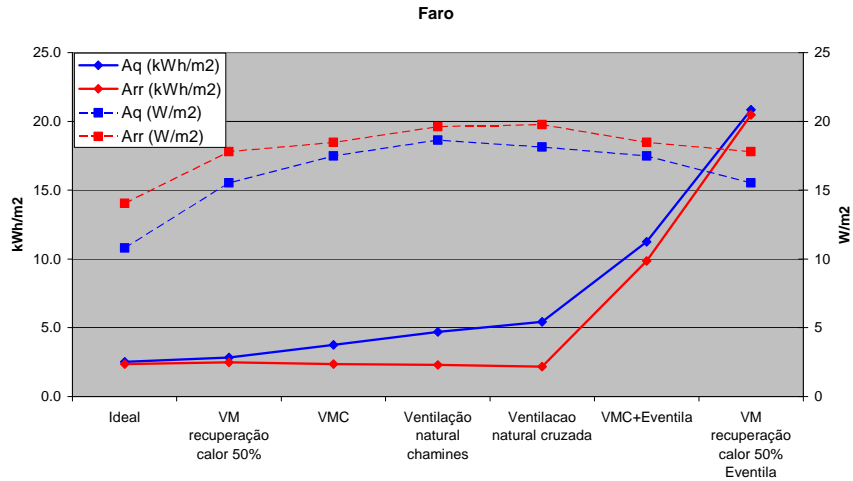


Figura 4.152 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Faro

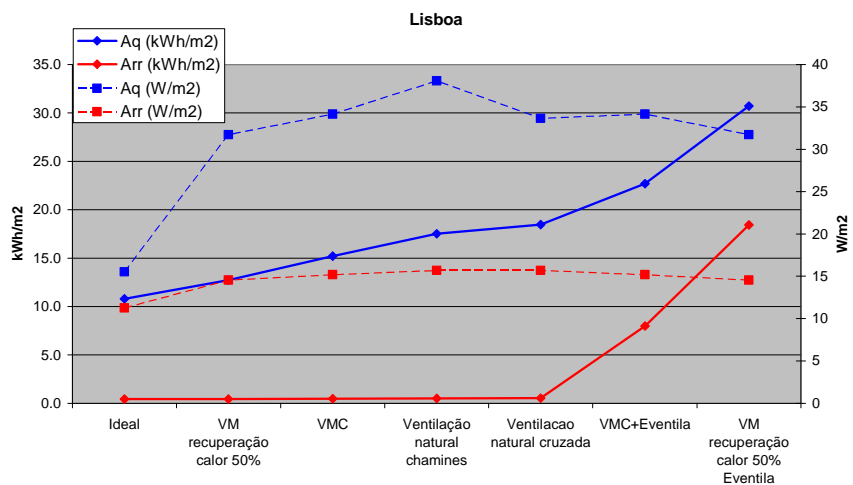


Figura 4.153 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Lisboa

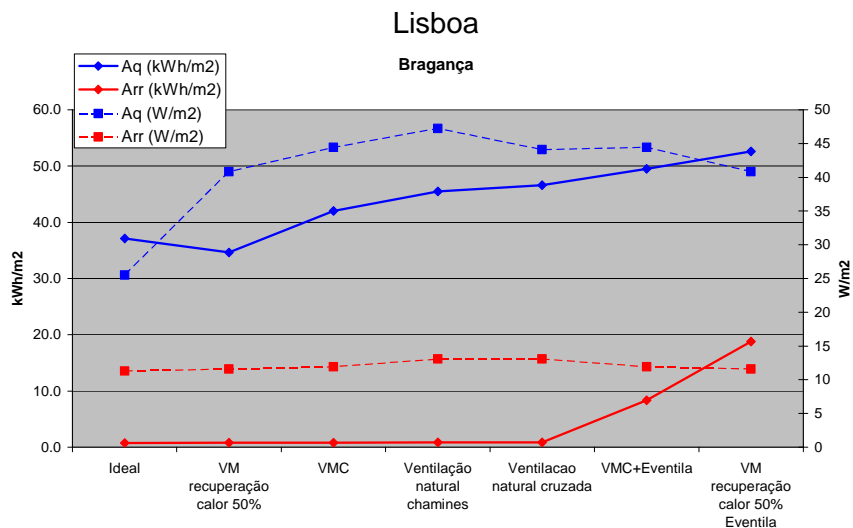


Figura 4.154 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Bragança

Deste modo, no edifício com uma envolvente n50 de 5 (o valor médio de edifícios portugueses) em vez de n50 de 1,8, as necessidades de aquecimento são agravadas em sensivelmente 2 a 5 kWh/m<sup>2</sup>/ano, ou seja, um acréscimo de sensivelmente 13%, 40% e 60%

das necessidades de aquecimentos em Bragança, Lisboa e Faro, respectivamente. Em relação às necessidades de arrefecimento, regista-se que estas são praticamente independentes do tipo de sistema de ventilação.

Em edifícios com maior permeabilidade ao ar a diferença de eficiência entre edifícios com ventilação natural e mecânica é ligeiramente atenuada, principalmente no sistema VMC, pois a depressão (ou sobrepressão) minimiza o caudal de infiltrações de ar e as necessidades térmicas de aquecimento. Contudo, continua a verificar-se que os sistemas de ventilação natural continuam a ser os mais eficientes.

Salienta-se que a limitação da permeabilidade ao ar da envolvente usualmente não implica um acréscimo de recursos materiais ou componentes particularmente sofisticados, pelo que é uma forma eficaz de melhorar a eficiência energética e ambiental dos edifícios, Figura 4.155 e Figura 4.156.

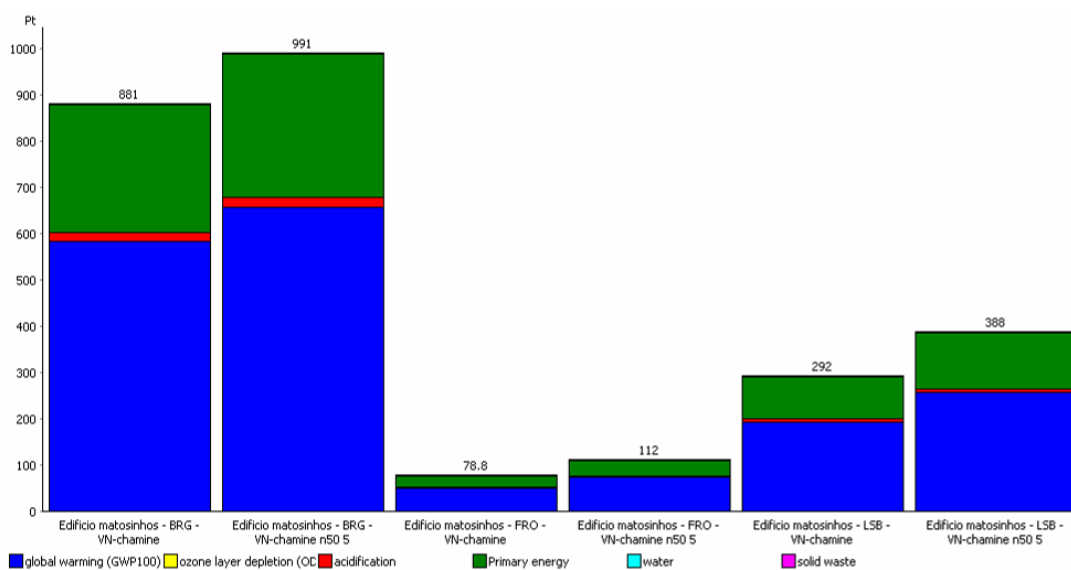


Figura 4.155 - Indicador único do desempenho ambiental do edifício com diferentes sistemas de ventilação

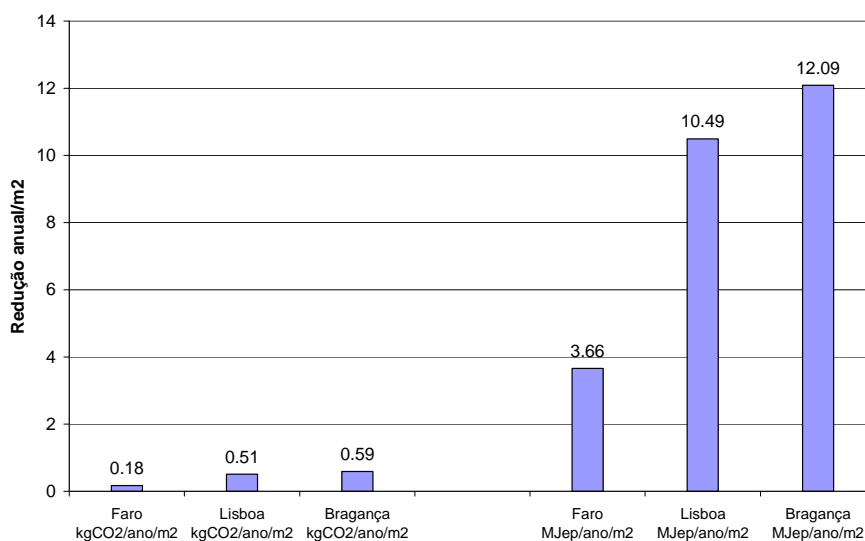


Figura 4.156 - Estimativa da redução das emissões de CO<sub>2</sub> e consumo de energia primária associado ao controlo da permeabilidade

Para este exemplo, o facto de se limitar a permeabilidade ao ar permite reduzir o impacto ambiental do edifício em sensivelmente 30% em Faro, 25% em Lisboa e 11% em Bragança. Este controlo da permeabilidade ao ar permite reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> por ano e por metro quadrado de área útil em sensivelmente 0,2 a 0,6 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/ano e a energia primária em 3,5 a 12 MJep/m<sup>2</sup>/ano. Esta redução é superior à conseguida com a alteração da espessura de isolamento térmico em Lisboa e em Faro (admitindo como solução base uma espessura de isolamento de 20 mm) e em Bragança equivale à alteração do isolamento de 20 mm para 40 mm.

#### **4.3.5- Notas conclusivas**

Nesta secção foram analisados diversos aspectos relacionados com a eficiência energética e ambiental da ventilação.

Foi evidenciado que a permeabilidade ao ar pode conduzir a infiltrações de ar importantes e a incrementar de forma significativa as necessidades energéticas dos edifícios e o seu impacto ambiental.

Apesar da construção "pesada" existente em Portugal, foi mostrado que a permeabilidade ao ar de edifícios portugueses pode variar entre n50 de 2 a mais de 10, pelo que foi elaborado um estudo para avaliar limites da permeabilidade ao ar da envolvente e foram propostos limites de forma controlar esta parcela do balanço térmico dos edifícios.

Na definição dos limites para a permeabilidade ao ar da envolvente foram analisadas diferentes tipologias com diferentes sistemas de ventilação. Para esse efeito, foi necessário caracterizar componentes de sistemas de ventilação, principalmente de ventilação natural. Deste trabalho salienta-se a implementação do modelo do ventilador estático no topo de chaminés, que tem em conta a interacção vento/caudal evacuado, o qual pode ser responsável por uma redução de 20% a 40% do caudal escoados nas condutas.

Com base nos resultados dos ensaios de pressurização e na caracterização de componentes de sistemas de ventilação natural, foram realizadas simulações de desempenho térmico de edifícios com diferentes sistemas de ventilação. Dos resultados obtidos, conclui-se que a permeabilidade ao ar pode conduzir a perdas térmicas significativas no Inverno (aumentar em mais de 50% as perdas térmicas), tendo uma contribuição negligenciável no Verão.

Dos resultados obtidos constatou-se que o critério II definido para limitar as infiltrações ao caudal base em 95% do tempo é aceitável, pois conduz a valores n50 exequíveis face à construção Portuguesa e permite limitar de forma razoável as perdas térmicas causadas pela infiltração de ar. Tendo em conta a importância das perdas térmicas pela infiltração de ar foi definido um 2º critério para edifícios de elevada eficiência energética (Quadro 4.72).

Face aos critérios existentes noutros países, nesta proposta faz-se variar o limite da permeabilidade com a exposição ao vento do edifício e com o número de fachadas expostas ao vento, tendo em conta as acções que promovem as infiltrações de ar. Pelo que, em alguns casos o critério proposto conduz a valores mais permissivos que os existentes noutros países e noutros casos conduzem a valores mais restritivos.

Foi determinado que a permeabilidade ao ar das caixas de estore pode corresponder a sensivelmente 50% da permeabilidade ao ar da envolvente, sendo um elemento da



construção onde se deve prestar maior cuidado na sua execução, pois existem elementos pré-fabricados que podem apresentar 1/10 da permeabilidade medida em vários edifícios.

Foi também evidenciado que na construção corrente as janelas podendo ser um elemento importante para a infiltração de ar, na generalidade dos casos contribuem apenas com 5% para a permeabilidade total da envolvente. Em edifícios onde seja requerido n50 inferior a 2 as janelas poderão ter um contributo importante, sendo necessário o recurso a janelas da classe 4.

Em apartamentos de um mesmo edifício de habitação multifamiliar foram medidos n50 que variam de 3,1 a 7,2, evidenciando que apesar de se tratarem dos mesmos materiais e realizados na mesma altura pelas mesmas empresas, existem aspectos de execução em obra que condicionam o seu desempenho. Nesse sentido considera-se necessário especificar a realização de ensaios de pressurização dos edifícios após a construção de forma a comprovar os valores pretendidos. Este ensaio é um complemento das propriedades que devem ser especificadas na fase de projecto para alguns elementos da envolvente, como por exemplo as janelas e as caixas de estore.

Dos resultados apresentados também se evidencia que assumir que o caudal de ventilação de base é assegurado pelas infiltrações de ar pela envolvente é inadequado pois, para assegurar um caudal de ar satisfatório, é necessário n50 superior a 6 (Quadro 4.70), o que é um valor relativamente acima da média. Além disso é evidenciado que realizar a ventilação através de frinchas é menos eficiente do que utilizar grelhas auto-reguláveis.

Foi evidenciado que em edifícios com ventilação natural situados em locais com uma acção do vento pouco intensa se devem adoptar grelhas auto-reguláveis a partir de 2 Pa, pois caso sejam adoptadas grelhas auto-reguláveis a partir de 20 Pa, será necessário um elevado número de grelhas para assegurar o caudal de ventilação de base pretendido.

Da análise da eficiência energética e ambiental de um edifício de habitação multifamiliar concluiu-se pela maior eficiência dos sistemas de ventilação natural, que conduziram a uma redução de cerca de 1000 ecopontos, face à ventilação mecânica com recuperação de calor em Bragança. É evidenciado que o controlo da permeabilidade ao ar pode ter uma importância superior à alteração da espessura do isolamento térmico em Lisboa e Faro e poderá ter um impacto equivalente ao acréscimo de 20 mm da espessura do isolamento em Bragança. Nesta análise comparativa dos diferentes sistemas regista-se que os edifícios dotados com sistemas mecânicos apresentam melhor desempenho térmico, contudo são penalizados em termos energéticos pelo consumo de energia dos ventiladores e em termos do indicador ambiental único pelo maior consumo de energia e pela maior carga ambiental dos seus componentes.



## 5 - CASOS DE ESTUDO

### 5.1 - AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UM EDIFÍCIO DE HABITAÇÃO MULTIFAMILIAR

#### 5.1.1- Descrição do edifício

Com o objectivo de avaliar a importância dos diferentes elementos que compõem um edifício multifamiliar nesta secção é efectuada a ACV de um edifício de habitação constituído por 4 pisos, com apartamentos de tipologia T2 e T3, Figura 5.1, Figura 5.2 e Quadro 5.1. Este edifício tem exposição Norte-Sul, sendo as empenas de nascente e de poente partilhadas com edifícios adjacentes.

A envolvente exterior é composta por paredes de alvenaria de tijolo com isolamento térmico pelo exterior. A cobertura é inclinada com desvão ventilado, sendo constituída por telha de fibrocimento e laje de betão isolada com mantas de lã mineral. Na envolvente encontram-se instaladas janelas de alumínio com vidro duplo. As janelas dos quartos e da sala são protegidas por persianas com régua de PVC. No Quadro 5.2 apresenta-se um resumo das áreas e dos elementos do edifício.

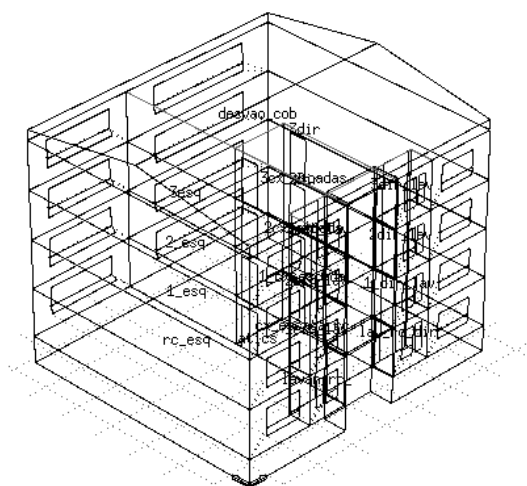


Figura 5.1 - Modelo do edifício multifamiliar

Quadro 5.1 - Quadro resumo das dimensões do caso de estudo

Área planta (m <sup>2</sup> )	Área bruta (m <sup>2</sup> )	Área útil (m <sup>2</sup> )	Pd (m)	Aenvidraçada/Autil
153	800	612	2,4	16%

Neste caso de estudo avalia-se o impacto ambiental da configuração base do edifício de forma a apreciar a relevância ambiental de alguns dos elementos do edifício

- Análise do efeito da estrutura de produção de energia eléctrica
- Análise do efeito do isolamento térmico dos elementos opacos
- Análise do efeito do isolamento térmico dos envidraçados
- Análise do efeito da temperatura interior de conforto
- Efeito da reciclagem e reutilização dos materiais de construção

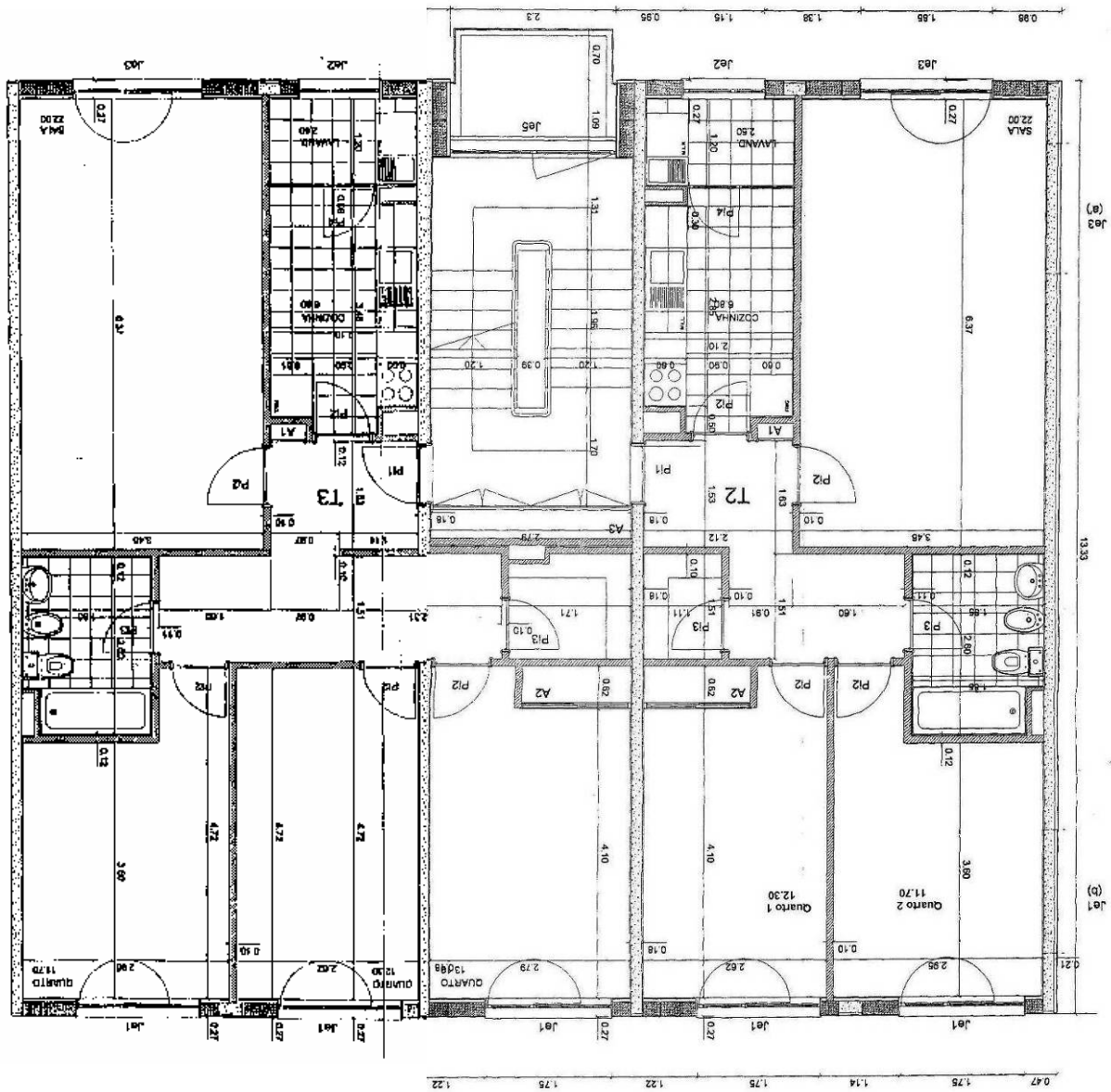


Figura 5.2 - Planta do edifício em estudo

Quadro 5.2 - Resumo das dimensões e materiais

<b>Elemento do edifícios</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>
<b>Envolvente exterior</b>	
Parede exterior: parede simples 22 cm, 60 mm XPS e reboco	288,2
Envidraçado exterior: perfis de alumínio e vidro duplo	111,3
Caixilho com grelhas: perfis e grelhas de alumínio	4,3
Persianas: persiana com réguas de PVC	68,0
Cobertura inclinada esteira horizontal: laje aligeirada com 60 mm lã mineral	199,5
<b>Envolvente e elementos interiores</b>	
Lajes aligeirada revestida madeira/estruque	611,3
Lajes aligeirada revestida mosaicos/estruque	119,1
Betão armado	25,6 m <sup>3</sup>
Paredes separação fogos de tijolo de 22 cm	80,6
Paredes separação fogos - caixa de escadas de tijolo de 22 cm	170,4
Paredes separação interiores aos fogos de tijolo de 15 cm	535,2
Portas de madeira	113,4 (60 unidades)
Área de azulejos	391,8
Laje de escadas e patamares maciça	63,5
Corrimão de aço	110,1 kg
Portas de armários da caixa de escadas de madeira	26,8
<b>Instalações</b>	
Sistema de ventilação mecânica centralizado	
Caldeiras (8 x 23 kW x (50 anos/20 anos))	460 kW
Sistema de radiadores e tubo de aço	65 kW
<b>Utilização (50 anos)</b>	
Consumo de água (160 l/dia/p)	81 760 m <sup>3</sup>
Consumo de energia térmica AQS (40 l/dia/p, gás)	951 MWh
Consumo electricidade (família standard)	916 MWh
Energia para aquecimento ambiente (RCCTE, 2006, GD=1200)	158,6 MWh
<i>Resíduos sólidos urbanos (1 kg/dia/pessoa)</i>	<i>511 ton</i>

### 5.1.2 - Avaliação global do edifício

Da informação do Quadro 5.2 e da ACV de materiais e soluções de construção apresentada no capítulo 4 é possível estimar o impacte ambiental do edifício, Figura 5.3, Figura 5.4 e Quadro 5.4. Nesta análise incluíram-se as necessidades energéticas de aquecimento decorrentes do limite do RCCTE, 2006, (10% do valor limite regulamentar com base no padrão típico de utilização), admitindo 1200 GD de aquecimento e que o aquecimento é realizado com caldeira a gás. Neste edifício não se considerou a existência de arrefecimento, pois o número de horas de desconforto ( $T > 30^{\circ}\text{C}$ ) é inferior a 75 h, conforme previsto no capítulo 3, Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Número de horas de desconforto (h)

	<b>Faro</b>	<b>Lisboa</b>	<b>Bragança</b>
<b>Ti&gt;30°C</b>	<b>16 a 89</b>	<b>7 a 31</b>	<b>6 a 53</b>
Ti>29°C	78 a 235	35 a 118	45 a 156
Ti>27°C	501 a 745	272 a 438	265 a 448
Ti< 18°C	493 a 1191	2017 a 2946	3963 a 4416
<b>Ti&lt;16°C</b>	<b>55 a 292</b>	<b>833 a 1656</b>	<b>3193 a 3700</b>

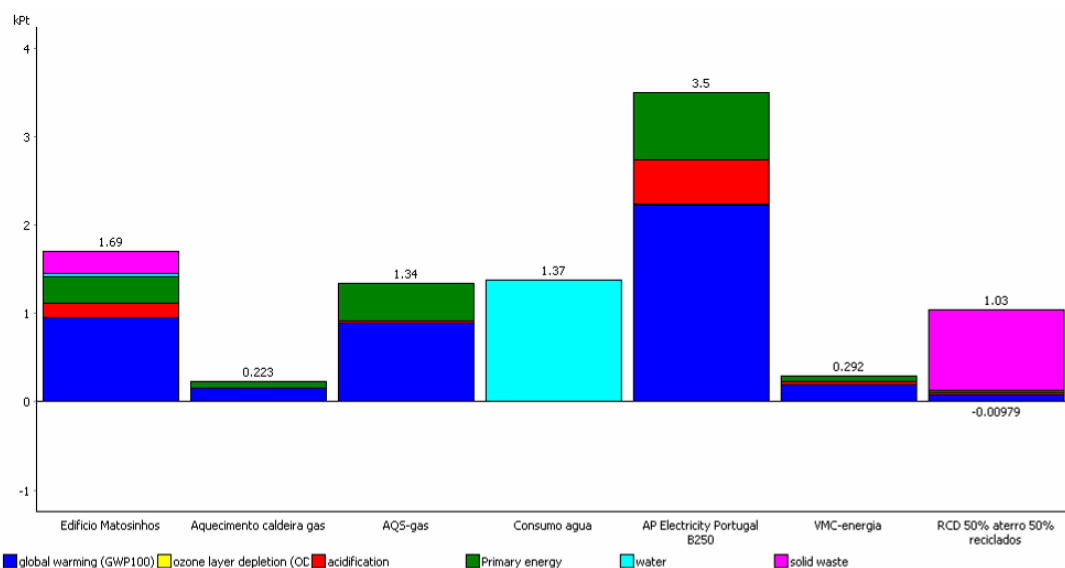


Figura 5.3 - Valores do indicador ambiental para ACV do edifício multifamiliar

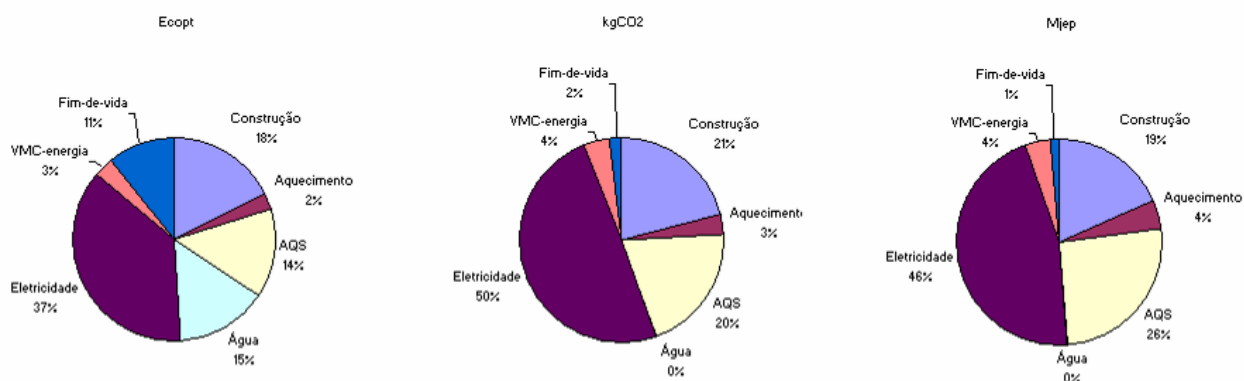


Figura 5.4 - Importância relativa na ACV do edifício multifamiliar

Quadro 5.4 - Avaliação do impacto ambiental do edifício multifamiliar - 50 anos

	tonCO <sub>2</sub>	GJep	Ecopt	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>
Construção	232	3280	1690	380	5368	2,77
Aquecimento	36	751	223	60	1229	0,36
AQS	218	4500	1340	357	7364	2,19
Água	0	0	1370	0	0	2,24
Electricidade	546	8100	3500	894	13256	5,73
Energia ventilador	46	676	292	75	1106	0,48
Fim-de-vida	19	232	1020	31	380	1,67
<b>TOTAL</b>	<b>1097</b>	<b>17539</b>	<b>9435</b>	<b>1793</b>	<b>28658</b>	<b>15,4</b>

Os valores referem-se à área útil.

Dos resultados obtidos o elemento com maior importância ambiental é o consumo de electricidade nas habitações para usos diversos (PC, TV, frigoríficos, iluminação, etc), sendo responsável por cerca de 46% do consumo de energia primária. As AQS são por sua vez responsáveis por cerca de 26% do consumo de energia primária, tendo um impacto ambiental em relação ao indicador único de 14%.

Destes resultados é interessante registar que a certificação energética de edifícios de habitação está a ponderar cerca de 27% das emissões de CO<sub>2</sub> associadas à utilização dos edifícios de habitação, 34% do consumo de energia primária e 20% em relação ao indicador ambiental único.

Regista-se que a construção tem um impacte ambiental de 20% o que é um valor ligeiramente superior aos 15% considerados no método de classificação ambiental BREEAM habitação (Rao, 2000). Para a água também se registam valores próximos 15% vs 10% (BREEAM), enquanto para a energia é determinada uma importância de 57% (energia para Aquecimento, VMC, AQS e electricidade) enquanto no método BREEAM é atribuída uma ponderação de 21%. A generalização da aplicação deste método poderá permitir fundamentar as ponderações de métodos simplificados de análise ambiental de edifícios.

Salienta-se que às 511 ton de RSU enviadas para aterro podem corresponder emissões de 5110 tonCO<sub>2</sub> (adoptando a quantificação 1 kg RSU em aterro = 10 kgCO<sub>2</sub><sup>1</sup>), que corresponde a cerca de 5 vezes as emissões de CO<sub>2</sub> do ciclo de vida do edifício (Quadro 5.4)!

Tendo em conta que o consumo de electricidade e AQS se encontram dependentes essencialmente das actividades dos ocupantes e de equipamentos específicos (a aplicação de colectores solares é obrigatória mas o seu contributo não é abordado neste trabalho) o edifício terá uma contribuição limitada. A análise subsequente pondera apenas a construção fim-de-vida e aquecimento (cerca de 23% indicador único, 29% das emissões de CO<sub>2</sub> e 27% de energia primária), Figura 5.5 e Quadro 5.5. A energia de ventilação mecânica e o impacte do sistema de ventilação já foi avaliado na secção 4.3 acerca do efeito nas infiltrações de ar.

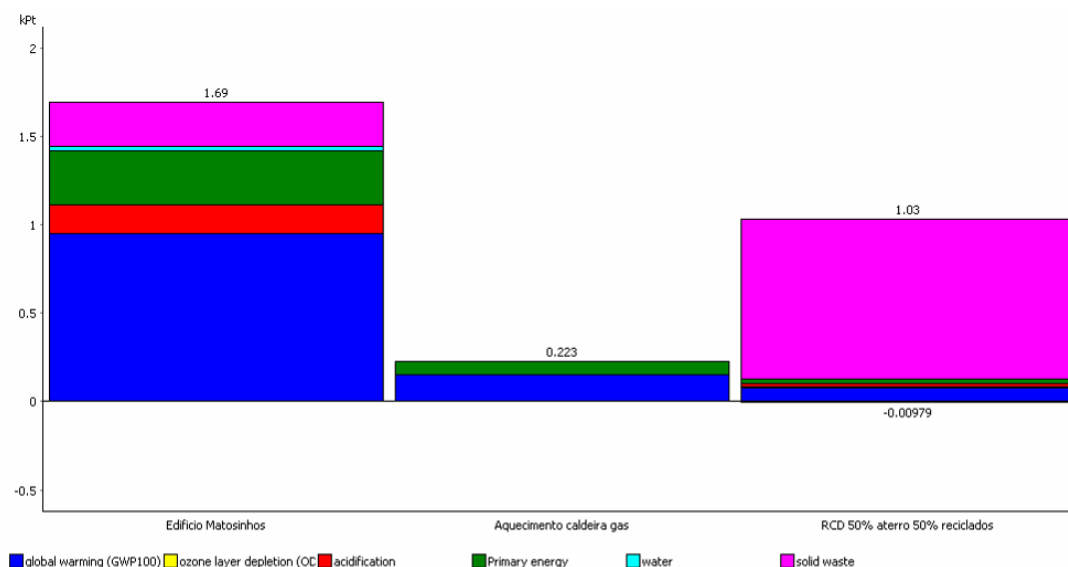


Figura 5.5 - Valores do indicador ambiental para ACV do edifício multifamiliar

Quadro 5.5 - Avaliação do impacte ambiental do edifício multifamiliar

Sistema de ventilação	tonCO <sub>2</sub>	GJep	Ecopt
Construção	232	3280	1690
Energia Aquecimento	36	751	223
Fim-de-vida	19	232	1020
<b>TOTAL</b>	<b>288</b>	<b>4263</b>	<b>2933</b>

<sup>1</sup> Fonte: Ecological Footprint Lifestyle Calculator

No que diz respeito ao edifício, regista-se o enorme impacte ambiental associado à fase de construção (58%) e à fase de fim-de-vida (35%), que se sobrepõem largamente à energia de aquecimento ambiente (7%) determinada com base em 10% dos limites regulamentares (RCCTE, 2006) para 1200 GD. Na fase de construção, os elementos com maior impacte ambiental são os elementos mais pesados, nomeadamente os elementos estruturais, lajes e paredes (75%), Figura 5.6. A caixilharia de alumínio apesar das dimensões limitadas tem um impacte de 9%, que é superior ao das paredes exteriores. A instalação eléctrica tem um peso importante (10%) devido à utilização do cobre. As restantes instalações apreciadas têm um impacte relativamente baixo, sendo os sistemas de aquecimento central (Caldeira gás+Sistema habita radiadores) e de ventilação mecânica os mais relevantes, pois as instalações de distribuição e drenagem de água têm um impacte residual (inferior a 1%).

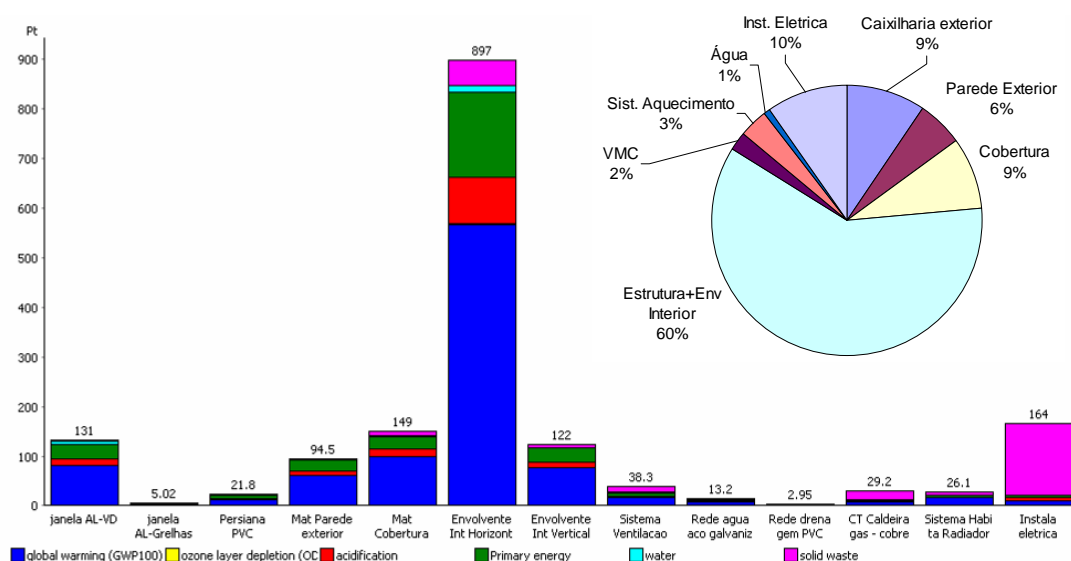


Figura 5.6 - Valores do indicador ambiental único para a fase de construção do edifício multifamiliar

Deste modo, para minimizar impacte ambiental dos edifícios deve-se procurar reutilizar os elementos mais pesados (estrutura e lajes), o que será uma mais valia para os casos de reabilitação de edifícios. Evidencia também a importância ambiental dos vãos envidraçados do edifício, neste caso superior ao das paredes exteriores com 60 mm de XPS.

Efectuando uma análise em que as paredes interiores dos fogos são substituídas por placas de gesso cartonado, regista-se até um acréscimo do impacte ambiental, devido à maior carga ambiental das placas de gesso cartonado.

### 5.1.3- Análise do efeito da estrutura de produção de energia eléctrica

No estudo realizado na secção anterior foi considerada a estrutura de produção de energia eléctrica de Portugal com base nos dados do ano 2000. Caso a energia eléctrica fosse obtida apenas com fontes de energia renovável registava-se uma redução de sensivelmente 20% no indicador ambiental único e nos indicadores kgCO<sub>2</sub> e MJep, Figura 5.7. Neste estudo considera-se que o aquecimento e as AQS são realizadas com base em gás. Caso as AQS e o aquecimento fossem eléctricos existia uma redução de 30% (1000 ecopontos) no indicador ambiental.



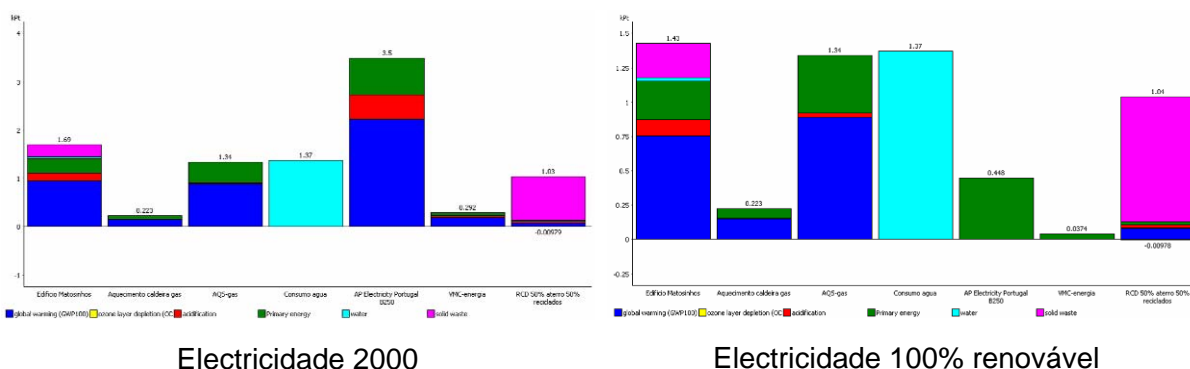


Figura 5.7 - Valores do indicador ambiental único para Ciclo de vida do edifício multifamiliar - estrutura de produção de energia eléctrica

### 5.1.4- Análise do efeito do isolamento térmico elementos opacos

Para apreciar o efeito do incremento do isolamento térmico dos elementos opacos foram criadas soluções do edifício sem isolamento térmico e com espessuras de 20 mm, 40 mm, 60 mm, 100 mm, 200 mm e 300 mm. Foi considerada a aplicação de XPS nas paredes e de lã mineral nas lajes.

Para avaliar o impacto da variação da espessura do isolamento térmico dos elementos opacos este edifício foi simulado com o modelo ESP-r e com as cargas térmicas internas definidas no capítulo 3. Nas simulação foram considerados os materiais indicados no Quadro 5.2, as condições de conforto definidas no capítulo 3 (temperatura interior de 18°C no Inverno e de 27°C no verão) e os caudais de ventilação obtidos de acordo com a proposta apresentada no capítulo 3 (T2 0,81 rph e T3 0,93 rph). Foi considerado que a ventilação é realizada com um sistema VMC. As necessidades térmicas foram determinadas para as localidades de Faro, Lisboa e Bragança. Na ACV considerou-se que as necessidades térmicas eram 50% dos valores obtidos nas simulações, em vez de se considerar 10% conforme preconizado no RCCTE como padrão de utilização da climatização para as temperaturas de 20°C e de 25°C.

Na Figura 5.8 apresenta-se a carga ambiental associada à fase de construção função da alteração da espessura do isolante térmico, para o qual se regista um aumento de sensivelmente 10 ecopontos por cada 20 mm de isolante térmico adicional.

As necessidades térmicas do edifício multifamiliar e as potências de climatização são indicadas na Figura 5.9, na Figura 5.10 e na Figura 5.11. Regista-se que existe uma redução acentuada das necessidades de aquecimento com o incremento da espessura de isolamento térmico, enquanto as necessidades de arrefecimento apresentam uma redução muito ligeira. O impacto do isolamento na potência do sistema de climatização é muito limitado, pois para os oito apartamentos é estimada uma potência máxima de aquecimento de 21 kW e de 10 kW para o arrefecimento, ou seja, neste caso a potência dos sistemas de climatização é condicionada pela potência mínima dos equipamentos disponíveis.

Com base nas necessidades térmicas de aquecimento determinadas, assumindo um padrão de consumo de 50% desse valor e um período de 50 anos é possível estimar o impacto ambiental associado ao incremento da espessura do isolante térmico e às necessidades de aquecimento, Figura 5.12, Figura 5.13 e Figura 5.14.

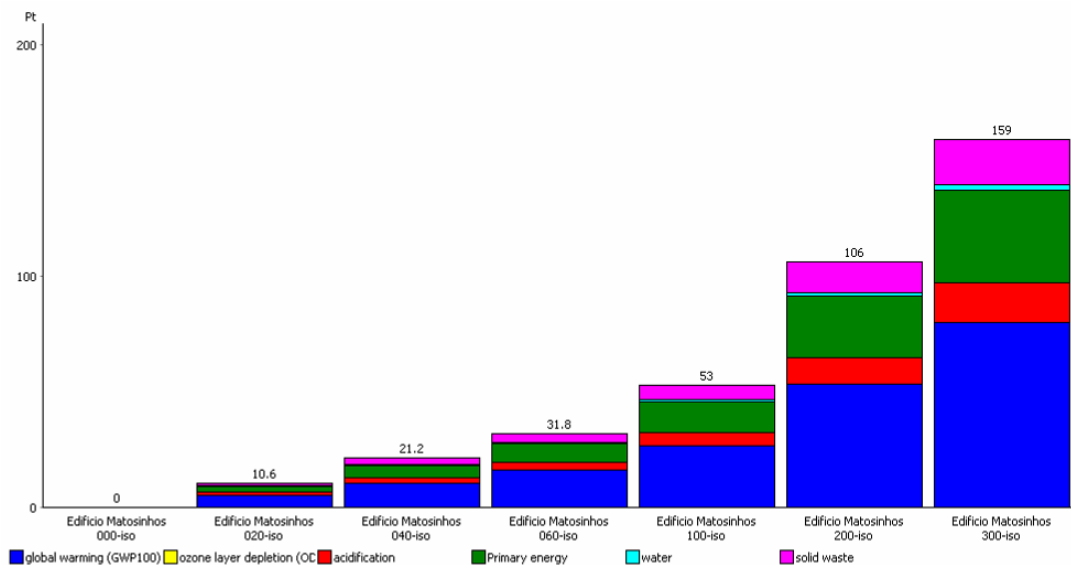


Figura 5.8 - Valores do indicador ambiental único para a fase de construção do edifício multifamiliar – acréscimo da carga ambiental associada ao isolamento térmico

Dos resultados obtidos é evidenciado que existe um ponto óptimo a partir do qual o impacto ambiental associado ao incremento da espessura de isolante térmico se sobrepõe à redução prevista da energia para aquecimento. Esse ponto óptimo varia com o clima, podendo neste caso referir-se uma espessura de 40 mm ( $U=0,57 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ) em Faro e 100 mm ( $U=0,31 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ) em Lisboa e Bragança. Este ponto óptimo para o indicador ambiental único, também corresponde à minimização da energia primária e das emissões de  $\text{CO}_2$ , como se ilustra na Figura 5.15.

Este resultado é extremamente relevante pois demonstra que o aumento “ilimitado” da espessura de isolante térmico não é razoável do ponto de vista ambiental, para além das dificuldades associadas à construção e aos custos.

Tendo em conta que a carga ambiental associada ao isolante térmico ocorre no momento da construção, corresponde a uma carga ambiental “actual e real”, enquanto as cargas ambientais associadas à climatização são estimativas e ocorrem ao longo da vida do edifício (50 anos), período durante o qual é expectável uma redução da carga ambiental relacionada com o consumo de energia devido, por exemplo, à evolução das estruturas e tecnologias de produção de energia eléctrica.

Estes resultados também evidenciam que a optimização do isolamento térmico em Portugal conduz a valores mais razoáveis do que os indicados na para o UK, em que o ponto de equilíbrio entre a energia incorporada e as necessidades de aquecimento ao fim de 5 anos já conduziam a espessuras de 200 mm!

Salienta-se que neste caso de estudo a optimização da espessura de isolante térmico corresponde a alterar até cerca de 440 ecopontos a carga ambiental do edifício, que é de sensivelmente 2930 ecopontos; ou seja, a optimização do isolante térmico pode alterar a carga ambiental do edifício até sensivelmente 15%.

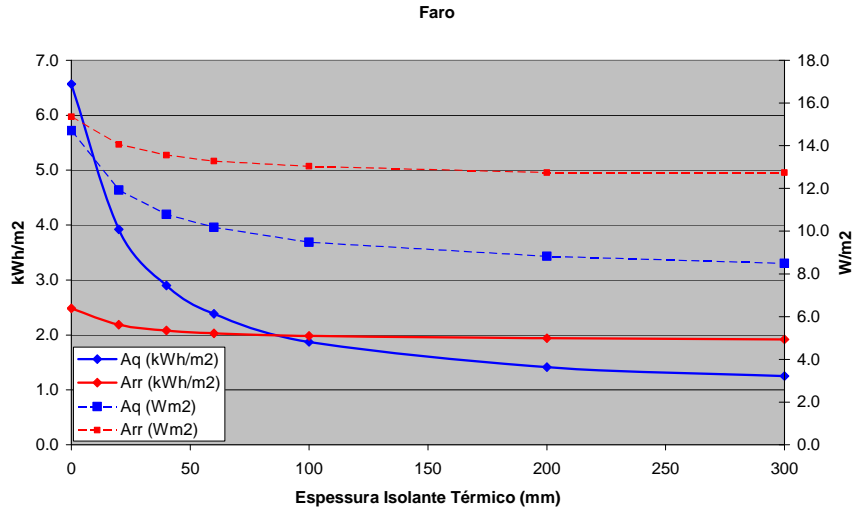


Figura 5.9 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Faro

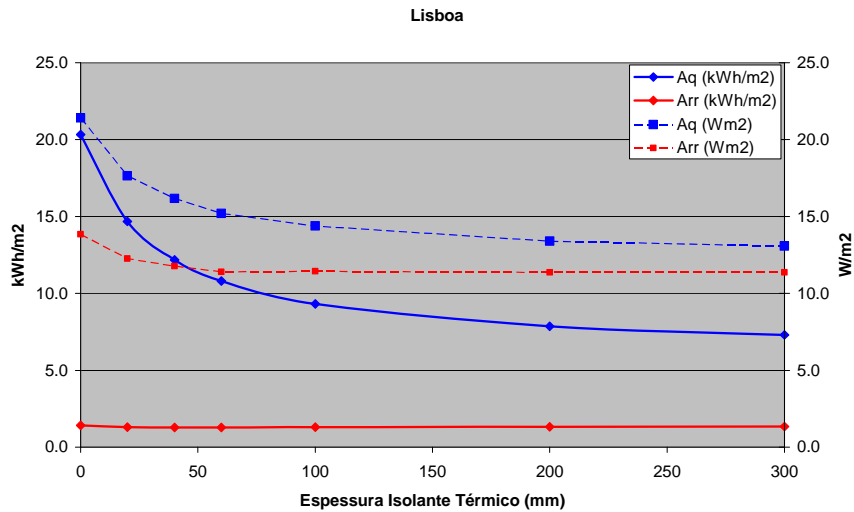


Figura 5.10 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Lisboa

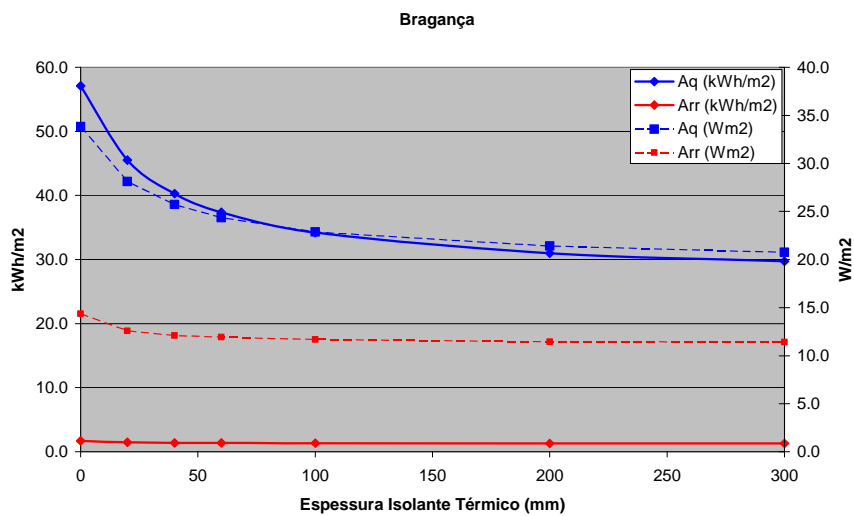


Figura 5.11 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Bragança

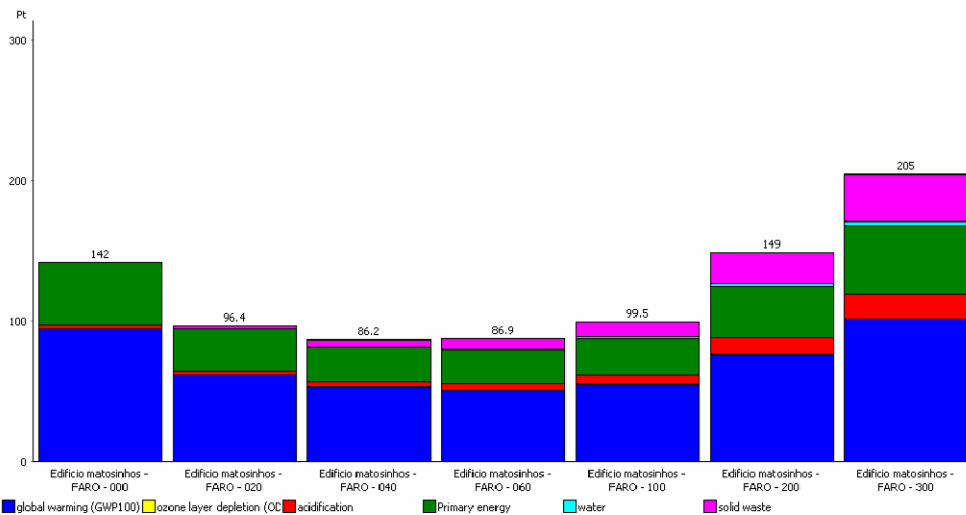


Figura 5.12 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício multifamiliar - Faro

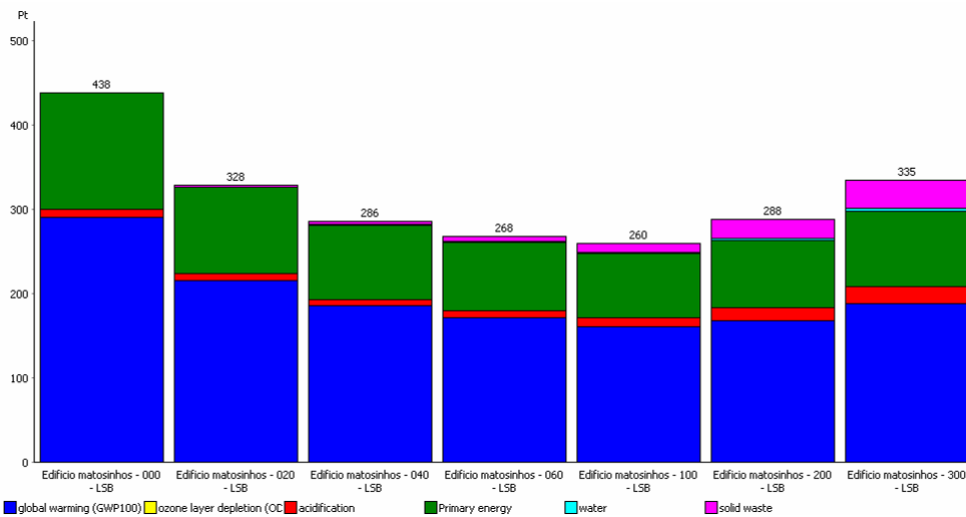


Figura 5.13 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício multifamiliar - Lisboa

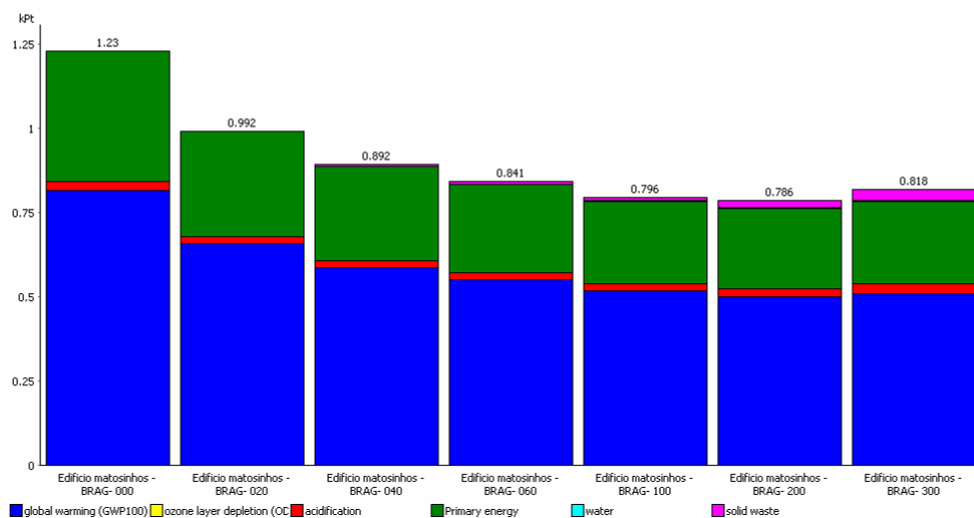


Figura 5.14 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício multifamiliar - Bragança

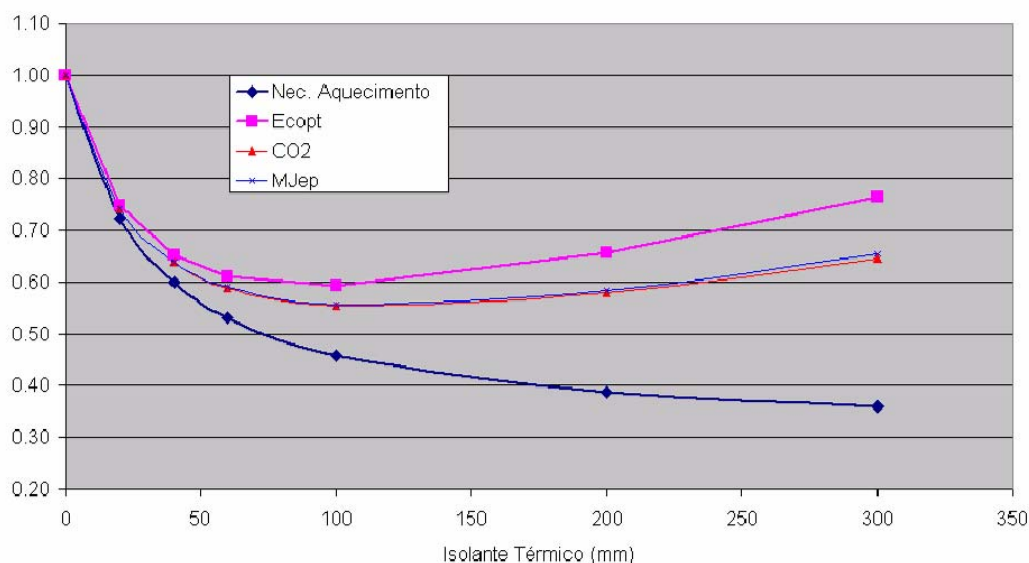


Figura 5.15 - Variação relativa face a configuração sem isolante térmico - espessura do isolante térmico - Lisboa

### 5.1.5 - Análise do efeito do isolamento térmico dos envidraçados

Para analisar o impacto ambiental associado a alteração do envidraçado e do tipo de caixilho o edifício foi estudado com os tipos de caixilhos (vidro e perfis) indicados no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 - Tipos de caixilhos estudados no edifício multifamiliar

Perfis	Vidro	$U_w$ (W/m <sup>2</sup> /K)	$g_{\text{vidro}}$	$g_{\text{vid+prot}}$
Alumínio	Vidro simples	6,2	0,82	0,29
Alumínio	Vidro duplo	3,8	0,72	0,06
Alumínio	Vidro duplo baixo emissivo	3,0	0,72	0,06
Madeira	Vidro simples	4,7	0,82	0,29
Madeira	Vidro duplo	2,6	0,72	0,06
Madeira	Vidro duplo baixo emissivo	1,8	0,72	0,06

A carga ambiental associada à fase de construção está indicada na Figura 5.16, e na Figura 5.17 apresenta-se a carga ambiental associada à alteração do tipo de caixilharia.

As necessidades térmicas do edifício multifamiliar e as potências de climatização são indicadas na Figura 5.18, na Figura 5.19 e na Figura 5.20. Regista-se que existe uma redução das necessidades térmicas (aquecimento e arrefecimento) com o aumento do isolamento térmico do vidro, enquanto a alteração do perfil é mais importante para a redução das necessidades de aquecimento. O impacto do isolamento do vão na potência do sistema de climatização é também limitado, pois para os oito apartamento é estimada uma potência máxima de aquecimento de 16 kW e de 10 kW para o arrefecimento, ou seja neste caso a potência dos sistemas de climatização é condicionada pela potência mínima dos equipamentos disponíveis.

Com base nas necessidades térmicas de aquecimento determinadas, assumindo um padrão de consumo de 50% desse valor e um período de 50 anos é possível estimar o impacto

ambiental associado aos diferentes tipos de vãos exteriores e às necessidades de aquecimento, Figura 5.21, Figura 5.22 e Figura 5.23.

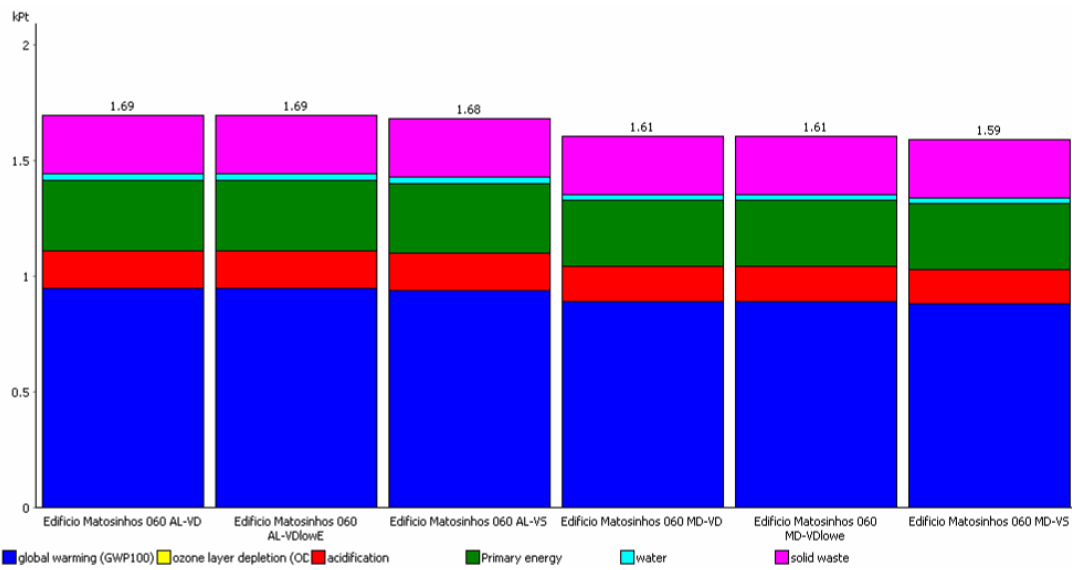


Figura 5.16 - Valores do indicador ambiental único para a fase de construção do edifício multifamiliar - tipo de envidraçado exterior

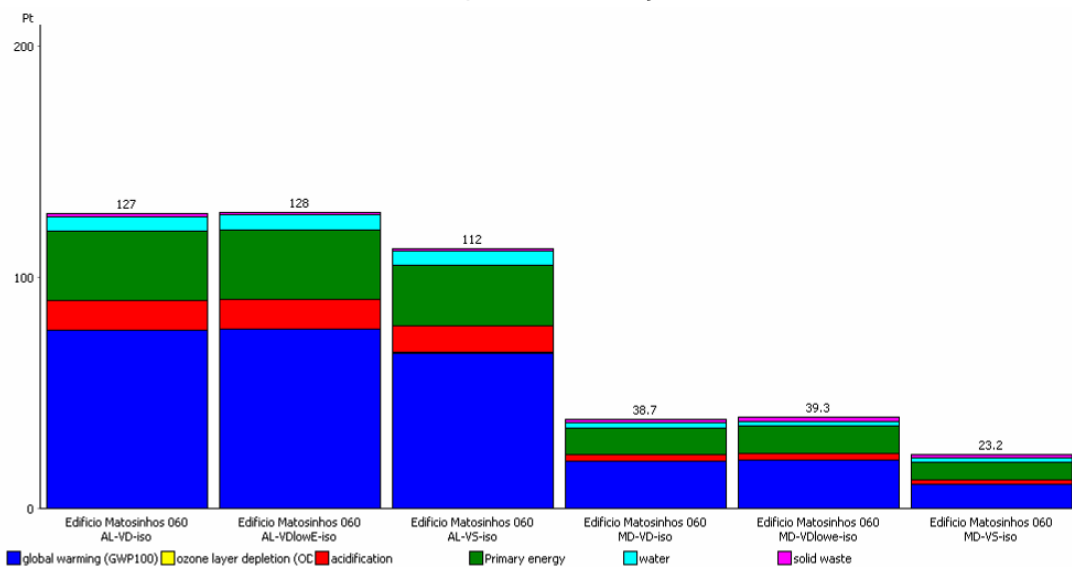


Figura 5.17 -Valores do indicador ambiental único para a fase de construção do edifício multifamiliar - carga ambiental associada aos vãos envidraçados

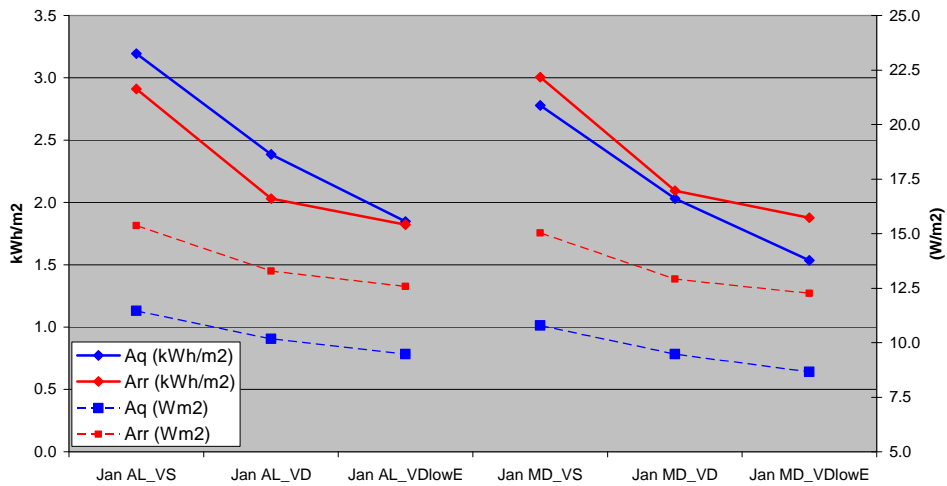


Figura 5.18 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Faro

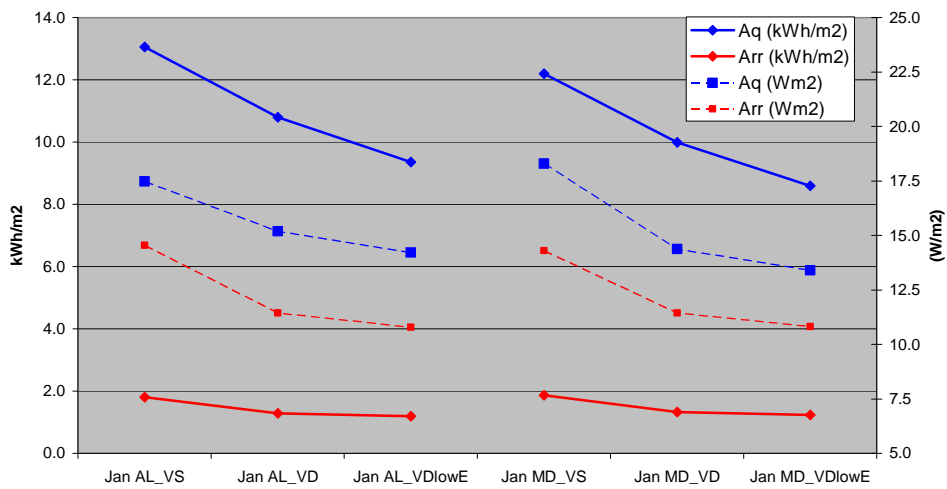


Figura 5.19 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Lisboa

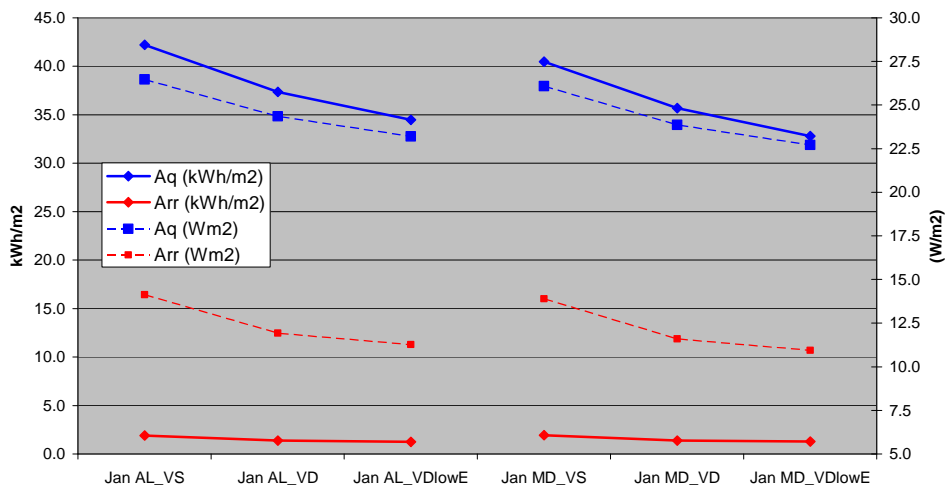


Figura 5.20 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício multifamiliar - Bragança

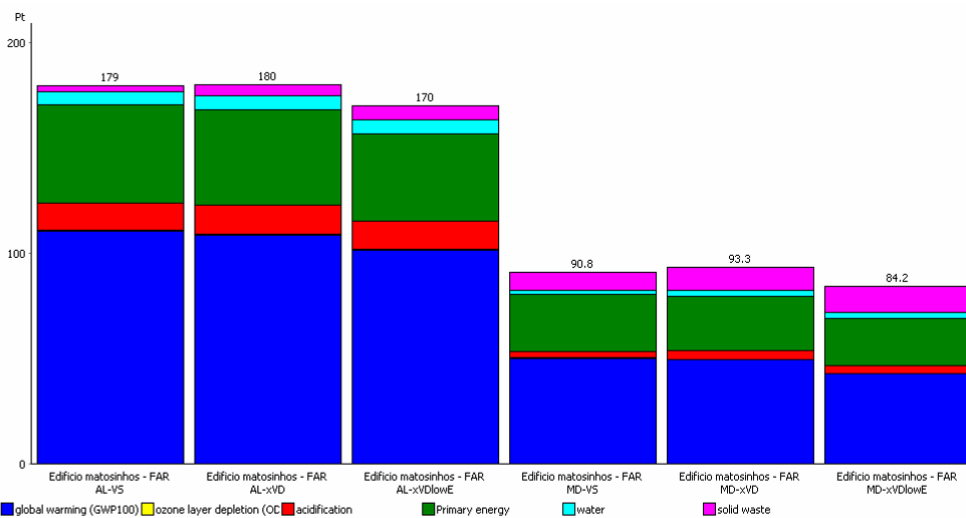


Figura 5.21 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício multifamiliar - Faro

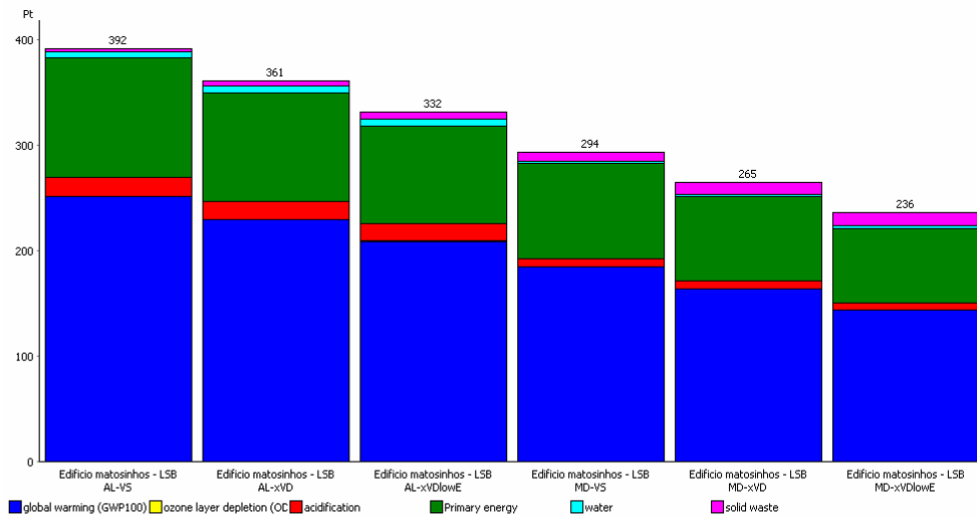


Figura 5.22 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício multifamiliar - Lisboa

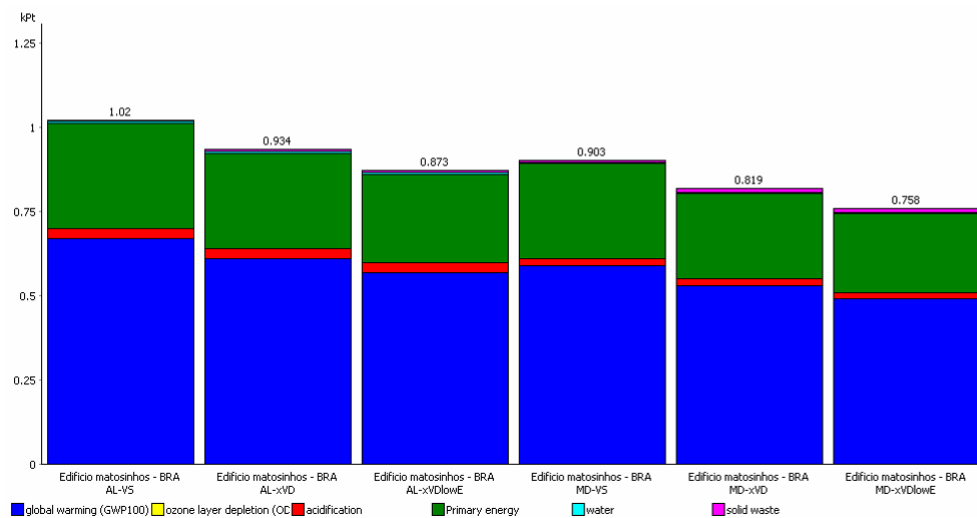


Figura 5.23 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício multifamiliar - Bragança



Como na substituição dos perfis de alumínio por madeira se conjuga um maior isolamento térmico e um menor impacte ambiental associado aos materiais, os perfis de madeira apresentam sempre menor impacte que os perfis de alumínio (para o mesmo tipo de vidro).

Em relação aos diferentes tipos de vidro, regista-se que a adopção de vidros duplos baixo emissivos ( $U_g=1,5 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ) é sempre vantajosa em relação ao vidro simples e ao vidro duplo. A opção vidro simples vs vidro duplo pende para o vidro duplo, contudo em zonas amenas a carga ambiental dos vidro duplos poderá não ser compensada pelas economias de energia que proporciona (Figura 5.21). A análise efectuada para o indicador ambiental único (ecopontos) é válida também para a energia primária e emissões de  $\text{CO}_2$  Figura 5.24, Figura 5.25 e Figura 5.26.

Estes resultados mostram que apesar da solução de vidros duplos baixo emissivos poder não ser uma solução viável economicamente para o clima Português, poderá justificar-se se for tido em conta a ACV, bem como deve ser ponderada a utilização de caixilharia de madeira.

Salienta-se que neste caso de estudo a optimização do isolamento do envidraçado corresponde a alterar em cerca de 100 a 260 ecopontos a carga ambiental do edifício, que é de sensivelmente 2930 ecopontos; ou seja, a optimização do envidraçado pode alterar a carga ambiental do edifício até sensivelmente 10%.

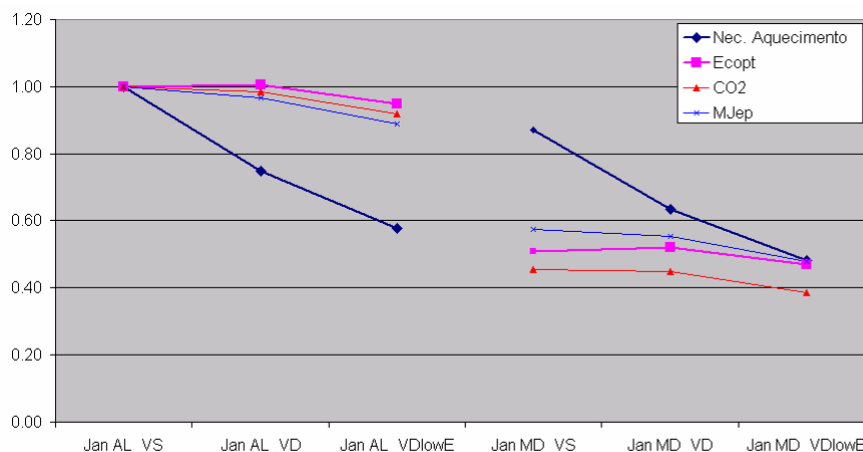


Figura 5.24 - Variação relativa face a janela de alumínio e vidro simples - Faro



Figura 5.25 - Variação relativa face a janela de alumínio e vidro simples - Lisboa

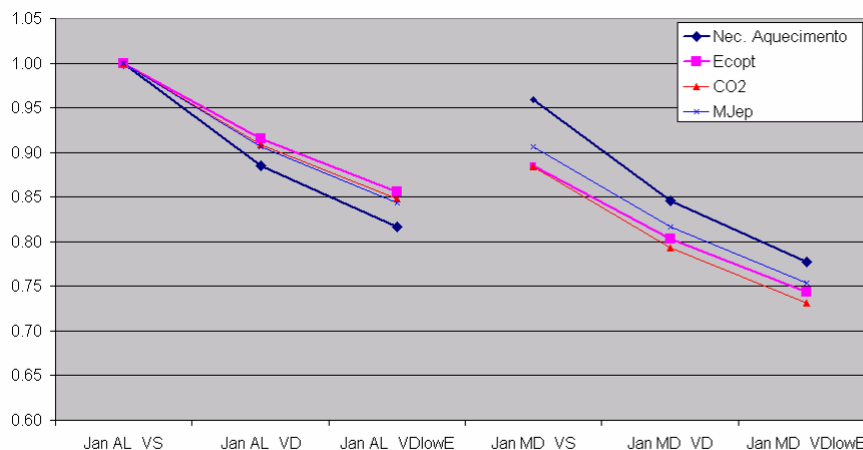


Figura 5.26 - Variação relativa face a janela de alumínio e vidro simples– Bragança

### 5.1.6 - Análise do efeito da temperatura interior de conforto

Conforme foi referido no capítulo 3 em edifícios não dotados de arrefecimento é admissível adoptar as condições de conforto adaptativo de 18°C e 27°C, assegurando um número de pessoas insatisfeitas em média inferior a 20%. Nesta secção avalia-se a consequência de se adoptar as condições de conforto regulamentares (RCCTE e RSECE, 2006) de 20°C e 25°C e as condições nominais de conforto aplicáveis a edifícios com sistemas de climatização (22°C e 24,5°C), conforme também foi referido no capítulo 3.

Na análise das implicações das condições de conforto foi adoptada a solução construtiva com 60 mm de isolante térmico, caixilharia de alumínio com vidro duplo incolor. A estimativa das necessidades térmicas é apresentada na Figura 5.27.

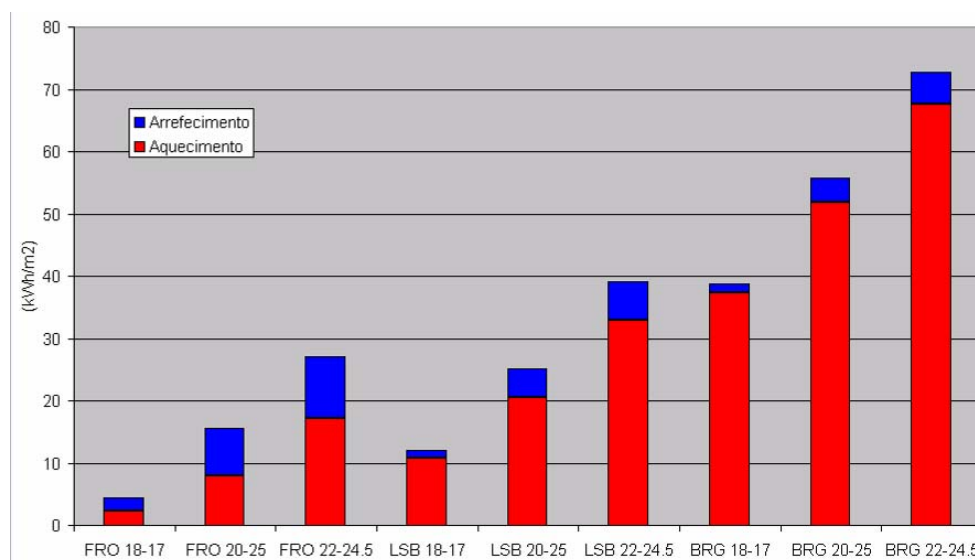


Figura 5.27 - Necessidades térmicas do edifícios de habitação multifamiliar função da temperatura interior de conforto

Na ACV do edifício considera-se o caso da existência apenas de aquecimento com caldeira e um segundo caso em que se considera o aquecimento e o arrefecimento realizado com uma bomba de calor com um COP médio de 3. Salienta-se que no caso do edifício de habitação multifamiliar esta alteração agrava o impacto ambiental em 240 ecopontos, conforme determinado na secção 4.1.6.7.2. Com base nas necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento determinadas, assumindo um padrão de consumo de 50% desse valor e um período de 50 anos é possível estimar o impacto ambiental associado à alteração das condições interiores de conforto (Figura 5.28, Figura 5.29 e Figura 5.30).

Com estes resultados constata-se que a alteração das condições de conforto de 18-27°C para 20-25°C aumentam o impacto ambiental do edifício em 120 a 340 ecopontos, enquanto a alteração para a temperatura de 22-24,5°C aumenta esse impacto entre 320 a 670 ecopontos. Deste modo, para minimizar o impacto ambiental dos edifícios, continuando a salvaguardar as condições de conforto, considera-se que devem ser aplicados termóstatos que limitem a temperatura pelo menos a 20°C na estação de aquecimento e a 25°C na estação de arrefecimento, devendo procurar-se que o funcionamento seja regulado para 18° C e 27°C.

Para as condições de 18-27°C a maior carga ambiental da climatização com bomba de calor face à caldeira advém essencialmente da maior carga ambiental desse sistema, pois o peso da energia de arrefecimento é relativamente limitado e a carga ambiental do kWh térmico associada à climatização dos dois sistemas é relativamente próxima.

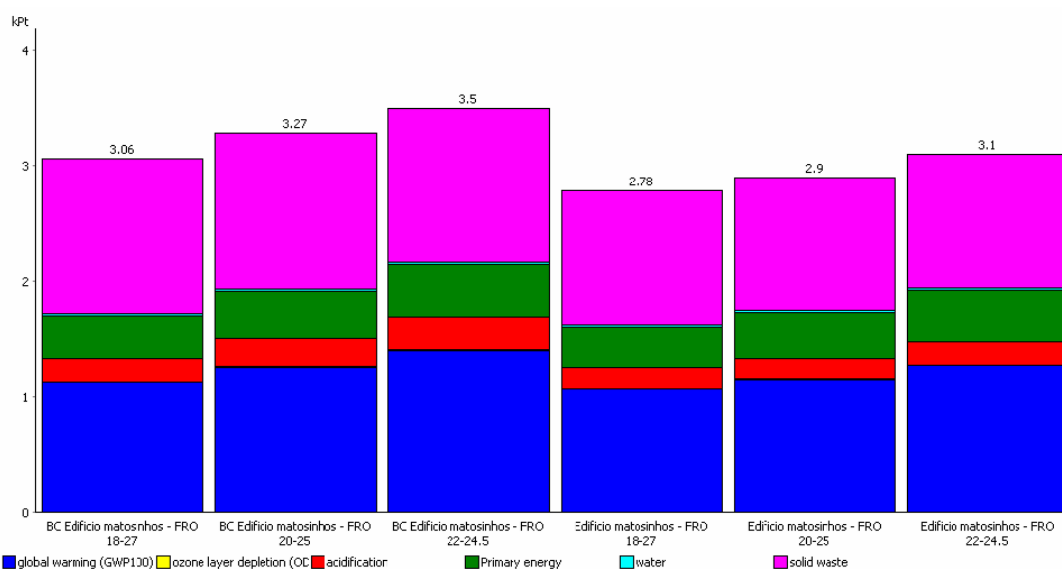


Figura 5.28 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício multifamiliar - Faro

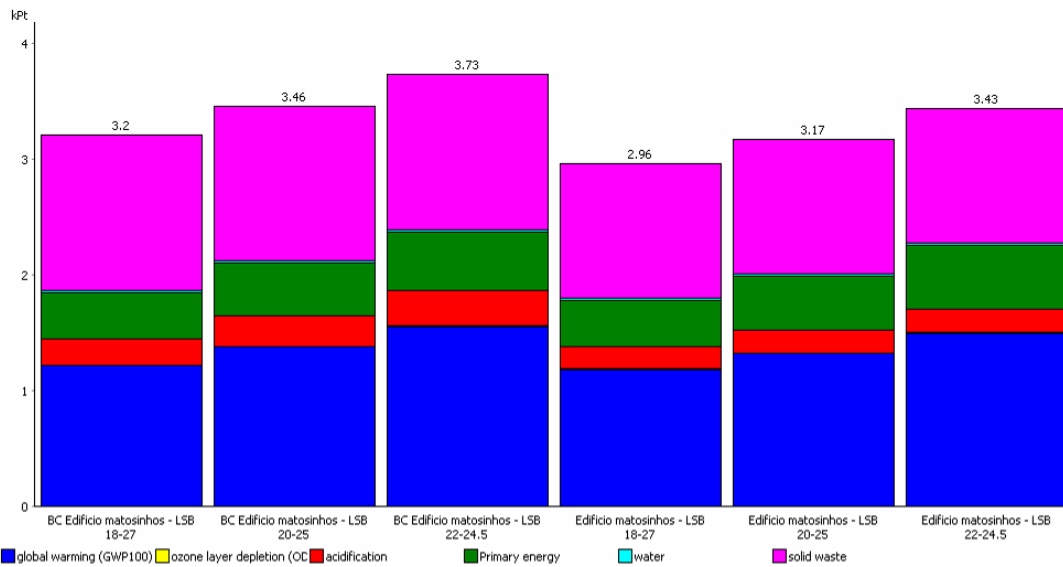


Figura 5.29 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício multifamiliar - Lisboa

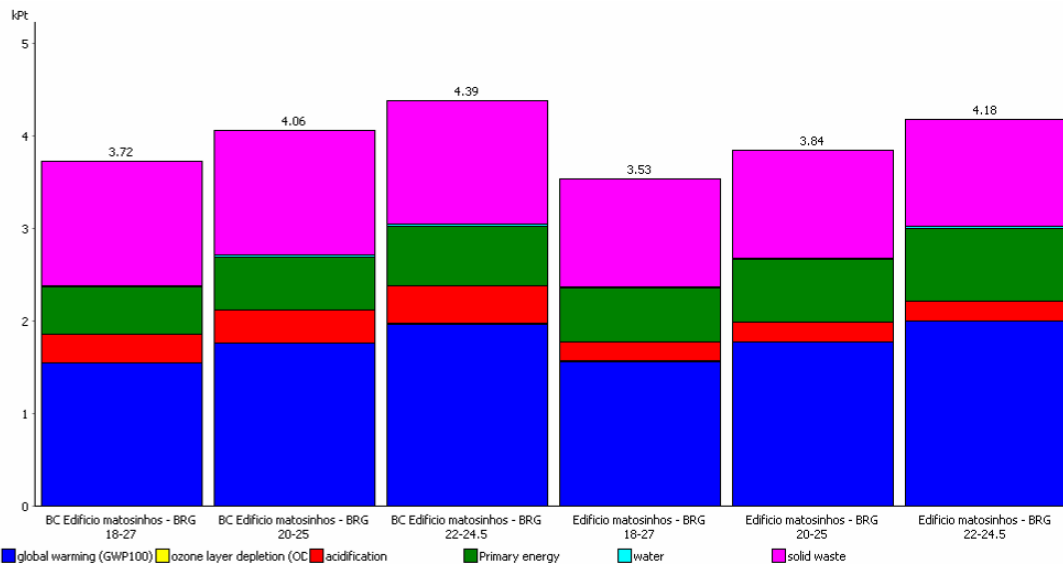


Figura 5.30 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício multifamiliar – Bragança

### 5.1.7- Efeito da reciclagem e reutilização

Para avaliar o efeito do tratamento da fase de fim-de-vida do edifício foi efectuada a ACV do edifício multifamiliar para três cenários:

- Caso base em que se considera o tratamento de resíduos indicado na Figura 4.51 (edifício 50% aterro), em que se assume uma taxa de reciclagem de sensivelmente 80% para os materiais metálicos e sensivelmente 50% para os materiais inertes e o envio para aterro dos restantes materiais.
- Envio para aterro de 100% dos resíduos da construção e demolição (edifício 100% aterro) que corresponde à pior solução em termos ambientais
- Por fim foi analisado um caso em que se considera que 50% das paredes, lajes e elementos estruturais no fim-de-vida são reutilizados pelo facto de ter sido previsto em

projecto a sua desmontagem. Em relação aos restantes 50% dos resíduos considera-se que estes têm o tratamento definido para o caso base.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.31 e no Quadro 5.7, onde se regista que o fim-de-vida do edifício se pode traduzir numa redução do impacte ambiental de sensivelmente 1654 ecopontos entre o cenário mais desfavorável e um cenário mais favorável. Face ao cenário considerado neste estudo se for prevista a reutilização de elementos da construção é possível reduzir o impacte ambiental do edifício em sensivelmente 600 ecopontos e reduzir a quantidade de resíduos em sensivelmente 130 ton.

Salienta-se que esta redução do impacte ambiental (600 ecopontos) é preponderante face à redução associada à optimização do isolamento térmico (120 a 440 ecopt) e dos envidraçados (100 a 260 ecopt)

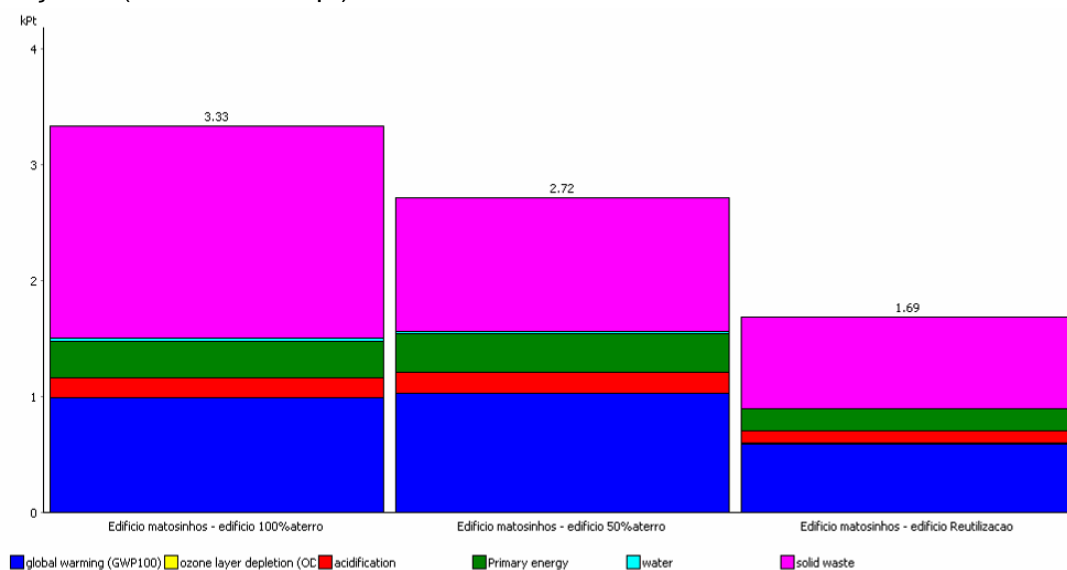


Figura 5.31 - Influência da fase de fim-de-vida na ACV no edifício multifamiliar

Quadro 5.7 - Avaliação do impacte ambiental do edifício multifamiliar

Tratamento dos resíduos	kgCO <sub>2</sub>	MJep	Resíduos (ton)	Ecopt
100% para aterro	2,79E5	4,07E6	630	3560
Caso base (50% aterro, 50% reciclados)	2,88E5	4,26E5	398	2940
Reutilização de 50% dos materiais	5,10E5	9,51E5	271	1910

### 5.1.8- Síntese

De forma a avaliar a relevância dos recursos consumidos nos edifícios, foi efectuada a ACV de um edifício de habitação multifamiliar. Dos resultados obtidos salientam-se os seguintes resultados:

- Ao longo da vida útil de 50 anos, um edifício de habitação multifamiliar pode ser responsável pela emissão de sensivelmente 1800 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 29 GJep/m<sup>2</sup> e 15,4 ecopt/m<sup>2</sup>.
- Das utilizações consideradas os impactes ambientais preponderantes no edifício são o consumo de energia eléctrica para electrodomésticos e iluminação (48%).
- No consumo de energia primária a construção e a fase de fim-de-vida apresentam um impacte de sensivelmente 20%, o aquecimento 4%, a energia para funcionamento do VMC 4%, as AQS 24% e a electricidade 43%.

- Das componentes directamente relacionadas com o edifício é possível condicionar a construção, o fim-de-vida e a climatização (aquecimento), ou seja, sensivelmente 23% do impacte ambiental do edifício, pois face aos critérios de conforto adaptativo e à prática corrente em Portugal é possível dispensar os sistemas de arrefecimento.

Caso a produção de energia eléctrica fosse obtida a 100% com fontes renováveis registava-se uma redução de sensivelmente 20% a 30% do impacte ambiental do edifício. Neste caso, considera-se o aquecimento realizado com caldeira a gás, pelo que se fosse considerado aquecimento com bomba de calor essa redução seria de 40%.

Dos aspectos ligados ao edifício/construção (fase de construção, climatização e fase de fim-de-vida) foi possível evidenciar que:

- A fase de construção representa cerca de 58% do impacte ambiental, a fase de fim-de-vida 35%, sobreponde-se largamente à energia de aquecimento ambiente (7%) determinada com base nos limites regulamentares.
- Na fase de construção, os elementos com maior impacte ambiental são os elementos mais pesados, nomeadamente as lajes e os elementos estruturais (“envolvente Int Hor” e “Mat Cobertura”), paredes (“envolvente Int ver” e “Mat Parede Exterior”), bem como a caixilharia de alumínio.
- Na construção a instalação eléctrica tem um peso importante, devido à utilização do cobre. As restantes instalações apreciadas têm um impacte relativamente baixo (inferior a 6%), sendo os sistemas de aquecimento central (Caldeira gás e radiadores) e de ventilação mecânica os mais relevantes, pois as instalações de distribuição e drenagem de água têm um impacte residual (inferior a 1%).
- Estes resultados evidenciam que para minimizar impacte ambiental dos edifícios se devem procurar reutilizar os elementos mais pesados (estrutura e lajes)
- Apesar da dimensão contidas das janelas de alumínio com vidro duplo, estas apresentam um impacte ambiental superior ao das paredes exteriores com 60 mm de XPS.
- Apreciando diferentes tratamentos de RCD regista-se que o fim-de-vida do edifício se pode traduzir numa redução do impacte ambiental do edifício em sensivelmente 1650 ecopontos entre o cenário mais desfavorável (todos os resíduos enviados para aterro) e um cenário favorável. Face ao cenário considerado neste estudo se for prevista a reutilização de elementos da construção é possível reduzir o impacte ambiental do edifício em sensivelmente 600 ecopontos (em 2930) e reduzir a quantidade de resíduos em sensivelmente 130 ton.
- Do estudo da influência da espessura do isolamento térmico é evidenciado que existe um ponto óptimo a partir do qual o impacte ambiental associado ao incremento da espessura de isolante térmico se sobrepõe à redução prevista da energia para aquecimento. Esse ponto óptimo varia com o clima, podendo neste caso referir-se uma espessura de 40 mm ( $U=0,57 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ) em Faro e 100 mm ( $U_w=0,31 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ) em Lisboa e Bragança. Este ponto óptimo para o indicador ambiental único, é próximo do mínimo da energia primária e das emissões de  $\text{CO}_2$ .
- O resultado anterior demonstra que o aumento “ilimitado” da espessura de isolante térmico não é razoável do ponto de vista ambiental, para além das dificuldades associadas à construção e aos custos de construção.

- Tendo em conta que a carga ambiental associada ao isolante térmico ocorre no momento da construção, corresponde a uma carga ambiental “real e actual”, pelo que se considera razoável prever espessuras ligeiramente inferiores às anteriores, pois as cargas ambientais associadas à climatização são estimativas e ocorrem ao longo da vida do edifício (50 anos), período durante o qual é expectável uma redução da carga ambiental relacionada com o consumo de energia devido à evolução das estruturas e tecnologias de produção de energia eléctrica.
- Neste caso de estudo a optimização da espessura de isolante térmico corresponde a alterar em cerca de 120 a 440 ecopontos a carga ambiental do edifício, que é de sensivelmente 2930 ecopontos; ou seja, a optimização do isolante térmico pode alterar a carga ambiental do edifício até sensivelmente 15%.
- Da análise do efeito da temperatura interior de conforto considerada regista-se que a restrição dessas temperaturas a 20-25°C conduz a um acréscimo do impacte ambiental do edifício de 120 a 340 ecopontos (consoante o clima) e adoptar as condições de conforto nominais de (22-24,5°C) conduz a um agravamento de 320 a 670 ecopontos.
- O efeito de diferentes sistemas de climatização foi apreciado no capítulo 4, pelo que nesta secção não são apresentados esses resultados.

Na Figura 5.32 apresenta-se a estimativa do período de retorno assumindo um padrão de consumo de 50% das necessidades térmicas, para um custo da energia térmica de 0,09 €/kWh para resistência eléctrica e 0,03 €/kWh para a caldeira a gás e um custo adicional de 0,05€ por mm de espessura e por m<sup>2</sup> de isolante térmico. Dessa figura, para um período de retorno de 8 anos, é estimada uma espessura óptima em Lisboa de 30 mm (supondo o aquecimento menos eficiente de resistência eléctrica) e de 100 mm para Bragança. Se fosse considerado um equipamento mais eficiente (caldeira ou bomba de calor) as espessuras viáveis economicamente seriam inferiores a 20 mm em Lisboa e Faro e de 30 mm em Bragança, pelo que a ACV é a ferramenta que permite evidenciar balizar entre as espessuras de isolamento.

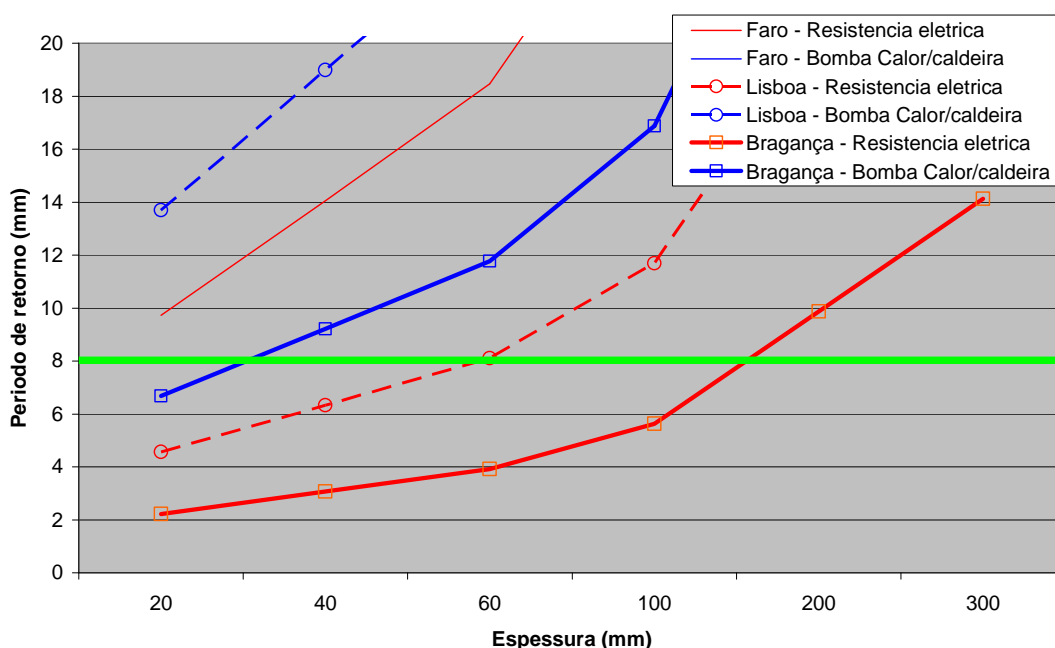


Figura 5.32 - Estimativa do período de retorno função da espessura do isolante térmico

A análise dos caixilhos de alumínio e madeira e várias composições de vidro evidencia que a solução mais eficiente é a da utilização de caixilharia de madeira e vidro duplo baixo emissivo. Contudo, para climas amenos é interessante registar que a opção por vidro duplo pode ser pior que a utilização de vidro simples (caso de Faro). Como no caso dos isolantes térmicos a ACV pode permitir justificar a aplicação de vidros duplos baixo emissivos, que usualmente também não é uma solução viável economicamente para o clima português.

Da análise do tratamento dos resíduos e da optimização de isolamento térmico de paredes e envidraçados para este edifício, salienta-se que:

- a alteração da estrutura de produção eléctrica pode permitir reduzir a carga ambiental em 500 a 1000 ecopontos (em 9435 ecoponto do edifício).
- a optimização do tratamento dos RCD permite reduzir entre 600 a 1650 ecopontos a carga ambiental do edifício (2930 ecopontos).
- a optimização do isolamento dos envidraçados corresponde a alterar em cerca de 100 a 260 ecopontos a carga ambiental do edifício.
- a optimização do isolamento térmico permite alterar em sensivelmente 120 a 440 ecopontos, a optimização do tipo de sistema de ventilação pode afectar a carga ambiental em 1000 ecopontos.
- a alteração das condições de conforto pode implicar um aumento da carga ambiental de 120 a 670 ecopontos.
- a permeabilidade ao ar pode alterar em 100 ecopontos a carga ambiental.

Pelo que estes resultados evidenciam que a melhoria da eficiência energética e ambiental dos edifícios envolve a optimização da minimização das necessidades energéticas durante a utilização e a construção do edifício, bem como se deve prever na fase de projecto a possibilidade de reutilização de alguns dos elementos mais pesados e com maior carga ambiental.

## **5.2 - AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UM EDIFÍCIO DE HABITAÇÃO UNIFAMILIAR**

### **5.2.1 - Descrição do edifício**

Com o objectivo de avaliar a importância dos diferentes elementos que compõem um edifício unifamiliar nesta secção é efectuada a ACV de uma moradia constituída por 3 quartos e sala, Figura 5.33, Figura 5.34 e Quadro 5.9. Considera-se que a fachada principal deste edifício se encontra exposta a Sul. A envolvente exterior é composta por paredes de alvenaria de tijolo furado. Na envolvente encontra-se instalada caixilharia de alumínio com vidro duplo incolor. Com excepção da janela das instalações sanitárias, em todas as restantes encontra-se aplicada uma persiana exterior enrolável com a respectiva caixa de estore e tampa interior. A cobertura inclinada tem isolamento térmico de lã mineral aplicado na vertente e esteira horizontal em laje aligeirada de blocos cerâmicos.

Na Figura 5.34 encontra-se a planta da moradia estudada, que tem uma área útil de 77 m<sup>2</sup> e um pé direito de 2,7 m, compreendendo um volume interior de 207 m<sup>3</sup>. No Quadro 5.9 apresenta-se um resumo das dimensões do fogo e no Quadro 5.8 um resumo dos materiais de construção.



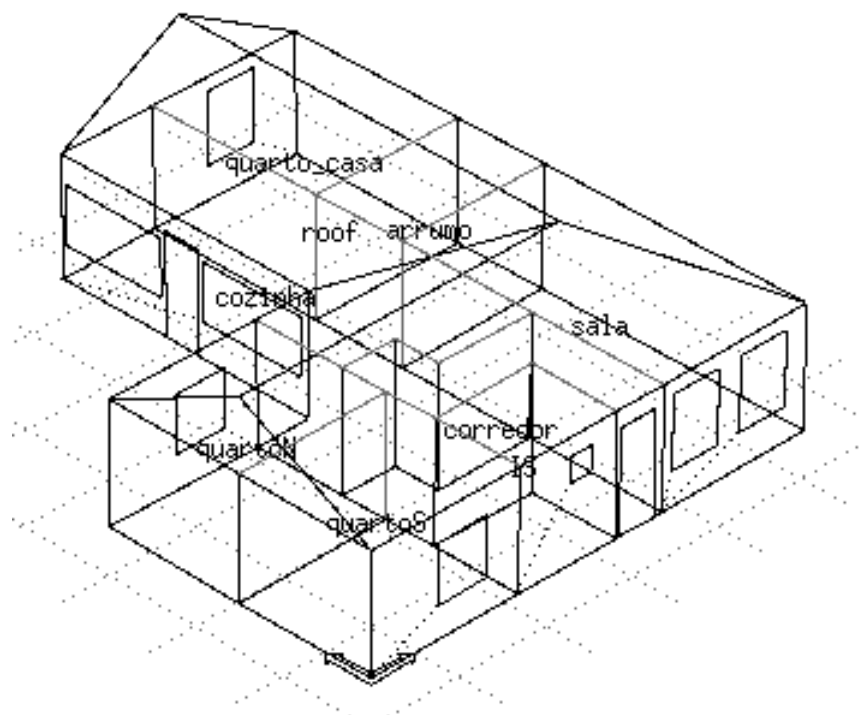


Figura 5.33 - Modelo do edifício unifamiliar

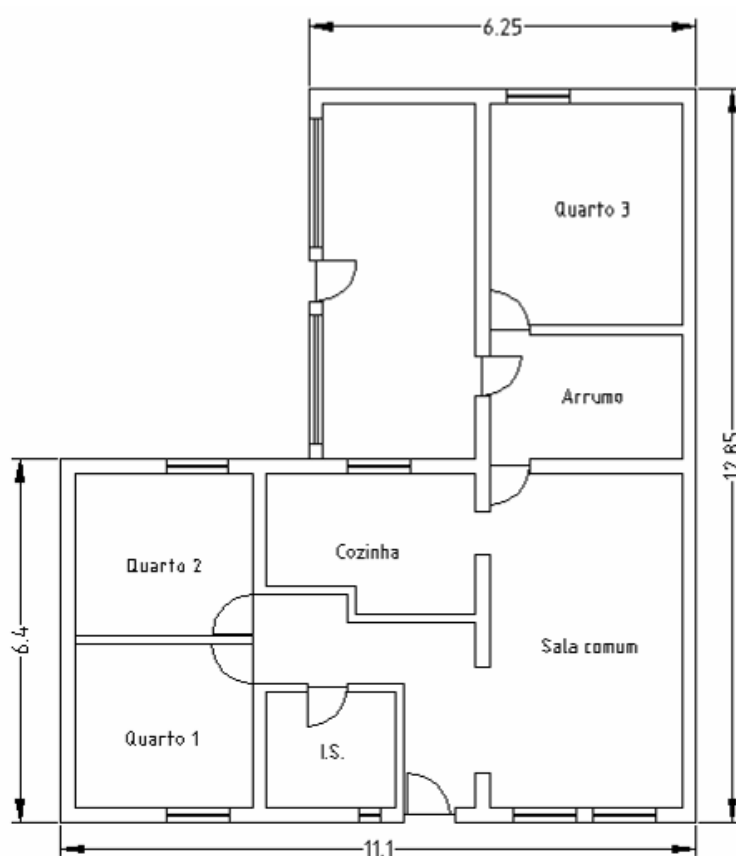


Figura 5.34 - Planta do edifício

Quadro 5.8 - Resumo das dimensões e materiais

Elemento do edifícios	Área (m <sup>2</sup> )
<b>Envolvente exterior</b>	
Parede exterior: parede dupla 11 cm + 60 mm XPS + 15 cm	122
Envidraçado exterior: perfis de alumínio e vidro duplo	12,3
Persianas: persiana com réguas de PVC	12,10
Cobertura inclinada esteira horizontal: laje aligeirada com 60 mm lã mineral	113
Pavimento	113
Portas exterior	3,8
<b>Envolvente e elementos interiores</b>	
Paredes interiores de tijolo de 11 cm	48,6
Paredes interiores de tijolo de 11 cm com azulejos	45,7
Portas de madeira	11,3
Janela de alumínio	1,5
<b>Betão armado</b>	7,8 m <sup>3</sup>
<b>Instalações</b>	
Sistema de ventilação natural	-
Caldeira (1 x 23 kW x (50 anos/20 anos))	57,5 kW
Sistema de radiadores e tubo de aço	11,3 kW
Sistema predial de distribuição de água de aço	51,05 kg
Sistema predial de drenagem de água residual de PVC	25,36 kg
<b>Utilização (50 anos)</b>	
Consumo de água (160 l/dia/p)	11680 m <sup>3</sup>
Consumo de energia térmica AQS (40 l/dia/p)	135845 kWh
Consumo electricidade (2290 kWh/fracção)	114500 kWh
Energia para aquecimento ambiente	37508 kWh
<i>Resíduos sólidos urbanos (1 kg/dia/pessoa)</i>	<i>73 ton</i>

Quadro 5.9 - Resumo das dimensões da moradia ensaiada

Factor de Forma (m <sup>-1</sup> )	Volume interior (m <sup>3</sup> )	Área exterior (m <sup>2</sup> )	Área pav. (m <sup>2</sup> )	Aenvidraçada/ Apav
0,86	283	242	113	11%

Quadro 5.10 - Caudal de ventilação de base (m<sup>3</sup>/h)

Materiais Interiores	Quarto	Quarto	Sala	Quarto	Sala	IS	Base	Base (rph)
	2	3	Apoio	1				
	Entrada de ar			Saída de ar				
Baixa emissão	30	45	70	40	85	20	<b>145</b>	<b>0,50</b>
Não qualificados	65	45	100	60	120	30	<b>210</b>	<b>0,75</b>

Considera-se que neste edifício se encontra instalado um sistema de ventilação natural, com aberturas auto-reguláveis instaladas nos caixilhos. De acordo com o método apresentado no capítulo 3 é previsto o caudal de ventilação de base indicado no Quadro 5.10.

Neste caso de estudo avalia-se o impacte ambiental da configuração base do edifício de forma a apreciar a relevância ambiental de alguns dos elementos do edifício

- Análise do efeito da estrutura de produção de energia eléctrica
- Análise do efeito do isolamento térmico elementos opacos
- Análise do efeito do isolamento térmico dos envidraçados
- Análise do efeito da aplicação de materiais com baixa taxa de emissão de poluentes para o ar interior
- Efeito da reciclagem e reutilização

## 5.2.2 - Avaliação global do edifício

Da informação do Quadro 5.8 e da ACV de materiais e soluções de construção apresentada no capítulo 4 é possível estimar o impacto ambiental do edifício. Nesta análise também se incluíram as necessidades energéticas de aquecimento aplicáveis a este edifício (10% do valor limite regulamentar com base no padrão típico de utilização, RCCTE, 2006), admitindo 1200 GD de aquecimento e que o aquecimento é realizado com caldeira a gás, Figura 5.35, Figura 5.36 e Quadro 5.12. Neste edifício não se considerou a existência de arrefecimento, pois o número de horas de desconforto ( $T > 30^{\circ}\text{C}$ ) é inferior a 75 h, conforme previsto no capítulo 3.

Quadro 5.11 – Número de horas de desconforto (h)

	Faro	Lisboa	Bragança
<b>Ti&gt;30°C</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Ti>27°C	539	51	120
Ti< 18°C	1834	3318	4602
<b>Ti&lt;16°C</b>	<b>706</b>	<b>2384</b>	<b>3814</b>

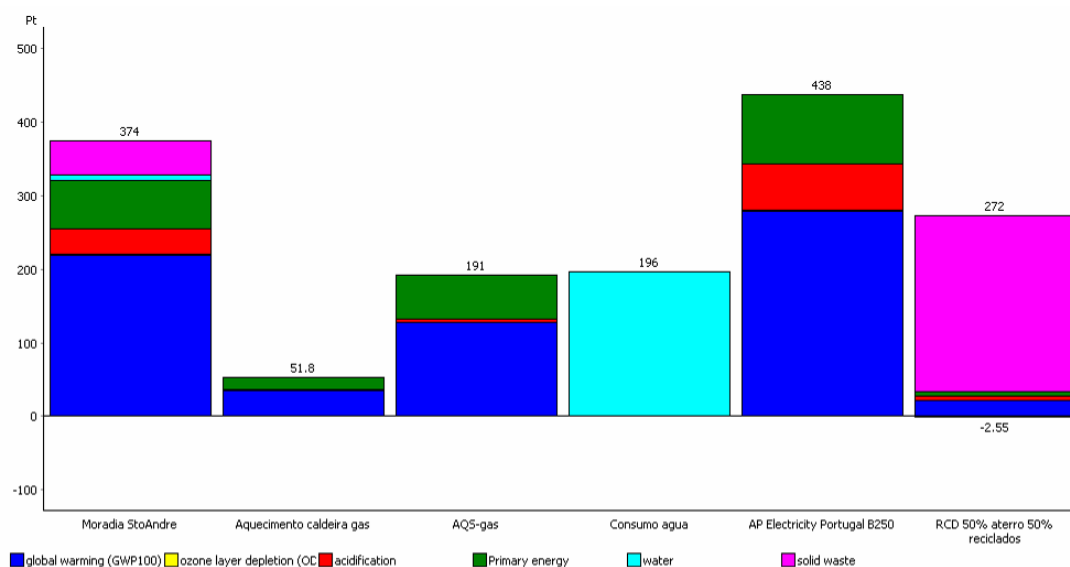


Figura 5.35 - Valores do indicador ambiental para ACV do edifício unifamiliar

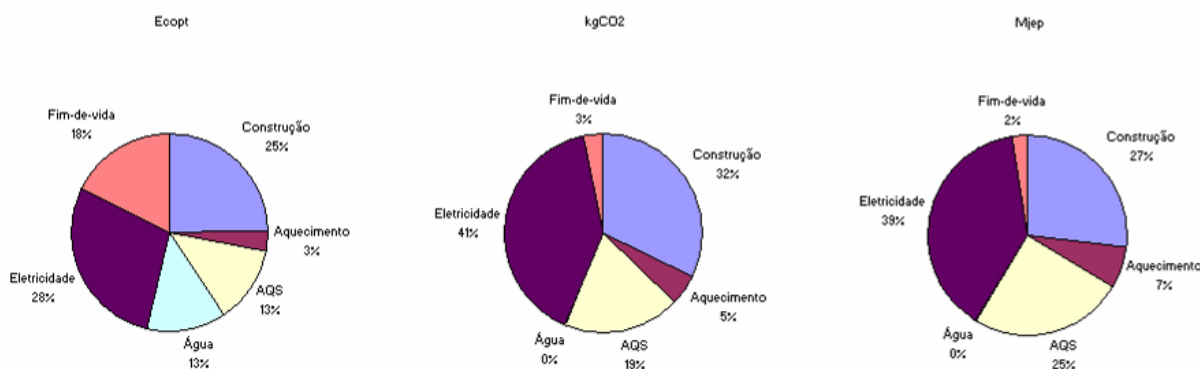


Figura 5.36 - Importância relativa na ACV do edifício unifamiliar

Quadro 5.12 - Avaliação do impacte ambiental do edifício unifamiliar - 50 anos

	tonCO <sub>2</sub>	GJep	Ecopt	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>
Construção	54	694	374	474	6129	3,30
Aquecimento	8	174	52	74	1537	0,46
AQS	31	643	191	276	5679	1,69
Água			196			1,73
Electricidade	68	1010	438	602	8920	3,87
Fim-de-vida	5	63	269	45	555	2,38
TOTAL	167	2584	1520	1471	22820	13,42

Os valores referem-se à área útil.

Dos resultados obtidos o elemento com maior importância ambiental é o consumo de electricidade nas habitações para usos diversos (PC, TV, frigoríficos, iluminação, etc), sendo responsável por cerca de 40% do consumo de energia primária. As AQS são por sua vez responsáveis por cerca de 25% do consumo de energia primária, tendo um impacte ambiental em relação ao indicador único de 13%.

Destes resultados é interessante registar que a certificação energética de edifícios de habitação está a ponderar cerca de 24% das emissões de CO<sub>2</sub> associadas à utilização dos edifícios de habitação, 32% do consumo de energia primária e 16% em relação ao indicador ambiental único.

Dos resultados regista-se que a construção tem um impacte ambiental de 25% o que é superior aos 15% considerados no método de classificação ambiental BREEAM habitação (Rao, 2000). Para o consumo de água também se registam valores próximos 13% vs 10% (BREEAM), enquanto para a energia é determinada uma importância de 45% (energia para Aquecimento, AQS e electricidade) enquanto no método BREEAM é atribuída uma ponderação de 21%.

Tendo em conta que o consumo de electricidade e AQS se encontram dependentes essencialmente das actividades dos ocupantes e o edificio terá uma contribuição limitada (a menos que sejam instalados colectores solares ou unidades de microgeração) a análise subsequente pondera apenas a construção, fim-de-vida e aquecimento (cerca de 28% indicador único, 37% das emissões de CO<sub>2</sub> e 34% da energia primária), Figura 5.37 e Quadro 5.13.

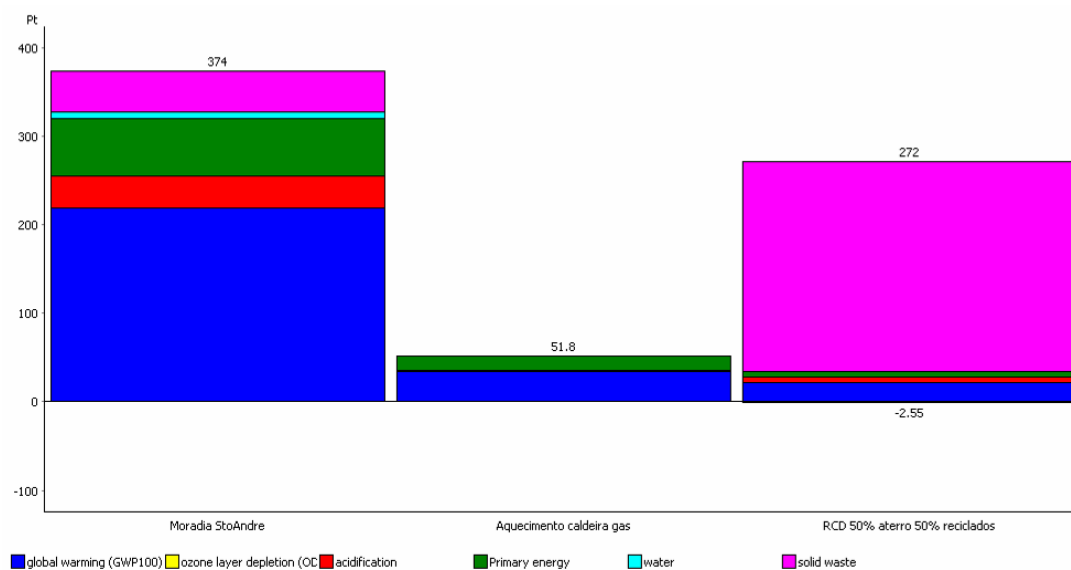


Figura 5.37 - Valores do indicador ambiental para ACV do edifício unifamiliar

Quadro 5.13 - Avaliação do impacto ambiental do edifício unifamiliar

Sistema de ventilação	tonCO <sub>2</sub>	GJep	Ecopt
Construção	54	694	374
Energia Aquecimento	8	174	52
Fim-de-vida	5	63	269
TOTAL	67	931	695

Dos resultados obtidos regista-se o enorme impacto ambiental associado à fase de construção (54%) e à fase de fim-de-vida (39%), sobrepondo-se largamente à energia de aquecimento ambiente (7%) determinada com base nos limites regulamentares (RCCTE, 2006). Na fase de construção, os elementos com maior impacto ambiental são os elementos mais pesados, nomeadamente pavimento, cobertura, paredes e estrutura, Figura 5.38. A instalação eléctrica tem um peso importante (9%) devido à utilização do cobre. As restantes instalações apreciadas têm um impacto relativamente baixo (inferior a 3%), sendo os sistemas de aquecimento central (Caldeira gás+Sistema habita radiadores) os mais relevantes, pois as instalações de distribuição e drenagem de água têm um impacto residual (inferior a 1%).

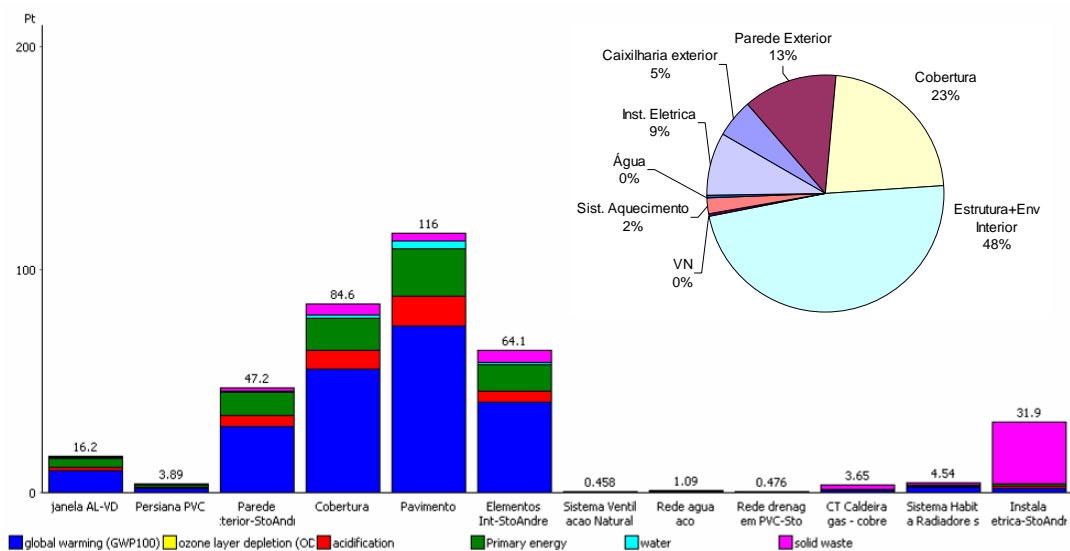


Figura 5.38 - Valores do indicador ambiental único para a fase de construção do edifício unifamiliar

Estes resultados evidenciam que para minimizar o impacto ambiental dos edifícios se devem procurar reutilizar os elementos mais pesados (estrutura e lajes). Evidenciam também a importância ambiental dos vãos envidraçados do edifício.

### 5.2.3- Análise do efeito da estrutura de produção de energia eléctrica

No estudo realizado na secção anterior foi considerada a estrutura de produção de energia eléctrica com base nos dados do ano 2000. Caso a energia eléctrica fosse obtida apenas com fontes de energia renovável registava-se uma redução de sensivelmente 30% no indicador ambiental único, kgCO<sub>2</sub> e MJep. Neste caso a redução deve-se essencialmente à minimização do impacto associado ao consumo de energia eléctrica durante a fase de

utilização e na fase de construção, Figura 5.39. Neste estudo considera-se que o aquecimento e as AQS são realizadas com base em gás. Caso as AQS e o aquecimento fossem eléctricos seria possível reduzir em sensivelmente 600 ecopontos (40%) o impacte ambiental do edifício.

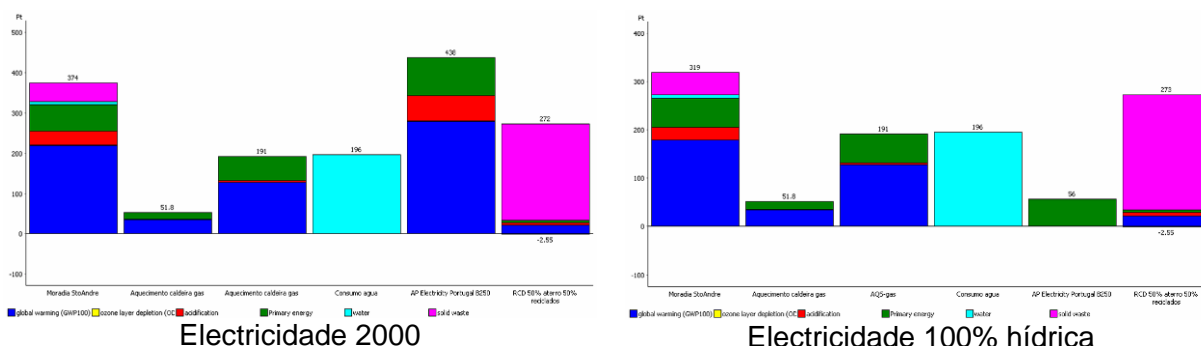


Figura 5.39 - Valores do indicador ambiental único para Ciclo de vida do edifício unifamiliar - estrutura de produção de energia eléctrica

#### 5.2.4- Análise do efeito do isolamento térmico elementos opacos

Para apreciar o efeito do incremento do isolamento térmico dos elementos opacos foram criadas soluções do edifício sem isolamento térmico e com espessuras de 20 mm, 40 mm, 60 mm, 100 mm, 200 mm e 300 mm. Foi considerada a aplicação de XPS nas paredes e de lã mineral na cobertura.

Para avaliar o impacte da variação da espessura do isolamento térmico dos elementos opacos este edifício foi simulado com o modelo ESP-r e com as cargas térmicas internas definidas no capítulo 3. Nas simulações foram considerados os materiais indicados no Quadro 5.8, as condições de conforto definidas no capítulo 3 (temperatura interior de 18°C no Inverno e de 27°C no verão) e os caudais de ventilação obtidos de acordo com a proposta apresentada no capítulo 3 (0,50 rph). Foi considerado que a renovação permanente do ar é realizada por ventilação (natural) transversal, com grelhas instaladas nas caixilharias. Foi considerada a permeabilidade ao ar da envolvente n50 de 2,5. No Verão, quando a temperatura exterior é inferior a 24°C considera-se que as folhas móveis são abertas (frincha de 10 cm). As necessidades térmicas foram determinadas para as localidades de Faro, Lisboa e Bragança. Na ACV considerou-se que as necessidades térmicas eram 50% dos valores obtidos na simulação, em vez de se considerar 10% conforme referido no RCCTE como padrão de utilização da climatização.

A carga ambiental associada à construção está indicada na Figura 5.40, registando-se que esta aumenta com o aumento da espessura do isolante térmico (sensivelmente 4 ecopontos por cada 20 mm de isolante térmico). Na Figura 5.41 apresenta-se a carga ambiental associada à alteração do isolante térmico.

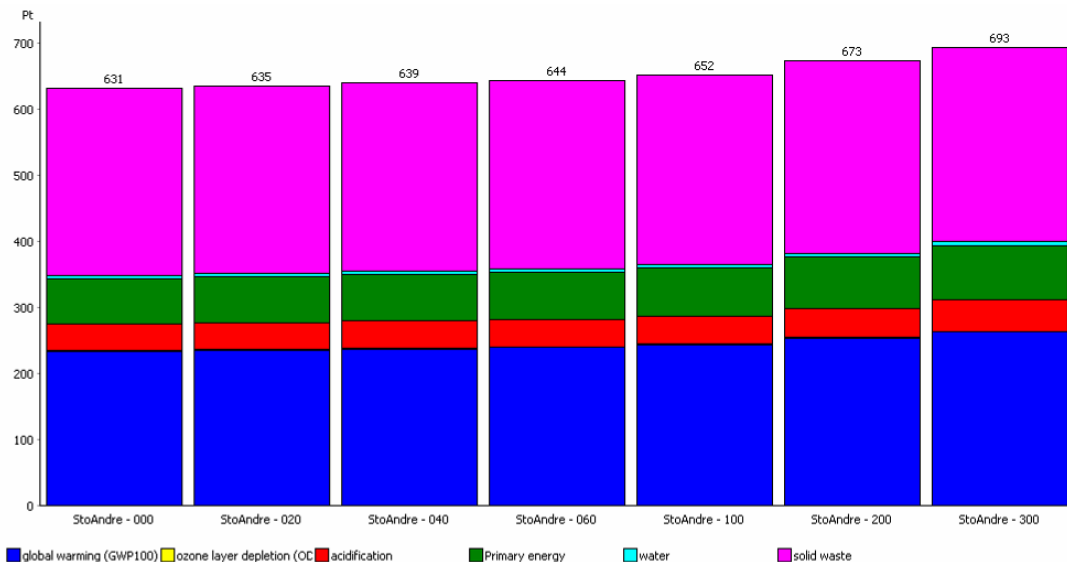


Figura 5.40 - Valores do indicador ambiental único para o ciclo de vida da construção do edifício unifamiliar - espessura do isolante térmico

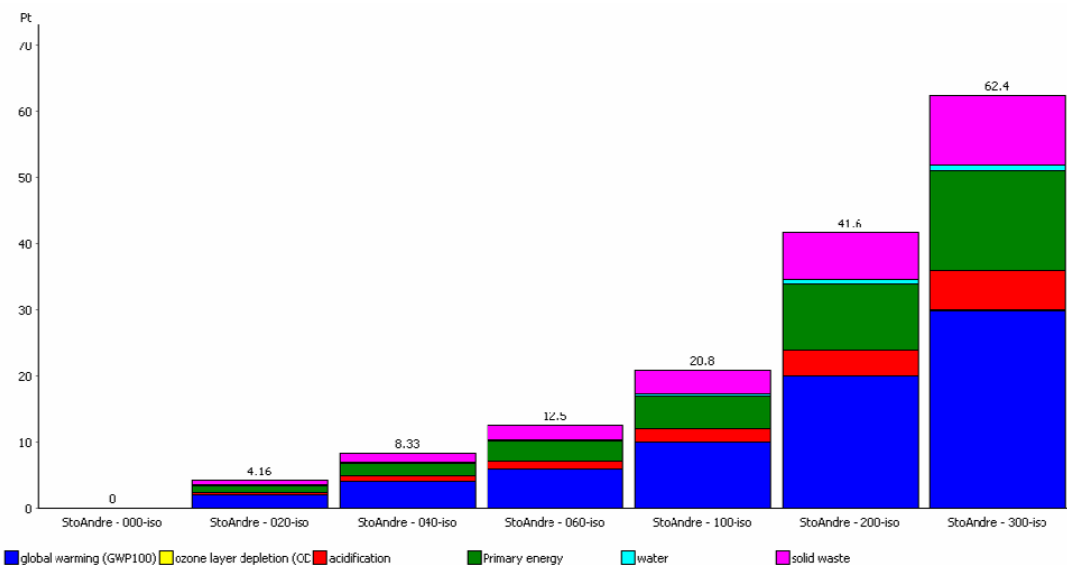


Figura 5.41 - Valores do indicador ambiental único para o ciclo de vida associado à construção do edifício unifamiliar - carga ambiental associada ao isolante térmico

Foi efectuada uma avaliação da temperatura interior e regista-se que a temperatura interior do edifício em Lisboa e Bragança é superior a 29°C em menos de 20 horas por ano, pelo que pode ser dispensada a aplicação de arrefecimento face ao critério definido no capítulo 3. Por seu lado, em Faro a temperatura é superior a 29°C em mais de 100 h por ano, pelo que será necessário arrefecimento para limitar as condições de desconforto de Verão. Contudo, atendendo a que Faro se encontra na zona V2S, em vez de 29°C seria admissível considerar 30,4°C. Em todos os climas, independentemente do nível de isolamento térmico da envolvente, a temperatura interior é inferior a 16°C em mais de 1000 horas por ano, pelo que é recomendada a existência de aquecimento. Na análise subsequente considera-se apenas a aplicação de um sistema de aquecimento central com caldeira, encontrando-se na Figura 5.42, na Figura 5.43 e na Figura 5.44 a estimativa das necessidades térmicas do edifício unifamiliar. Regista-se que existe uma redução acentuada das necessidades de aquecimento com o incremento da espessura de isolamento térmico,

enquanto as necessidades de arrefecimento apresentam uma redução menos acentuada pois essas necessidades já são relativamente baixas.

Assumindo um padrão de consumo de 50% das necessidades térmicas de aquecimento determinadas e um período de vida útil do edifício de 50 anos é possível estimar o impacto ambiental associado ao incremento da espessura do isolante térmico e às necessidades térmicas de aquecimento, Figura 5.45, Figura 5.46 e Figura 5.47.

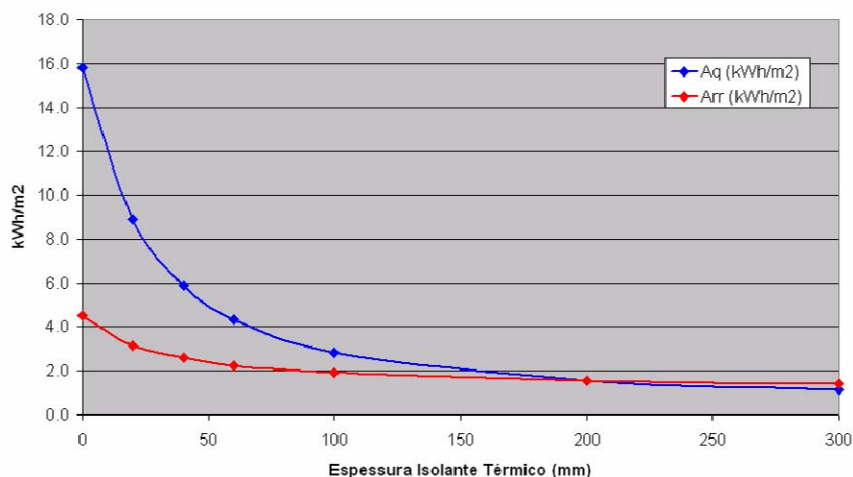


Figura 5.42 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício unifamiliar - Faro

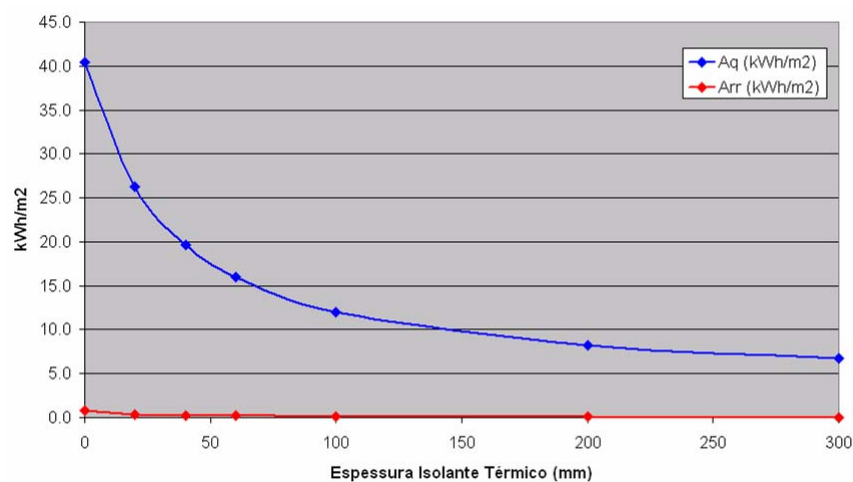


Figura 5.43 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício unifamiliar - Lisboa

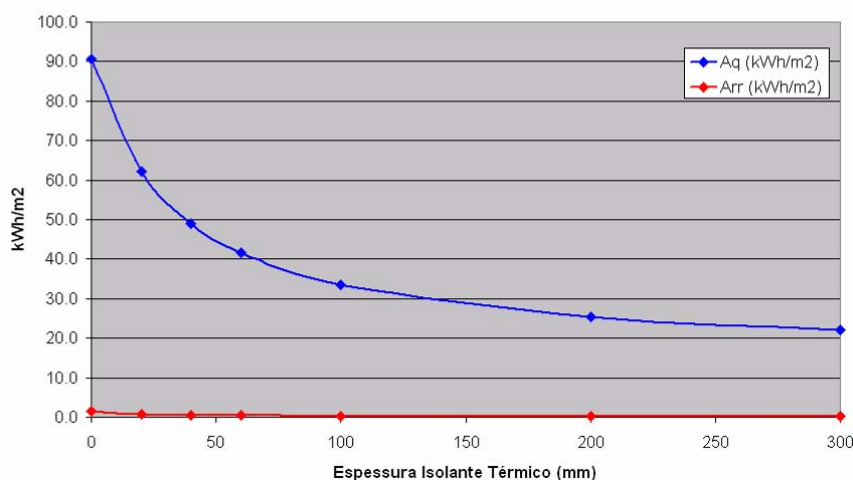


Figura 5.44 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício unifamiliar - Bragança



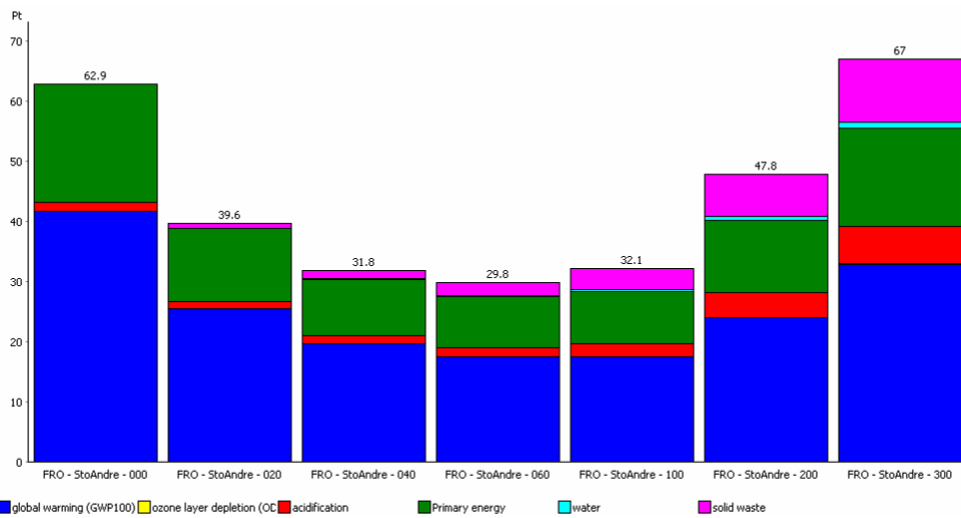


Figura 5.45 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício unifamiliar - Faro

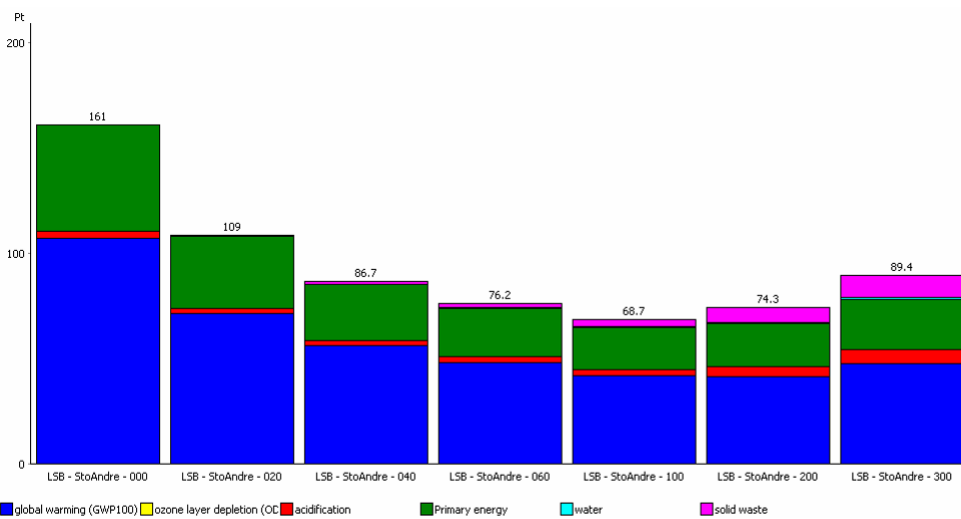


Figura 5.46 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício unifamiliar - Lisboa

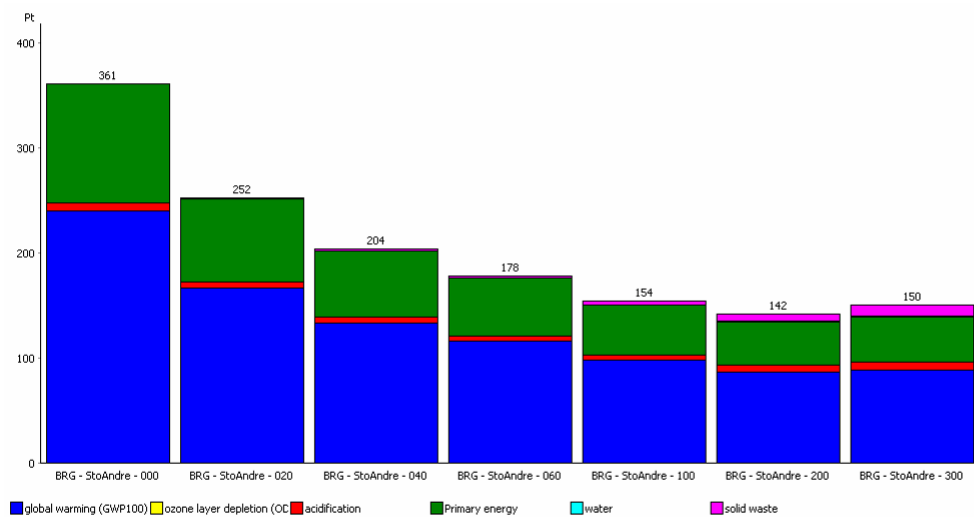


Figura 5.47 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício unifamiliar - Bragança

Dos resultados obtidos é evidenciado que existe um ponto óptimo a partir do qual o impacto ambiental associado ao incremento da espessura de isolante térmico se sobrepõe à redução prevista da energia para aquecimento. Esse ponto óptimo varia com o clima, podendo neste caso referir-se uma espessura de 60 mm em Faro, 100 mm em Lisboa e 200 mm em Bragança. Na Figura 5.48, na Figura 5.49 e na Figura 5.50 é evidenciado que este ponto óptimo para o indicador ambiental único, também corresponde à minimização da energia primária e das emissões de CO<sub>2</sub>.

Este resultado é relevante pois demonstra que o aumento “ilimitado” da espessura de isolante térmico não é razoável do ponto de vista ambiental, para além das dificuldades associadas à construção e aos custos de construção.

Como a carga ambiental associada ao isolante térmico ocorre no momento da construção (e também no fim-de-vida), enquanto as cargas ambientais associadas ao aquecimento são estimativas e ocorrem ao longo da vida do edifício (período durante o qual é expectável uma redução da carga ambiental relacionada com o consumo de energia), o ponto óptimo da espessura do isolamento térmico pode ser inferior ao apresentado anteriormente, pelo que se poderia considerar 40 mm em Faro, 60 mm em Lisboa e 60 mm em Bragança.

Salienta-se que neste caso de estudo a optimização da espessura de isolante térmico corresponde a alterar entre 40 a 220 ecopontos a carga ambiental do edifício, que é de sensivelmente 1520 ecopontos (Figura 5.35); ou seja, a optimização do isolante térmico pode alterar a carga ambiental do edifício até sensivelmente 15%.

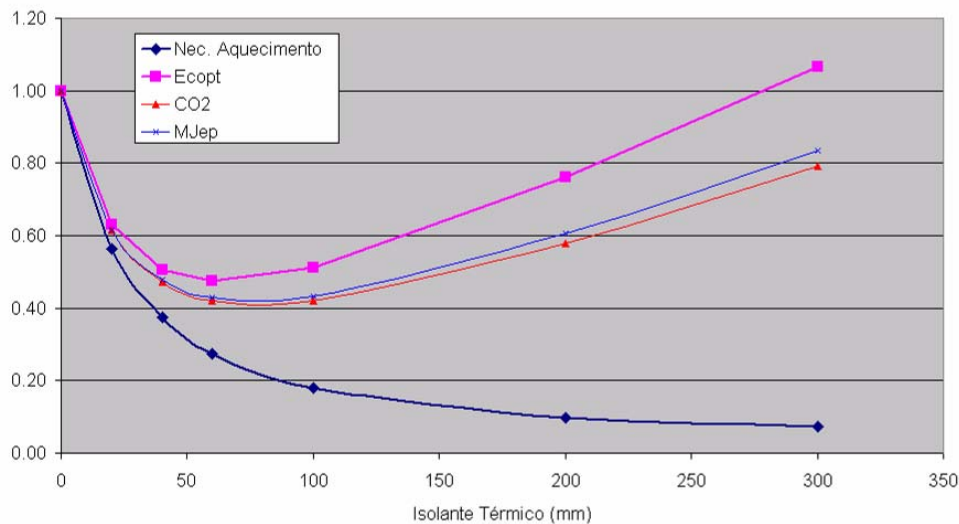


Figura 5.48 - Variação relativa face a configuração sem isolante térmico - Faro

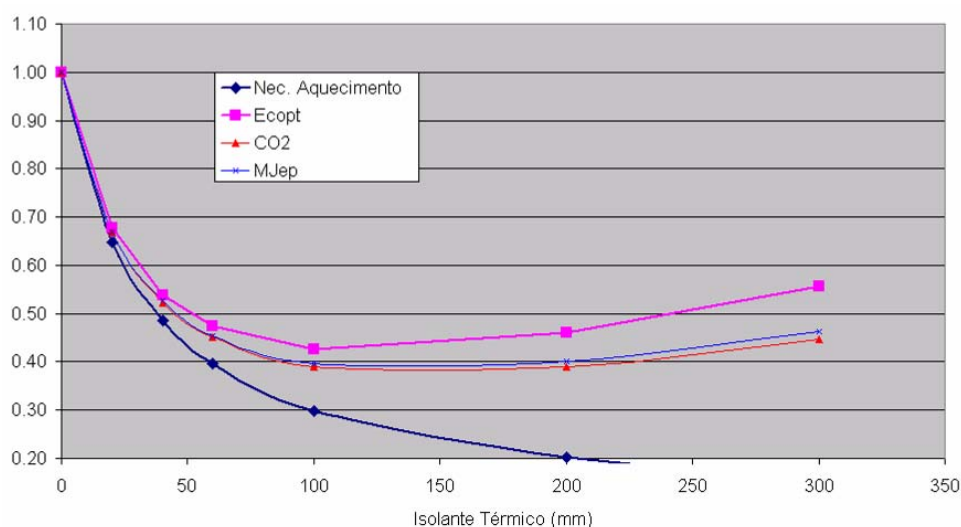


Figura 5.49 - Variação relativa face a configuração sem isolante térmico - Lisboa

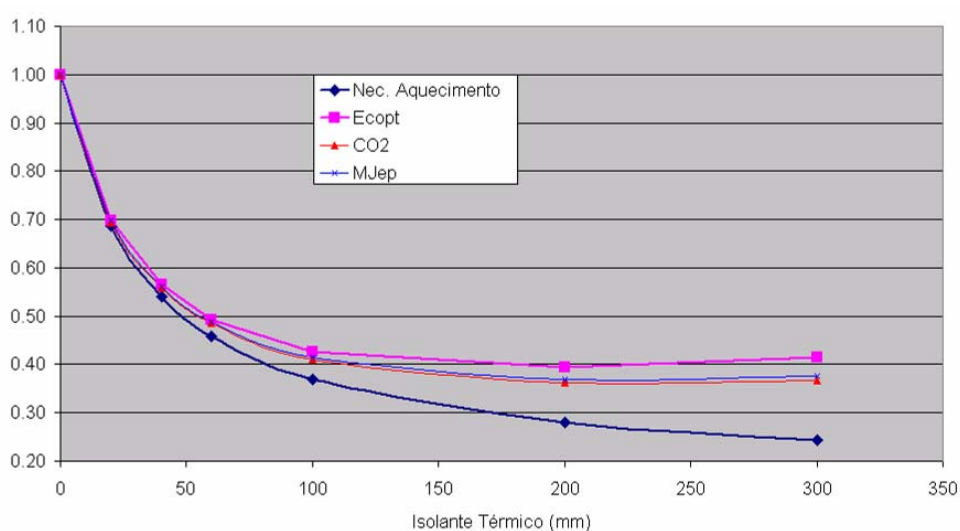


Figura 5.50 - Variação relativa face a configuração sem isolante térmico - Bragança

### 5.2.5 - Análise do efeito do isolamento térmico dos envidraçados

Para analisar o impacte ambiental associado a alteração do envidraçado e do tipo de caixilho o edifício foi estudado com os tipos de caixilhos (vidro e perfis) indicados no Quadro 5.14. A carga ambiental associada à construção está indicada na Figura 5.51. Na Figura 5.52 apresenta-se a carga ambiental associada à alteração do tipo de caixilharia.

Quadro 5.14 - Tipos de caixilhos estudados no edifício unifamiliar

Perfis	Vidro	$U_w$ (W/m <sup>2</sup> /K)	$g_{\text{vidro}}$	$g_{\text{vid+prot}}$
Alumínio	Vidro duplo	3,8	0,72	0,06
Alumínio	Vidro duplo baixo emissivo	3,0	0,72	0,06
Madeira	Vidro duplo	2,6	0,72	0,06
Madeira	Vidro duplo baixo emissivo	1,8	0,72	0,06

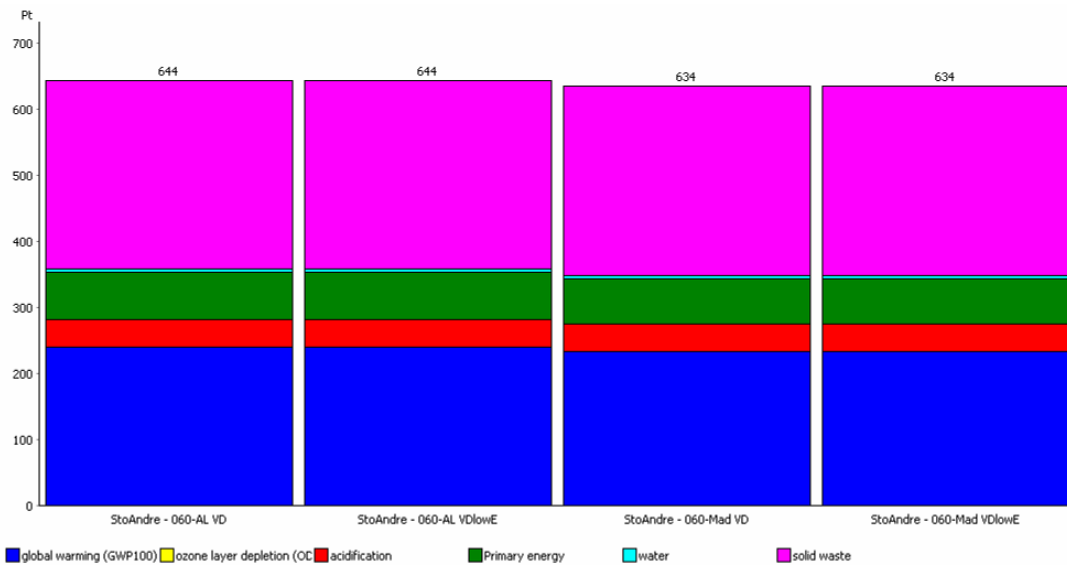


Figura 5.51 - Valores do indicador ambiental único para o ciclo de vida da construção do edifício unifamiliar - tipo de envidraçado exterior

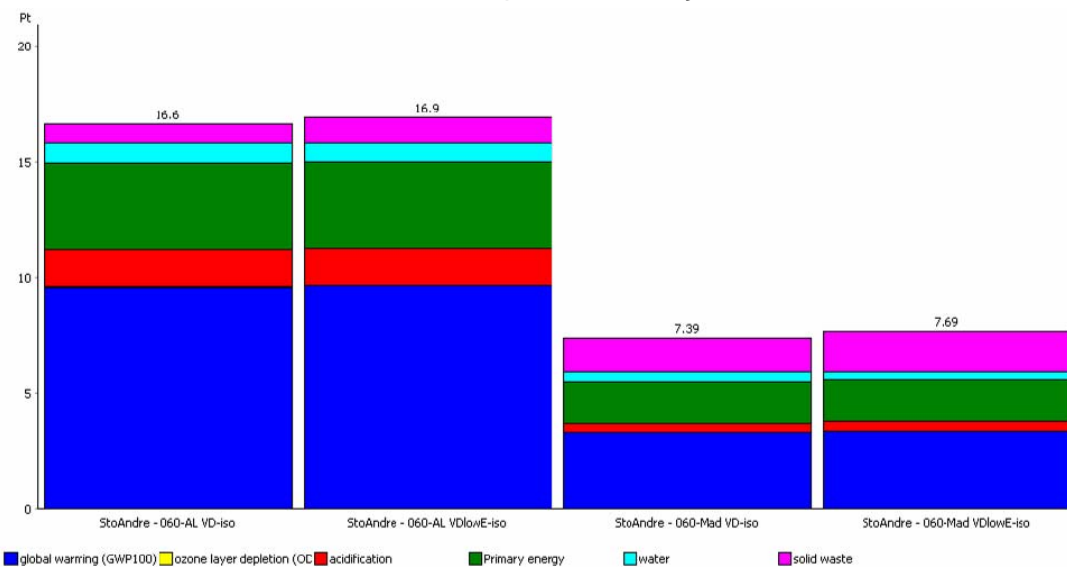


Figura 5.52 - Valores do indicador ambiental único para o ciclo de vida da construção do edifício unifamiliar - carga ambiental associada aos vãos envidraçados

As necessidades térmicas do edifício unifamiliar e as potências de climatização para os diferentes tipos de envidraçados são indicadas na Figura 5.53, na Figura 5.54 e na Figura 5.55. Regista-se que existe uma redução das necessidades térmicas (aquecimento e arrefecimento) com o aumento do isolamento térmico do vidro, enquanto a alteração do perfil é mais importante para a redução das necessidades de aquecimento.

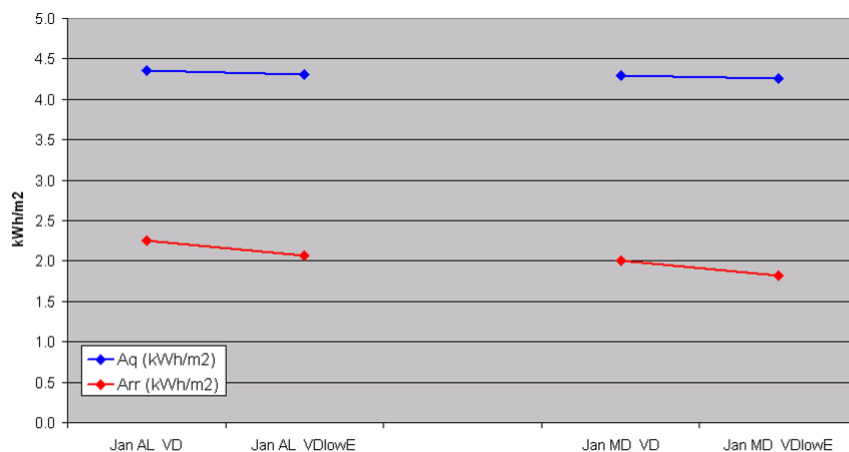


Figura 5.53 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício unifamiliar - Faro

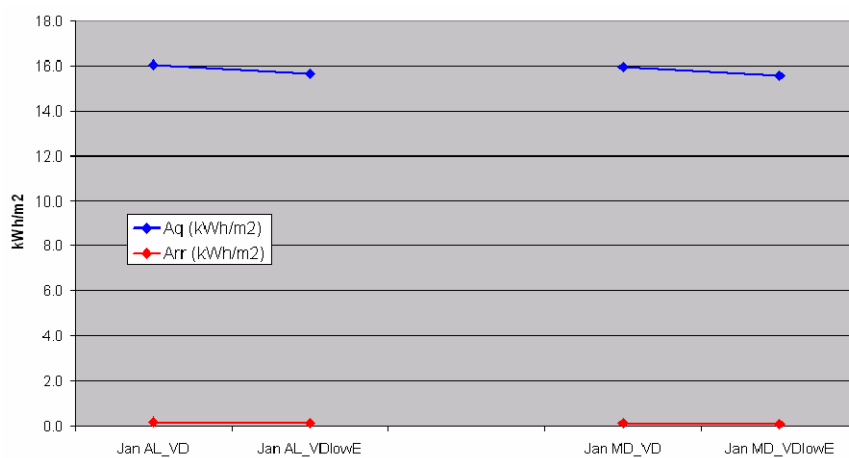


Figura 5.54 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício unifamiliar - Lisboa

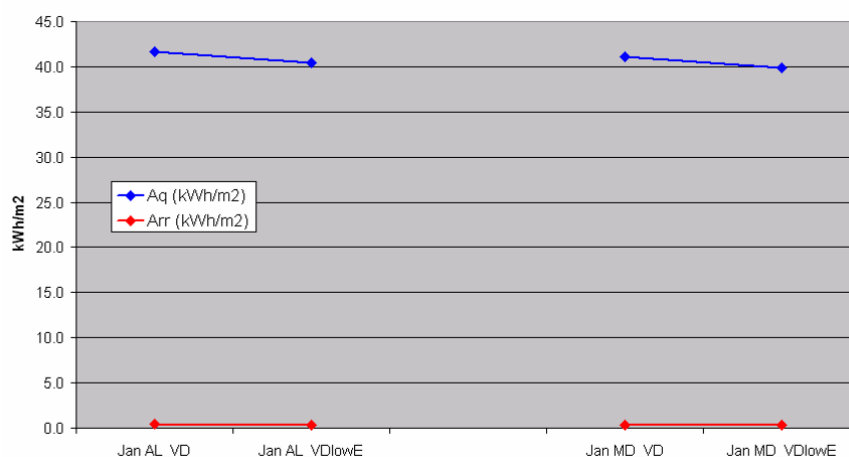


Figura 5.55 - Necessidades térmicas e potência de climatização do edifício unifamiliar - Bragança

Com base nas necessidades térmicas de aquecimento determinadas, assumindo um padrão de consumo de 50% desse valor e um período de 50 anos é possível estimar o impacto ambiental associado aos diferentes tipos de vãos exteriores e às necessidades de aquecimento, Figura 5.56, Figura 5.57 e Figura 5.58.

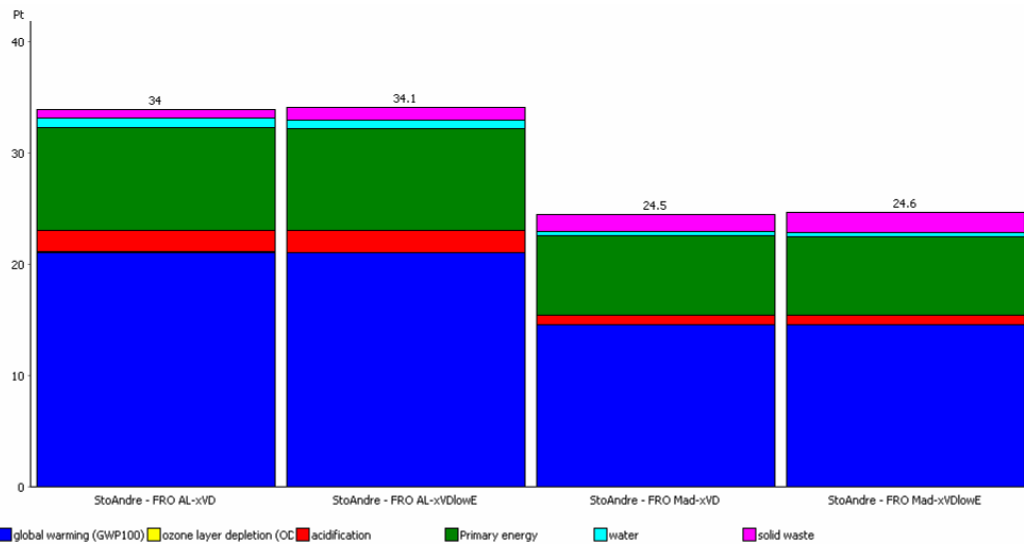


Figura 5.56 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício unifamiliar - Faro

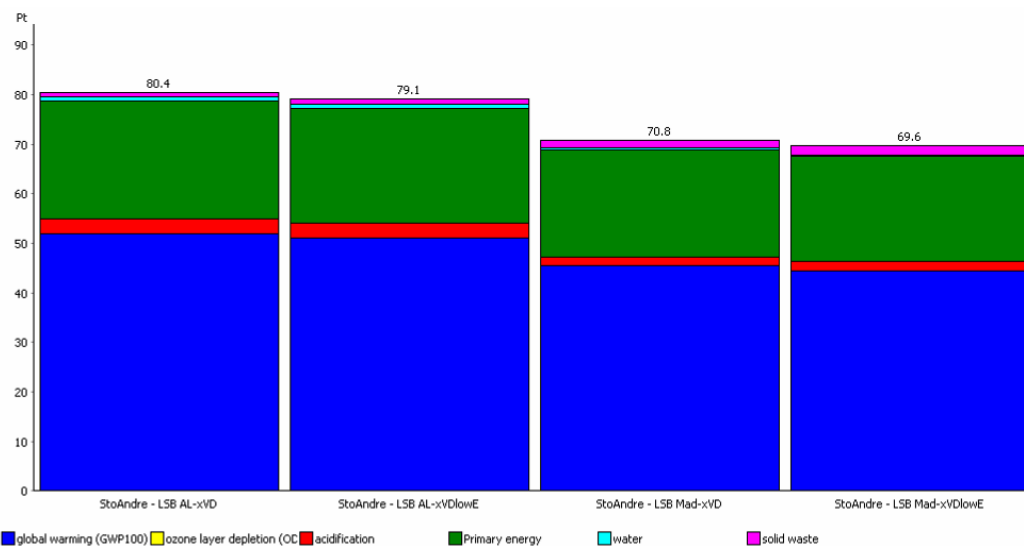


Figura 5.57 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício unifamiliar – Lisboa

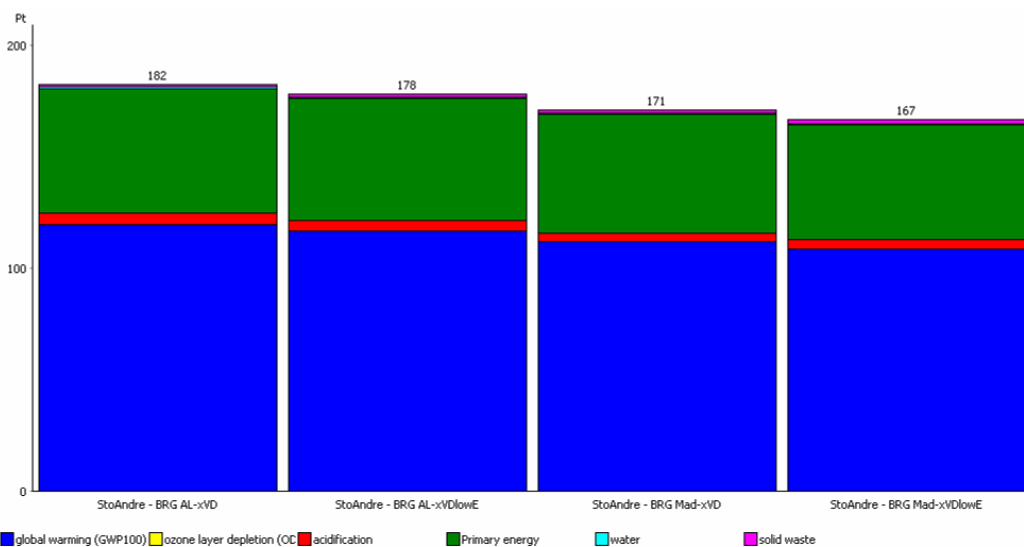


Figura 5.58 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício unifamiliar - Bragança

Como na substituição dos perfis de alumínio por madeira se conjuga um maior isolamento térmico e um menor impacte ambiental associado aos materiais, os perfis de madeira apresentam sempre menor impacte ambiental que os perfis de alumínio (para o mesmo tipo de vidro).

*Em relação aos diferentes tipos de vidro, regista-se que a adopção de vidros duplos baixo emissivos é relevante apenas no clima mais frio de Bragança, pois em Lisboa e Faro as diferenças são mínimas. A análise efectuada para o indicador ambiental único (ecopontos) é válida também para a energia primária e emissões de CO<sub>2</sub> Figura 5.59, Figura 5.60 e Figura 5.61.*

Neste caso de estudo a optimização do isolamento do envidraçado corresponde a alterar em cerca de 100 a 175 ecopontos a carga ambiental do edifício, que é de sensivelmente 1520 ecopontos; ou seja, a optimização do isolante térmico pode alterar a carga ambiental do edifício até sensivelmente 12%.

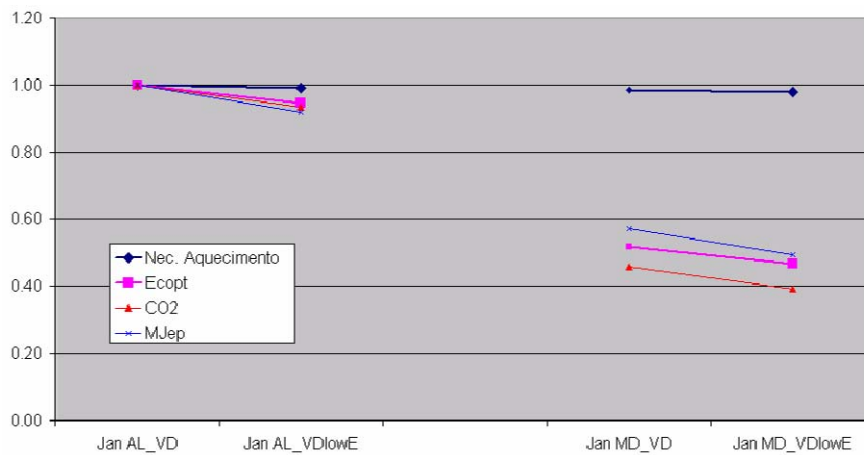


Figura 5.59 - Variação relativa face a janela de alumínio e vidro simples - Faro

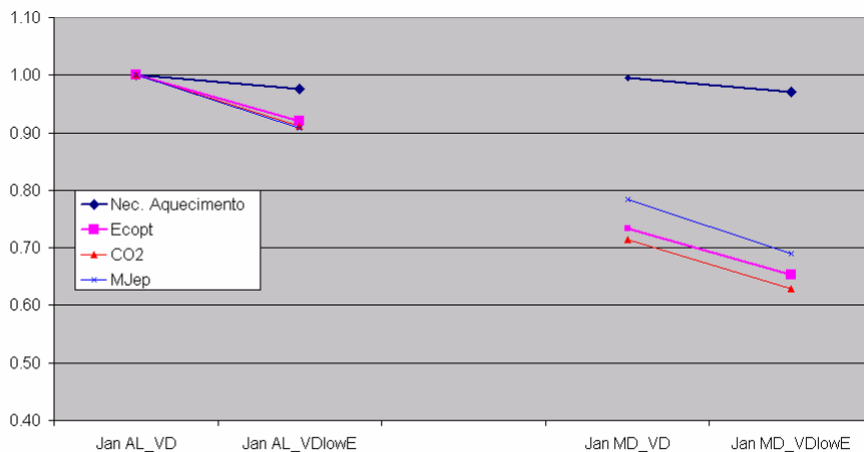


Figura 5.60 - Variação relativa face a janela de alumínio e vidro simples - Lisboa

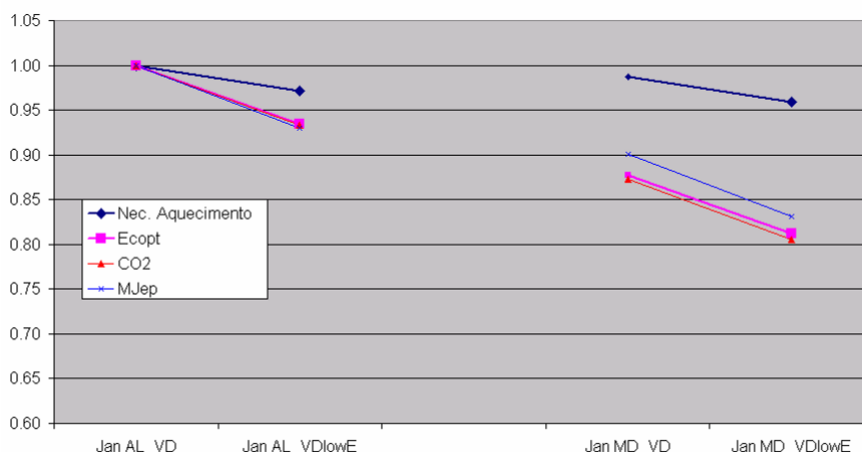


Figura 5.61 - Variação relativa face a janela de alumínio e vidro simples - Bragança

### 5.2.6 - Análise do efeito da temperatura interior de conforto

Conforme foi referido no capítulo 3 em edifícios não dotados de arrefecimento é admissível adoptar as condições de conforto adaptativo de 18°C e 27°C, assegurando um número de pessoas insatisfeitas em média inferior a 20%. Nesta secção avalia-se a consequência de se adoptar as condições de conforto regulamentares (RCCTE e RSECE, 2006) de 20°C e 25°C e as condições nominais de conforto aplicáveis a edifícios com sistemas de climatização (22°C e 24,5°C), conforme também foi referido no capítulo 3.

Na análise das implicações das condições de conforto foi adoptada a solução construtiva com 60 mm de isolante térmico, caixilharia de alumínio com vidro duplo incolor. A estimativa das necessidades térmicas é apresentada na Figura 5.62.

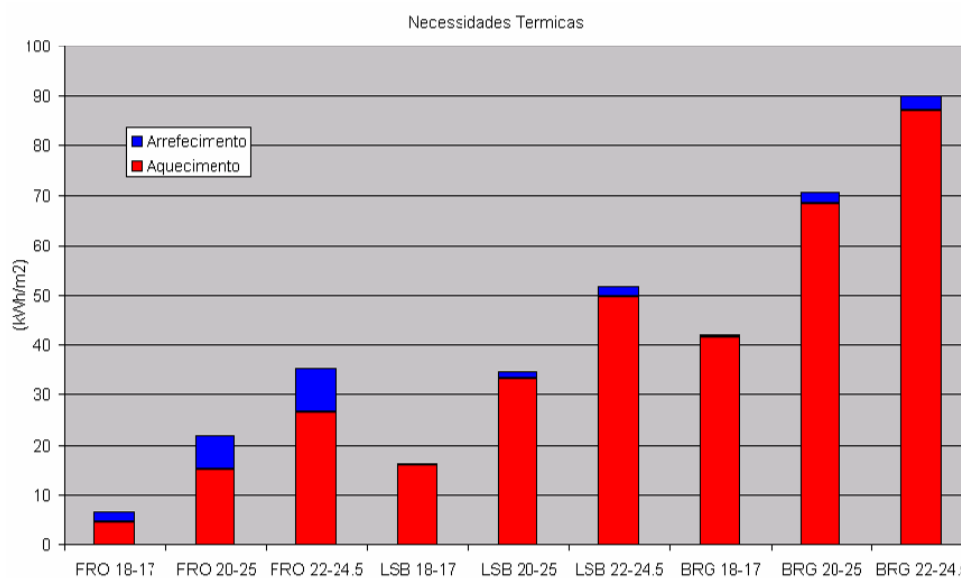


Figura 5.62 - Necessidades térmicas do edifício de habitação unifamiliar função da temperatura interior de conforto



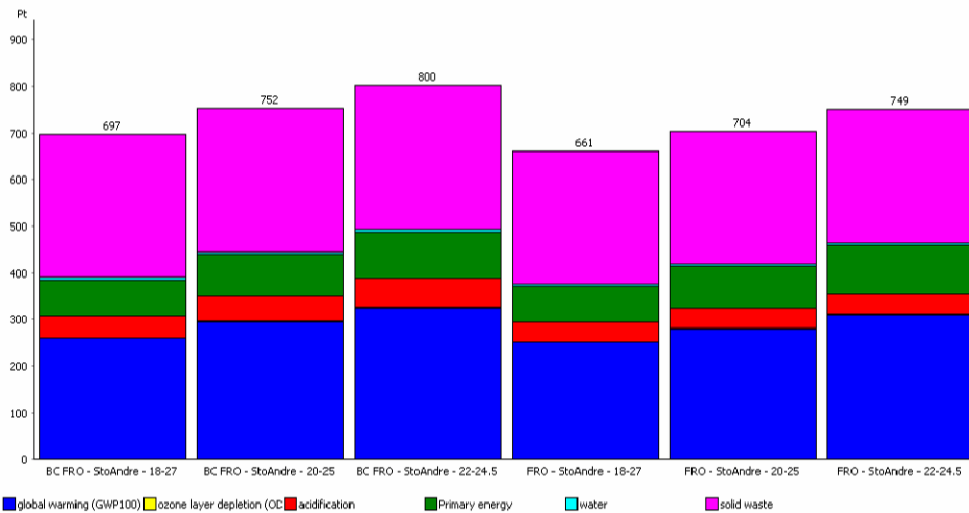


Figura 5.63 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício unifamiliar - Faro

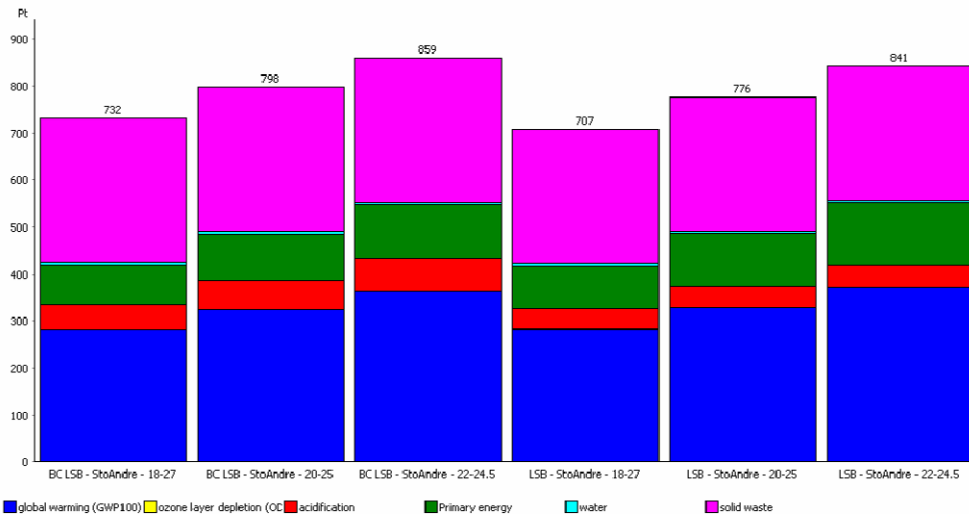


Figura 5.64 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício unifamiliar - Lisboa

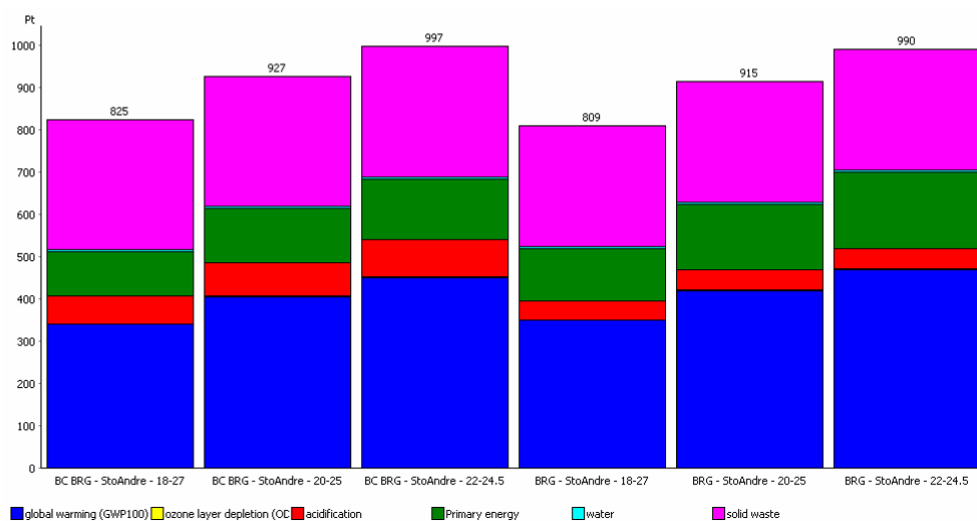


Figura 5.65 - Valores do indicador ambiental único para a ACV do edifício unifamiliar - Bragança

Na ACV do edifício considera-se um sistema de aquecimento com caldeira a gás e um segundo caso em que se considera o aquecimento e o arrefecimento realizado com uma bomba de calor com um COP médio de 3. Neste edifício de habitação esta alteração agrava o impacte ambiental em 30 ecopontos, conforme apresentado na secção 4.1.6.7.2. Com base nas necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento determinadas, assumindo um padrão de consumo de 50% desse valor e um período de 50 anos é possível estimar o impacte ambiental associado à alteração das condições interiores de conforto (Figura 5.63, Figura 5.64 e Figura 5.65).

Com estes resultados constata-se que a alteração das condições de conforto de 18-27°C para 20-25°C aumentam o impacte ambiental do edifício em sensivelmente 10% (40 a 100 ecopontos), enquanto a alteração para a temperatura de 22-24,5°C aumenta esse impacte em sensivelmente 20% (90 a 170 ecopontos). Deste modo, para minimizar o impacte ambiental dos edifícios, continuando a salvaguardar as condições de conforto, considera-se que devem ser aplicados termóstatos que limitem a temperatura pelo menos a 20°C na estação de aquecimento e a 25°C na estação de arrefecimento, devendo procurar-se que o funcionamento seja regulado para 18° C e 27°C.

### 5.2.7 - Análise do efeito da emissão de poluentes para o ar interior

Na análise das secções anteriores considerou-se o caudal de ventilação de base admitindo a aplicação de materiais com baixa emissão de poluentes para o ar interior. Caso não seja assegurado que os materiais apresentam uma baixa taxa de emissão de poluentes é necessário incrementar o caudal de ventilação de 0,50 rph para 0,75 rph (Quadro 5.10). Em relação ao impacte ambiental na ACV tal repercute-se num agravamento das necessidades térmicas de aquecimento e de arrefecimento, Quadro 5.15, admitindo a envolvente com 60 mm de isolante térmico e caixilharia de alumínio com vidro duplo.

Quadro 5.15 – Necessidades térmicas função dos caudais de ventilação

Materiais	Faro		Lisboa		Bragança	
	Aq (kWh)	Arr (kWh)	Aq (kWh)	Arr (kWh)	Aq (kWh)	Arr (kWh)
Baixa emissão	492	255	1810	20,2	4706	52
Não qualificados	740	236	2301	24,4	5739	58

A carga ambiental associada ao ciclo de vida encontra-se indicado na Figura 5.66. Dos resultados regista-se que o acréscimo de caudal corresponde a um acréscimo de carga ambiental de 9 a 36 ecopontos. Ou seja, encontrando-se assegurada a qualidade do ar interior a qualificação dos materiais como “materiais de baixa emissão de poluentes para o ar interior” não constitui uma redução substancial do indicador ecopontos, devido em grande parte à amenidade do clima Português.

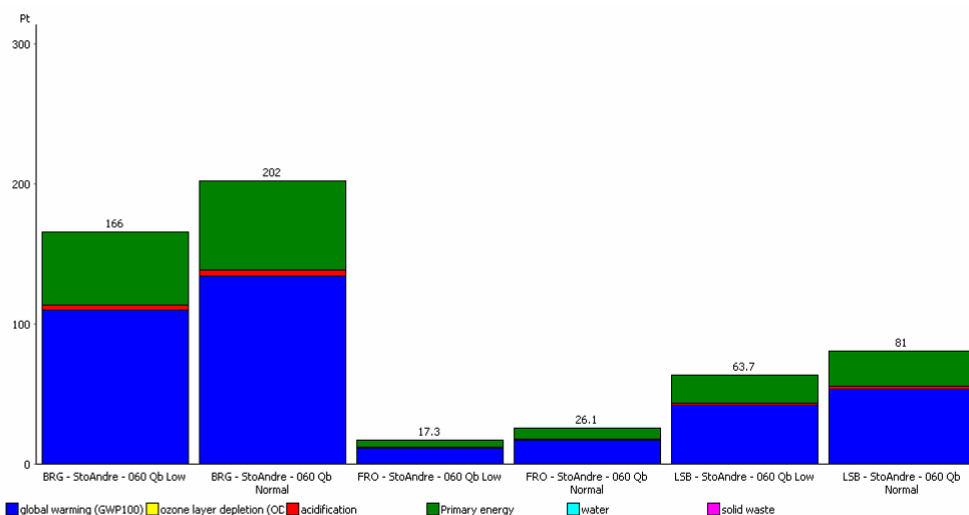


Figura 5.66 - Valores do indicador ambiental único para o ciclo de vida da construção do edifício unifamiliar - qualidade do ar interior

### 5.2.8- Efeito da reciclagem e reutilização

Para avaliar o efeito do tratamento da fase de fim-de-vida do edifício foi efectuada a ACV para três cenários:

- Caso base em que se considera o tratamento de resíduos indicado na Figura 4.51 (edifício 50% aterro), em que se assume uma taxa de reciclagem de sensivelmente 80% para os materiais metálicos e sensivelmente 50% para os materiais inertes e o envio para aterro dos restantes materiais.
- Envio para aterro de 100% dos resíduos da construção e demolição (edifício 100% aterro) que corresponde à pior solução em termos ambientais
- Por fim um caso em que se considera que 50% das paredes interiores, lajes, elementos estruturais e caixilharias no fim-de-vida são reutilizados pelo facto de ter sido previsto em projecto a sua desmontagem. Em relação aos restantes 50% dos resíduos considera-se que estes têm o tratamento definido para o caso base (Figura 4.51).

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.67 e no Quadro 5.16, onde se regista que o fim-de-vida do edifício se pode traduzir numa redução do impacte ambiental de sensivelmente 410 ecopontos entre o cenário mais desfavorável e o cenário mais favorável. Face ao cenário considerado neste estudo, se for prevista a reutilização de elementos da construção é possível reduzir o impacte ambiental do edifício em 256 ecopontos e reduzir a quantidade de resíduos em sensivelmente 35 ton.

Salienta-se que esta redução do impacte ambiental (410 ecopontos) é preponderante face à redução associada à optimização do isolamento térmico (40 a 220 ecopontos) e dos envidraçados (100 a 175 ecopontos).

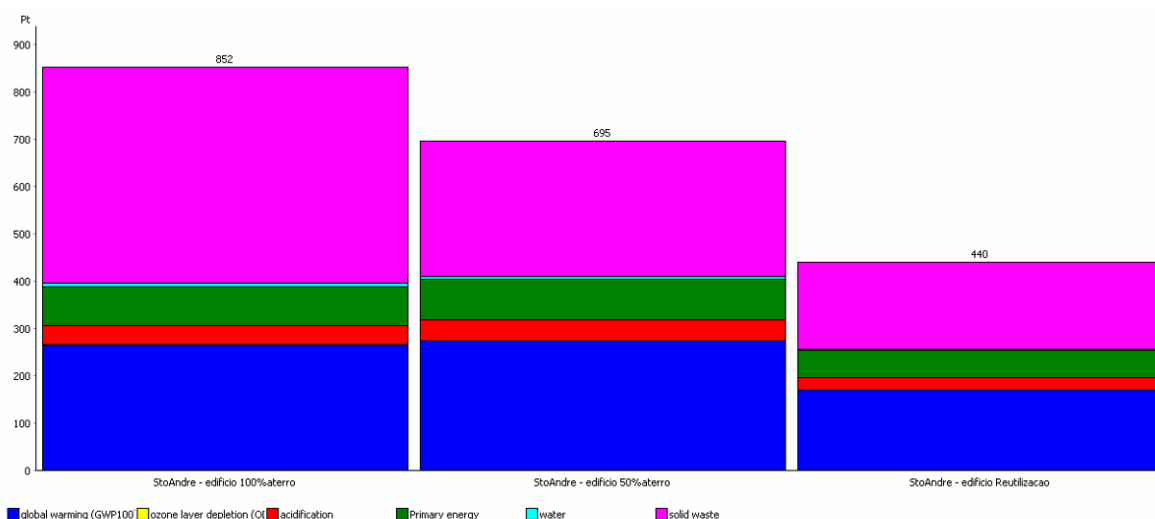


Figura 5.67 - Influência da fase de fim-de-vida na ACV no edifício unifamiliar

Quadro 5.16 - Avaliação do impacte ambiental do edifício unifamiliar

Tratamento dos resíduos	tonCO <sub>2</sub>	GJep	Resíduos (ton)	Ecopt
100% para aterro	64,8	888	157,0	852
Caso base (50% aterro, 50% reciclados)	67,2	930	98,3	695
Reutilização de 50% dos materiais	41,8	611	63,4	440

### 5.2.9 - Síntese

De forma a avaliar a relevância dos recursos consumidos nos edifícios, foi efectuada a ACV de um edifício de habitação unifamiliar. Dos resultados obtidos regista-se:

- Ao longo da vida útil de 50 anos, um edifício de habitação unifamiliar pode ser responsável pela emissão de sensivelmente 1470 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 23 GJep/m<sup>2</sup> e 13,4 ecopt/m<sup>2</sup>.
- Das utilizações consideradas os impactes ambientais preponderantes no edifício são o consumo de energia eléctrica para electrodomésticos e iluminação (40%).
- No consumo de energia primária a construção e a fase de fim-de-vida apresentam um impacte de sensivelmente 29%, o aquecimento de 7%, as AQS 25% e a electricidade 39%.
- Das componentes directamente relacionadas com edifício é possível condicionar a construção, o fim-de-vida e a climatização (aquecimento), ou seja, sensivelmente 46% do impacte ambiental do edifício.
- Caso a produção de energia eléctrica fosse proveniente de fontes 100% renováveis registava-se uma redução de sensivelmente 30% no impacte ambiental do edifício, com aquecimento a gás e de 40% para aquecimento com bomba de calor.

Dos aspectos da construção do edifício (fase de construção, climatização e fase de fim-de-vida) foi possível demonstrar que:

- A fase de construção representa cerca de 54% do impacte ambiental, a fase de fim-de-vida (39%), sobreponde-se largamente à energia de aquecimento ambiente (7%) determinada com base nos limites regulamentares.

- Na fase de construção, os elementos com maior impacte ambiental são os elementos mais pesados, nomeadamente pavimento, cobertura, estrutura e paredes. Na construção a instalação eléctrica tem um peso importante, devido à utilização do cobre. As restantes instalações apreciadas têm um impacte relativamente baixo (inferior a 3%).
- Apreciando diferentes tratamentos de RCD regista-se que o fim-de-vida do edifício se pode traduzir numa redução do impacte ambiental do edifício em sensivelmente 410 ecopontos entre o cenário mais desfavorável (todos os resíduos enviados para aterro) e o cenário mais favorável. Face ao cenário considerado neste estudo se for prevista a reutilização de elementos da construção é possível reduzir o impacte ambiental do edifício em sensivelmente 256 ecopontos e reduzir a quantidade de resíduos em sensivelmente 35 ton.
- Do estudo da influência da espessura do isolamento térmico é evidenciado que existe um ponto óptimo a partir do qual o impacte ambiental associado ao incremento da espessura de isolante térmico se sobrepõe à redução prevista da energia para aquecimento. Esse ponto óptimo varia com o clima, podendo neste caso referir-se uma espessura de 60 mm em Faro e 100 mm em Lisboa e 200 mm em Bragança. Este ponto óptimo para o indicador ambiental único, é próximo do mínimo da energia primária e das emissões de CO<sub>2</sub>. A optimização do isolamento térmico permite alterar entre 40 a 220 ecopontos.
- A análise dos caixilhos de alumínio e madeira e várias composições de vidro evidencia que a solução mais eficiente é a da utilização de caixilharia de madeira. O vidro duplo baixo emissivo é uma solução viável para climas frios como Bragança, sendo equivalente à solução de vidro duplo corrente em climas como Lisboa e Faro. A alteração das propriedades dos envidraçados permitem alterar entre 100 a 175 ecopontos.
- a alteração das condições de conforto pode implicar um aumento da carga ambiental de 40 a 170 ecopontos.
- a aplicação de materiais com baixa emissões de poluentes para o ar interior não apresenta uma redução significativa face à solução base.

Estes resultados mostram que a melhoria da eficiência energética e ambiental dos edifícios envolve a minimização das necessidades energéticas durante a utilização, bem como se deve prever na fase de projecto a possibilidade de reutilização de alguns dos elementos mais pesados e com maior carga ambiental.

Na Figura 5.68 apresenta-se os resultados da viabilidade económica do aumento da espessura de isolamento térmico assumindo um padrão de consumo de 50% das necessidades térmicas, um custo da energia térmica de 0,09€/kWh para resistência eléctrica e 0,03€/kWh para a caldeira a gás e um custo adicional de 0,05€ por mm de espessura e por m<sup>2</sup> de isolante térmico. Dessa figura, para um período de retorno de 8 anos, é estimada uma espessura óptima em Lisboa de 100 mm (supondo o aquecimento menos eficiente de resistência eléctrica), enquanto para um equipamento mais eficiente (caldeira ou bomba de calor) as espessuras viáveis economicamente seriam inferiores a 20 mm.

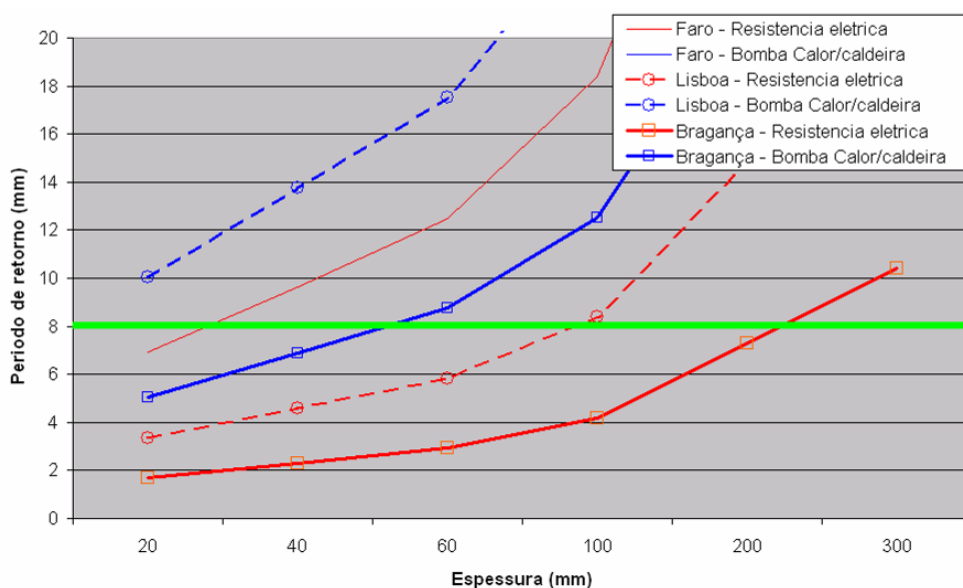


Figura 5.68 - Estimativa do período de retorno função da espessura do isolante térmico

Tendo em conta a viabilidade económica da espessura de isolamento térmico e que a carga ambiental associada ao isolante térmico ocorre no momento da construção, considera-se razoável prever espessuras ligeiramente inferiores às referidas anteriormente. Efectivamente, as cargas ambientais associadas à climatização são estimativas e ocorrem ao longo da vida do edifício (50 anos), período durante o qual é expectável uma redução da carga ambiental relacionada com o consumo de energia devido, por exemplo, à evolução das estruturas e tecnologias de produção de energia eléctrica.

Salienta-se que este estudo evidencia que o aumento “ilimitado” da espessura de isolante térmico não é razoável do ponto de vista ambiental, para além das dificuldades associadas à construção e aos custos de construção.

Com base na comparação dos resultados do estudo da moradia e do edifícios de apartamentos regista-se que a moradia apresenta uma impacte ambiental superior ao do edifício de apartamentos, quando os resultados são expressos por unidade de área.

	Moradia			Apartamento		
	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>
Construção	474	6129	3,30	380	5368	2,77
Energia Aquecimento	74	1537	0,46	60	1229	0,36
Fim-de-vida	45	555	2,38	31	380	1,67
<b>TOTAL</b>	<b>593</b>	<b>8221</b>	<b>6,14</b>	<b>471</b>	<b>6977</b>	<b>4,80</b>

Uma análise efectuada com o indicador único (Ecoindicator99 H/H) conduz a resultados semelhantes aos obtidos com base no indicador ambiental único definido no capítulo 3, como se pode observar nas figuras seguintes referentes à ACV do isolamento térmico da envolvente opaca da Moradia em Lisboa (Figura 5.69 e Figura 5.70).

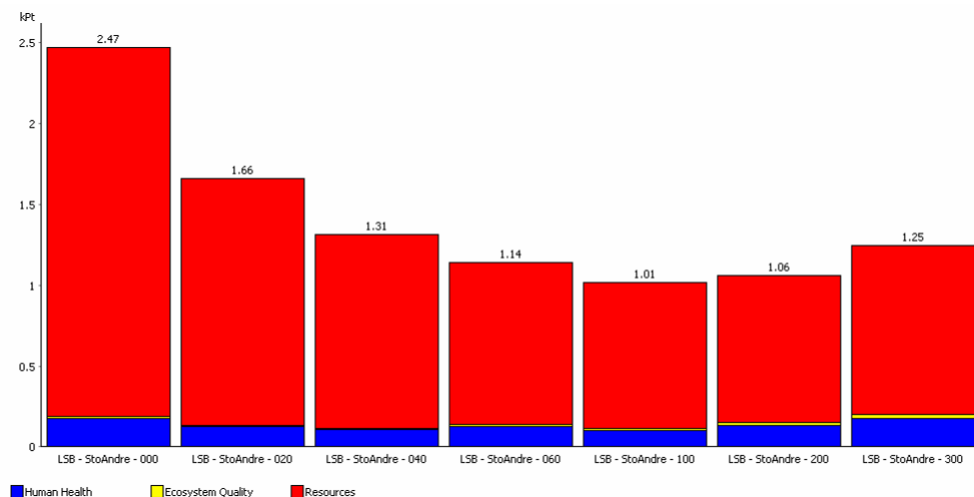


Figura 5.69 - Indicador ambiental único ecoindicator99 -H/H

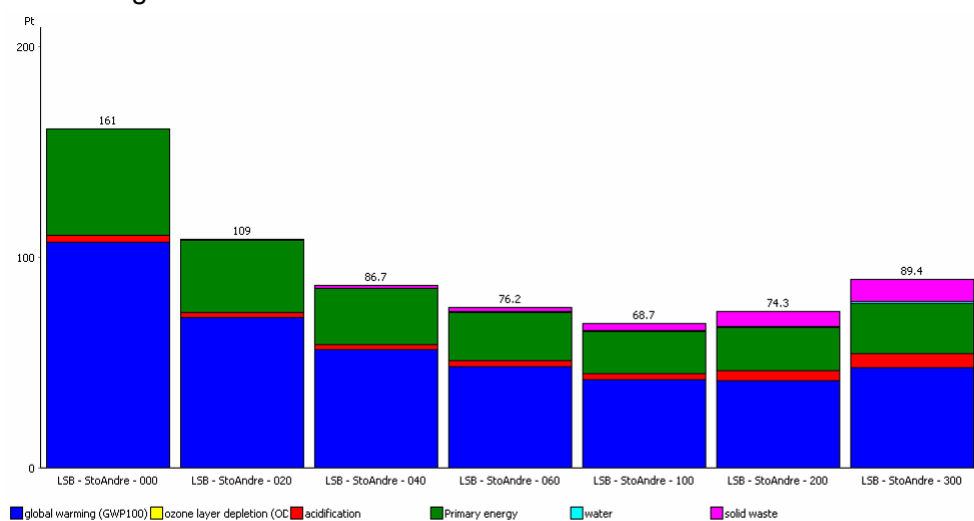


Figura 5.70 - Indicador ambiental único Ecopontos (capítulo 3)

## 5.3- AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UM EDIFÍCIO DE SERVIÇOS

### 5.3.1 - Descrição do edifício e dos sistemas de climatização

Neste caso de estudo avalia-se o impacte ambiental de um edifício de serviços de forma a apreciar a relevância ambiental de alguns dos seus elementos. Tendo em conta os resultados do estudo da optimização de vãos envidraçados é efectuada uma apreciação do desempenho térmico do edifício considerando a solução de fachada dupla pele com vidro exterior incolor e vidro duplo interior baixo emissivo, bem como uma solução de fachada tradicional com uma área envidraçada de 20% da área de pavimento até 5 m de profundidade.

De modo complementar é efectuada a apreciação do impacte da alteração da temperatura interior de conforto, bem como o efeito da reciclagem e reutilização dos materiais de construção.

### 5.3.1.1 - Edifício

O edifício de serviços em análise é do tipo administrativo e encontra-se situado em Lisboa, sendo constituído por 13 pisos, Figura 5.71, Figura 5.72. Os pisos 0 a 7 são essencialmente pisos de escritórios, os pisos -2 e -4 comportam o átrio de entrada, a recepção e estacionamento, enquanto os pisos -6 e -7 são pisos de estacionamento. A análise centra-se nos pisos 0 ao piso 7. As dimensões características do edifício são apresentadas no Quadro 5.1.

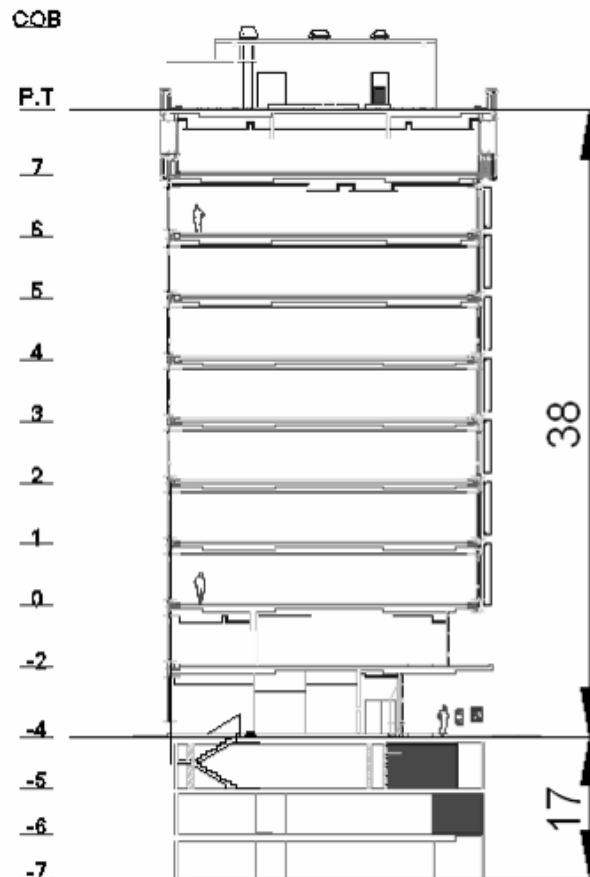


Figura 5.71 - Vista em corte de uma secção transversal do edifício

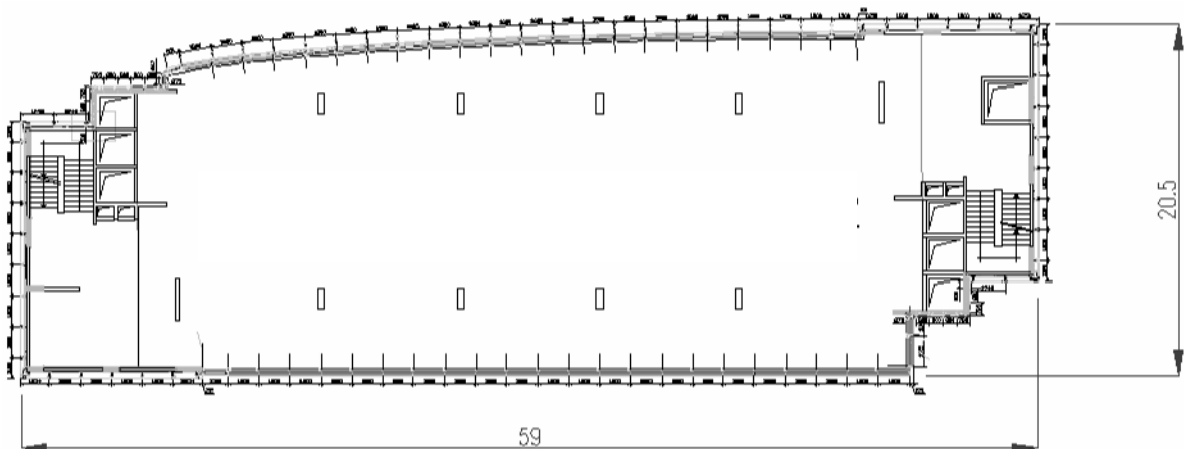


Figura 5.72 - Planta do piso tipo (piso 0 a 6)



Quadro 5.17 - Quadro resumo das dimensões do caso de estudo

Área planta (m <sup>2</sup> )	Área bruta (m <sup>2</sup> )	Área útil (m <sup>2</sup> )	Área climatizada (m <sup>2</sup> )	Pd (m)	Aenvidraçada/Autil
1028	9900	9100	8170	3,8 m	24%

Quadro 5.18 - Resumo das dimensões e materiais

Elementos do edifício	Área (m <sup>2</sup> )
Fachada dupla pele envidraçada	2232
Fachada agrafada com vidro duplo	344
Envolvente exterior opaca - revestimento de alumínio	2527
Envolvente exterior opaca - revestimento de granito	407
Janelas alumínio com corte térmico	177
Janelas alumínio com corte térmico escadas	14
Paredes interiores de alvenaria	906
Divisória leve interior	1500
Laje cobertura	1028
Laje pavimento de betão, com pavimento sobre-elevado e tecto falso de alumínio	9250
Betão armado	417 m <sup>3</sup>

A fachada norte e a fachada sul do edifício são constituídas por uma fachada dupla-pele envidraçada do tipo *box-window* não-ventilada. Nas fachadas de nascente e poente e nas extremidades das fachadas norte e sul, a envolvente é constituída por uma parede de alvenaria (22 cm), isolada pelo exterior com 60 mm de lã mineral, um espaço de ar não ventilado e um revestimento exterior de alumínio; numa pequena extensão da fachada é utilizado revestimento de granito em substituição dos painéis de alumínio. No piso -4, encontra-se aplicada uma fachada com vidros duplos fixos pontualmente. Os pormenores da fachada dupla pele foram apresentados na secção 4.2.4. No Quadro 5.2 apresenta-se uma síntese dos materiais de construção baseada em medições nas peças desenhadas do edifício.

### 5.3.1.2- Ocupação e cargas térmicas internas

De acordo com informação obtida junto do dono de obra, o edifício tem um período normal de funcionamento das 8 h às 18 h nos dias úteis sendo ocupado em média por 300 pessoas por dia (27 m<sup>2</sup> área climatizada/ocup, Figura 5.73).

No piso tipo de escritórios estão instaladas 180 lâmpadas fluorescentes de 54 W (9720 W, 12 W/m<sup>2</sup> área climatizada), de acordo com levantamento efectuado no edifício. Para incluir as perdas nos balastos e no sistema de controlo considera-se uma potência absorvida de 14 W/m<sup>2</sup> área climatizada (113,5 kW no edifício). A iluminação funciona tipicamente das 8 h às 20 h.



Figura 5.73 - Aspecto interior do piso tipo do edifício de serviços

Nos pisos encontram-se instaladas duas impressoras, duas fotocopiadoras, quatro faxes, uma máquina de café, uma de comida fria e uma de água fria, a que corresponde uma potência máxima instalada de 6,0 kW/piso e um valor mínimo de *stand-by* e de funcionamento dos aparelhos de “alimentação” durante a noite de 2,0 kW/piso. Com base nestes valores e nas horas de funcionamento é estimada uma potência absorvida média de 2,3 kW/piso (2,7 W/m<sup>2</sup> área climatizada).

Da análise das medições do consumo de energia de um piso durante uma semana de Inverno e de Verão (Figura 5.74), verifica-se que durante a noite e aos fins-de-semana o consumo de energia de um piso é de 3 kW e que durante os períodos de ocupação esse consumo é de sensivelmente 15 kW. Deste modo, os valores anteriormente referidos de 17,7 kW para a potência máxima (11,7 kW de iluminação + 6,0 kW de equipamentos) e de 3,2 kW para a potência mínima (1,2 kW+2,0 kW) são concordantes com os valores medidos.

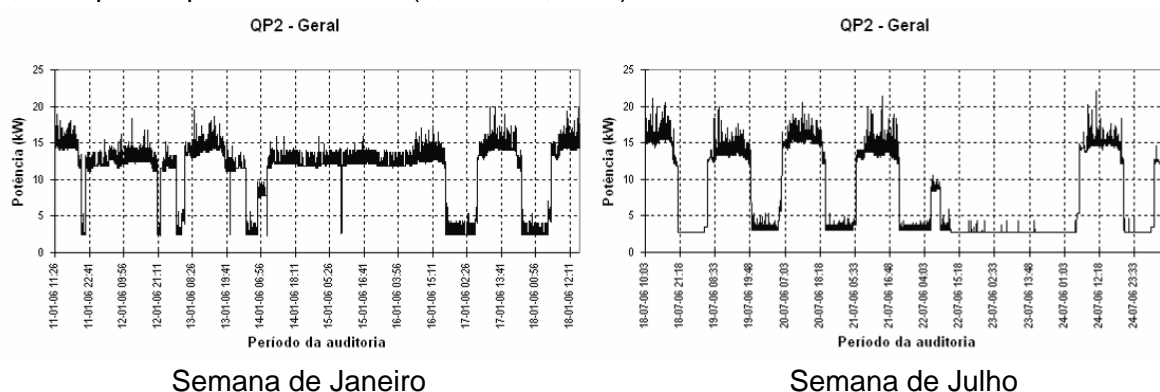


Figura 5.74 - Consumos de energia eléctrica num piso tipo (iluminação e equipamentos, excepto PC)

O equipamento informático é alimentado por UPS (*uninterruptible power supply*). Em cada piso é estimado um consumo de 4,6 kW (38 postos de trabalho/piso e 120 W/posto de trabalho com monitores CRT, ver secção 3.3.2.1.2). Para o total dos nove pisos é estimado um consumo total de 36 kW. Este valor é relativamente próximo da diferença entre o consumo máximo (133 kW) e mínimo (96 kW) medido no quadro da UPS, Figura 5.75. O consumo mínimo de 96 kW, considera-se corresponder aos servidores existentes na *data center* do edifício e aos bastidores.

Na simulação térmica e energética do edifício são considerados os perfis de utilização e consumo atrás mencionados para ocupantes, iluminação e equipamentos, Figura 5.76 (soma das cargas correspondente aos dias úteis e aos fim-de-semana). De uma forma geral, em relação ao perfil considerado, verifica-se que o perfil do RSEC é superior em 12% na carga dos ocupantes e 29% no de iluminação. No que diz respeito ao perfil dos equipamentos, o perfil do RSECE é muito superior ao aqui considerado para os pisos administrativos, pois no perfil do RSECE encontram-se incluídas as cargas referentes a alguns equipamentos que se encontram em espaços técnicos e que neste edifício são objecto de climatização independente e por isso não foram considerado no estudo dos pisos “administrativos”.

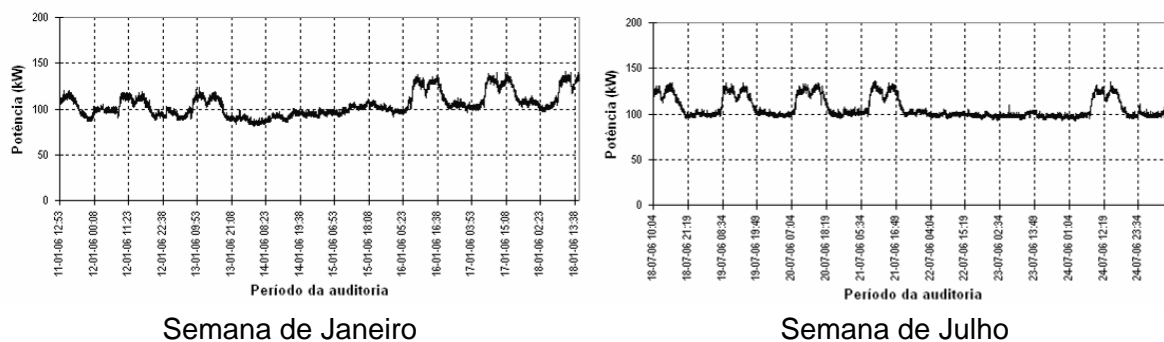


Figura 5.75 - Potência absorvida na UPS<sup>1</sup>

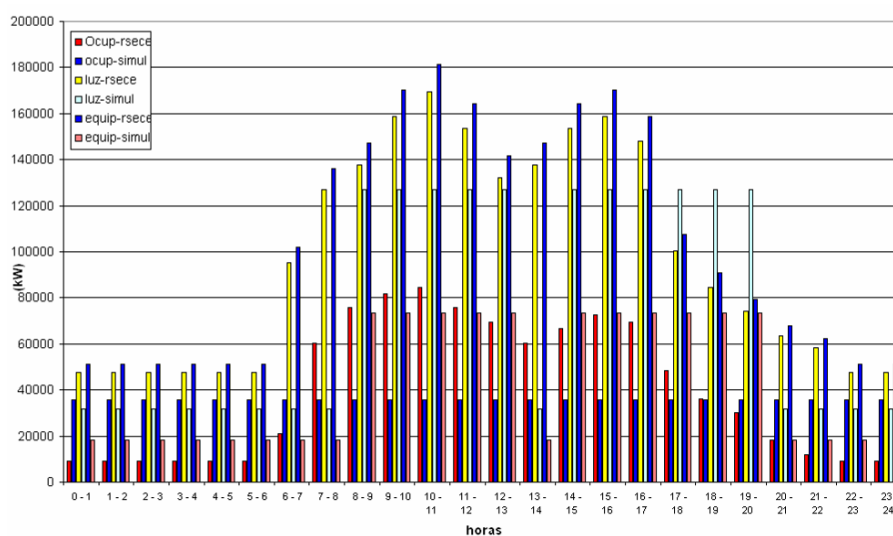


Figura 5.76 - Perfil de cargas térmicas adoptado no estudo e previsto no RSECE

### 5.3.1.3- Sistema de climatização

O edifício está dotado de um sistema de climatização centralizado, que se pode caracterizar como um sistema a ar e tectos aquecidos/arrefecidos a quatro tubos.

São especificadas como temperaturas de conforto para controlo do sistema de climatização 22°C no período de Inverno e 23°C no período de Verão.

O aquecimento e o arrefecimento do ar é realizado em 3 UTA (Unidades de Tratamento de Ar), em que o fluido de aquecimento/arrefecimento é a água. A água é aquecida numa bomba de calor, sendo o arrefecimento efectuado na bomba de calor e/ou num *chiller*. As características do *chiller* e da bomba de calor encontram-se indicadas no Quadro 5.19. Para fins específicos também se encontram instaladas duas unidades VRV e unidades de climatização de precisão, Quadro 5.19. Estes equipamentos perfazem uma potência de aquecimento instalada de 1 405 kW (172 W/m<sup>2</sup> área climatizada) e uma potência de arrefecimento de 1 245 kW (152 W/m<sup>2</sup> área climatizada). Para realizar a distribuição de ar o sistema dispõe de UTAs e ventiladores de extracção cujas características se resumem no Quadro 5.20 e que perfazem uma potência eléctrica total de 72,0 kW. O caudal constante de ar é insuflado à temperatura de 16°C. Pelos valores do

<sup>1</sup> As medições do consumo de energia foram efectuadas pelo ISQ no âmbito do projecto *Best Façade e do Annex 44 da IEA*.

caudal de ar novo insuflado é estimada uma taxa média de renovação do ar de 1,9 rph e um caudal de 2 l/s/m<sup>2</sup> área útil, ou seja um caudal correspondente a classe A de qualidade do ar interior CR 1752, 1998.

Quadro 5.19 - Resumo das características do chiller e bomba de calor

Designação	Chiller	Bomba de calor	VRV	Precisão	Splits
Unidades	1	1	2	14	15
Tipo	BG/WRAR/B 2404	WRAN/B 2404	-	-	
Gás	R 407C, carga 2×80 kg	R 407C, carga 2×80 kg	-	-	
<b>Potências (kW):</b>					
Eléctrica	185 / 206	185 / 210	19,3	44,1/4,23/26	31,3/0,75
Arrefecimento	498	495	34,2	136,2	80,8
Aquecimento	670	542	21,4	168,3	3,0
Humidificação	-	-	-	26	-

Quadro 5.20 - Resumo das características da ventilação

Designação	UTA	Ventiladores de extracção	Ventilo-convectores
Caudal de ar novo (m <sup>3</sup> /h)	66 122	-	-
Caudal de ar total (m <sup>3</sup> /h)	84 527	69 417	9910
Potência específica (ar total) W/(m <sup>3</sup> /h)	0,55	0,34	0,40
Aquecimento (kW)	302	-	23,2
Arrefecimento (kW)	573	-	39,3

Para ventilação e desenfumagem do estacionamento encontram-se instalados ventiladores axiais que perfazem uma potência total de 36,2 kW. Para circulação da água do sistema AVAC está instalada uma potência eléctrica de bombagem de 66,2 kW (caudal de água de 222,7 l/s, 297 W/(l/s)).

Tendo em conta as especificidades do edifício, o sistema AVAC funciona nos dias úteis das 5h30 às 19h00, ficando as UTA (sem água quente ou fria) a funcionar até às 23h00 para efectuar *free-cooling*.

### 5.3.2 - Avaliação do consumo de energia

Para analisar o impacte da fase de utilização do edifício, foi analisada a factura energética, foram efectuadas medições de consumos de energia e simulações do comportamento térmico e energético do edifício em regime dinâmico.

O consumo real de energia eléctrica do edifício de serviços no ano de 2006 foi de 3 884 353 kWh (427 kWh/m<sup>2</sup> ou 124 kgep/m<sup>2</sup> área útil), Figura 5.77. Na Figura 5.78 apresentam-se os resultados da desagregação do consumo de energia eléctrica do edifício com base nas medições efectuadas numa semana de Janeiro de 2006 e numa semana de Julho de 2006.

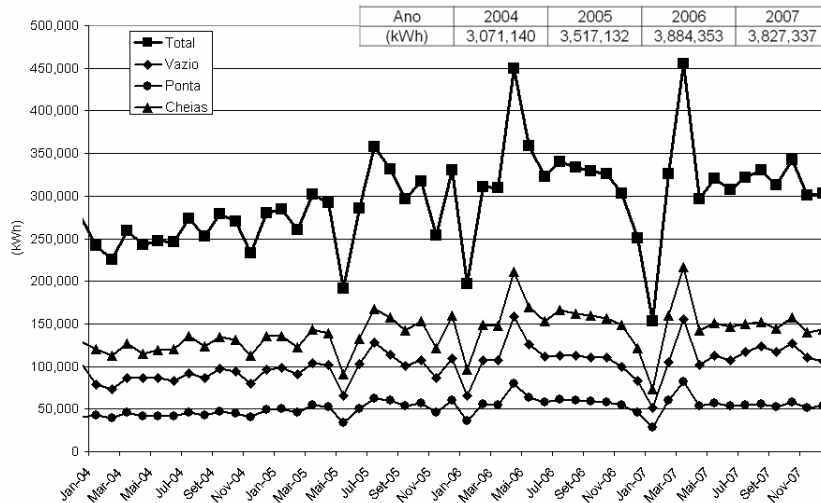
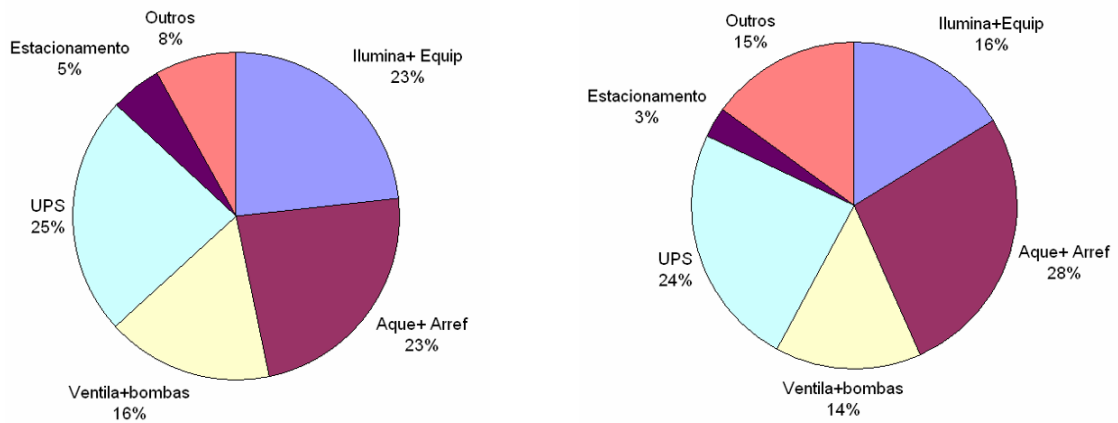


Figura 5.77 - Consumo de energia



auditoria semana de Janeiro (92 454 kWh)

auditoria semana de Julho (88 996 kWh)

Figura 5.78 - Desagregação do consumo de energia eléctrica no edifício de serviços - dados da auditoria

Na análise em regime dinâmico do comportamento térmico do edifício foi utilizado um piso tipo e o piso da cobertura, Figura 5.79, com os perfis de utilização referidos anteriormente.

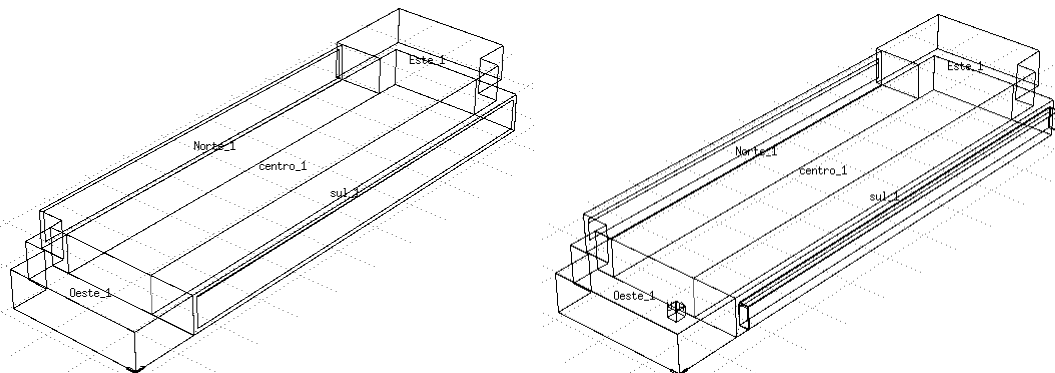


Figura 5.79 - Modelo do piso tipo e do piso da cobertura

Considerando uma temperatura interior de 22°C no aquecimento e de 23°C no arrefecimento e que o sistema AVAC se encontra desligado durante a noite são estimadas

necessidades térmicas de aquecimento e de arrefecimento de 25 kWh/m<sup>2</sup> e 81 kWh/m<sup>2</sup>, respectivamente. Na Figura 5.80 apresenta-se a desagregação do consumo de energia eléctrica com base na estimativa das necessidades térmicas determinadas na simulação anual do comportamento térmico e energético do edifício, na qual se verifica uma concordância razoável com os dados da auditoria.

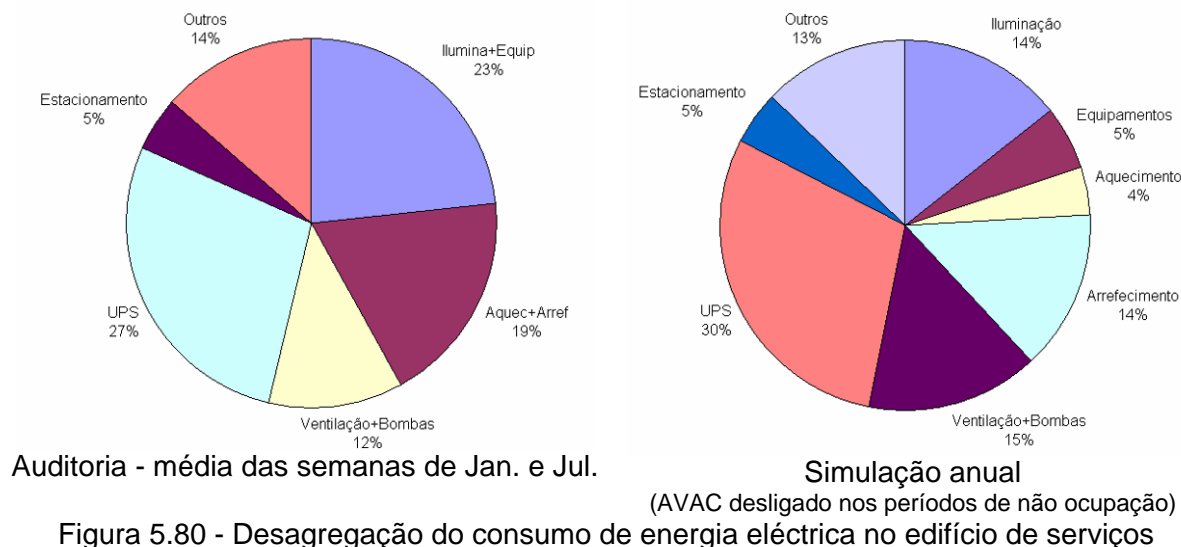


Figura 5.80 - Desagregação do consumo de energia eléctrica no edifício de serviços

Este edifício apresenta um elevado consumo de energia (124 kgep/m<sup>2</sup>), face aos valores típicos de edifícios de serviços referidos no capítulo 2 e face ao RSECE. É de salientar a elevada importância do consumo de energia do funcionamento da informática (30%) para o qual o edifício (construção) não tem impacto. Por outro lado, a envolvente, iluminação e a gestão do sistema de climatização poderá condicionar cerca de 50 % do consumo, nomeadamente as parcelas do aquecimento e arrefecimento (18%), ventilação e bombagem (17%) e iluminação (14%).

Da análise dos resultados da auditoria verifica-se que caso o sistema AVAC fosse desligado durante os períodos de não-ocupação e arrancasse 2 horas antes do início da sua utilização, seria possível reduzir em sensivelmente 32% (564 234 kWh) o consumo anual de energia eléctrica da climatização (chiller, bomba de calor, ventilação e bombagem), pois o circuito primário da climatização nunca é desligado. Caso o sistema de climatização fosse regulado para obter temperaturas interiores de 20°C a 25°C, de acordo com a simulação térmica, as necessidades de climatização poderiam ser reduzidas em 32 %, ou seja, seria possível reduzir em sensivelmente mais 182 389 kWh o consumo anual de energia eléctrica. Por outro lado, se fosse utilizado o controlo automático da iluminação tal poderia conduzir a uma redução substancial do consumo de energia, aqui considerada igual a 25%. Com estas três intervenções seria possível reduzir o consumo anual de energia eléctrica do edifício em 23%, para 3 017 533 kWh (332 kWh/m<sup>2</sup>/ano, 96,2 kgep/m<sup>2</sup>).

No Quadro 5.21 apresenta-se a estimativa de consumo de energia do edifício ao longo de 50 anos, considerando o actual perfil de consumo de energia e um perfil de consumo possível se fossem implementados os três mecanismos de conservação de energia identificados anteriormente (desligar AVAC quando edifício não está ocupado, utilizar controlo automático da iluminação e alterar temperaturas de conforto para 20°C e 25°C).

Quadro 5.21 - Estimativa do consumo de energia durante 50 anos

Utilização (50 anos)	Consumo actual (kWh)	Consumo possível (kWh)	
Consumo energia eléctrica - aquecimento	10 996 981	3 509 094	2%
Consumo energia eléctrica - arrefecimento	37 631 833	15 815 219	10%
Consumo energia eléctrica - ventilação e bombas	30 072 996	24 953 358	17%
Consumo energia eléctrica - iluminação	28 068 757	18 029 513	12%
Consumo energia eléctrica - equipamentos	10 477 029	8 973 000	6%
Consumo energia eléctrica - UPS	46 631 957	48 860 650*	32%
Consumo energia eléctrica - estacionamento	7 872 385	7 872 385	5%
Consumo energia eléctrica - outros	22 465 712	22 863 439*	15%
<b>Total</b>	<b>194 217 650</b>	<b>150 876 657</b>	<b>100%</b>

\* valores superiores devido ao perfil utilizado.

Tendo em conta que neste edifício apenas é consumida energia eléctrica, ao consumo actual de energia corresponde um consumo de energia primária de 124 kgep/m<sup>2</sup>, enquanto ao perfil possível corresponde 96 kgep/m<sup>2</sup>, portanto ambos superiores ao limite de 70 kgep/m<sup>2</sup> definido no RSECE (2006) para edifícios existentes<sup>1</sup>.

### 5.3.3 - Avaliação global do edifício

Da informação das secções anteriores, sobre as estimativas dos materiais do edifício (Quadro 5.2) e do consumo de energia (Quadro 5.21) é possível estimar o impacte ambiental do edifício ao longo do ciclo de vida de acordo com o método apresentado no capítulo 3.

Na Figura 5.81, apresentam-se os resultados da análise referente ao edifício com todos os consumos de energia referentes ao ano de 2006. Dessa figura verifica-se que o consumo de energia eléctrica, excluindo o aquecimento e o arrefecimento, corresponde a cerca de 70% da carga ambiental do edifício que é de 801,1 kPt (88 Pt/m<sup>2</sup>). Nesse sentido, salienta-se a pertinência da qualificação dos diversos equipamentos eléctricos e electrónicos de forma a reduzir este consumo de energia.

Seguidamente a análise centra-se nos aspectos relacionados com o edifício (construção, fim-de-vida, aquecimento e arrefecimento). Na Figura 5.82 apresentam-se os resultados da ACV do edifício para o *consumo actual* (244 kPt, 27 Pt/m<sup>2</sup>) e na Figura 5.83, na Figura 5.84 e no Quadro 5.4 com base no consumo de energia possível (132 kPt, 14,5 Pt/m<sup>2</sup>).

<sup>1</sup> Efectuando a análise do edifício com os perfis de cargas internas do RSECE obtém-se um consumo de energia primária de 71,4 kgep/m<sup>2</sup>.

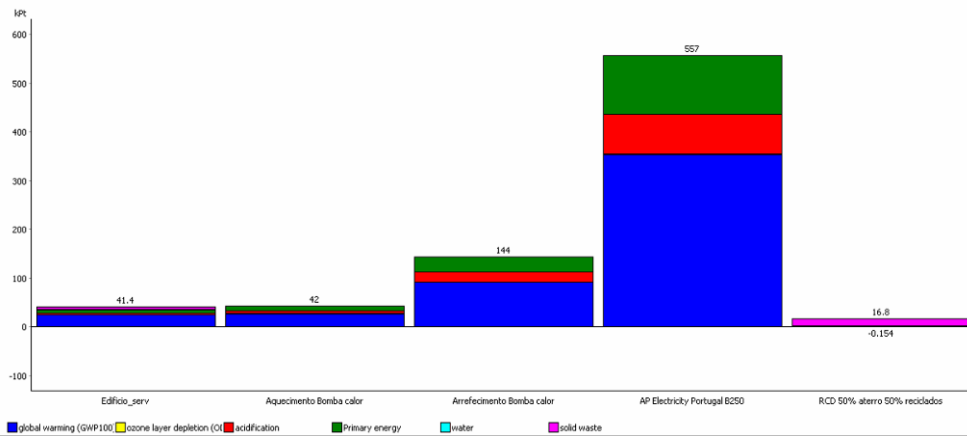


Figura 5.81 - Valores do indicador ambiental para ACV do edifício de serviços consumo de 2006

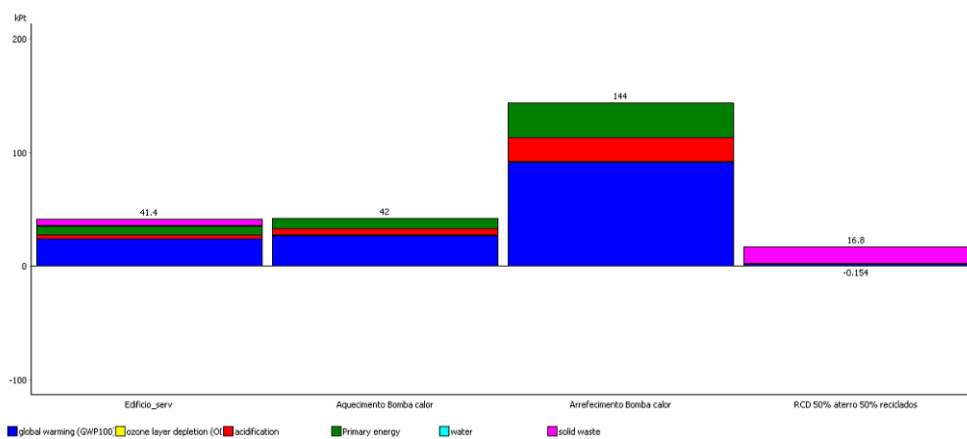


Figura 5.82 - Valores do indicador ambiental para ACV do edifício de serviços consumo 2006, excluindo electricidade outros

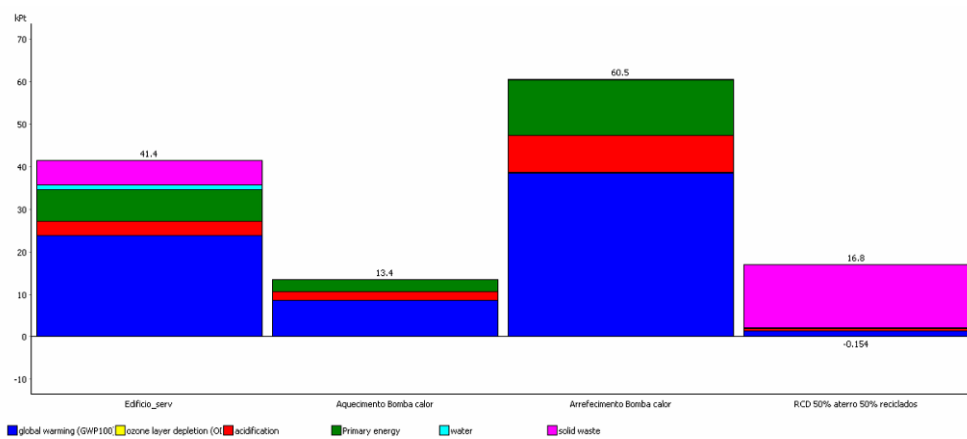


Figura 5.83 - Valores do indicador ambiental para ACV do edifício de serviços consumo possível, excluindo electricidade outros



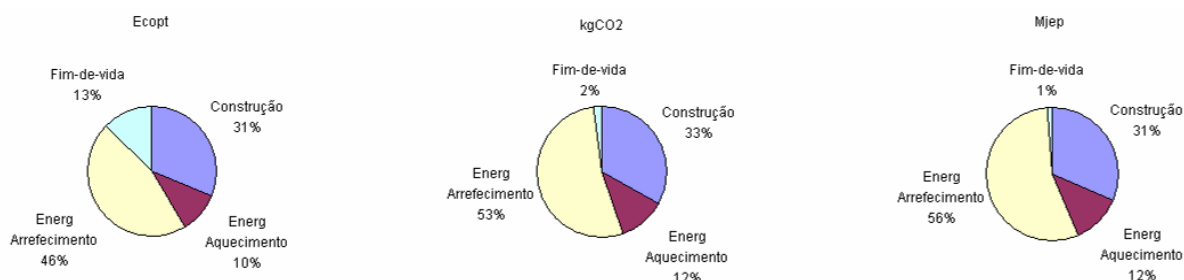


Figura 5.84 - Importância relativa na ACV do edifício de serviços - consumo possível

Quadro 5.22 - Avaliação do impacte ambiental do edifício de serviços 50 anos (consumo possível)

	tonCO <sub>2</sub>	GJep	Ecopt	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJep/m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>
Construção	5830	79200	41400	641	8703	4,55
Energia Aquecimento	2090	31000	13400	230	3407	1,47
Energia Arrefecimento	9420	140000	60500	1035	15385	6,65
Fim-de-vida	338	2940	16700	37	323	1,84
<b>TOTAL</b>	<b>17678</b>	<b>253140</b>	<b>132000</b>	<b>1943</b>	<b>27818</b>	<b>14,5</b>

Os valores referem-se à área útil.

Dos resultados baseados no consumo possível, conclui-se que a fase de construção (31%) e a fase de fim-de-vida (13%), apresentam um impacte importante face à energia para climatização, mesmo num edifício de serviços com um elevado consumo de energia de climatização<sup>1</sup>.

Na fase de construção, os elementos com maior impacte ambiental são os elementos mais pesados, nomeadamente as lajes e os elementos estruturais (“Elementos Int”, Figura 5.85). O sistema de climatização e a fachada dupla pele das fachadas norte e sul do edifício também apresentam um peso importante, devido à elevada energia incorporada nos materiais utilizados. Estes resultados evidenciam que para minimizar impacte ambiental dos edifícios se deve procurar reutilizar os elementos mais pesados (estrutura e lajes). Evidenciam também a importância ambiental dos vãos envidraçados do edifício (“Fachada dupla pela e janela AL CT”, Figura 5.85), neste caso superior ao das paredes exteriores com 60 mm de lã mineral (“Parede exterior”, Figura 5.85), pois existe uma elevada área envidraçada.

<sup>1</sup> Caso fossem considerados todos os consumos de energia (ventilação, bombas, equipamentos, iluminação, etc) era estimado um impacte de 635 kPt em que a fase de construção contribui com 7%, a fase de fim-de-vida com 3% e a climatização com 30% (7% aquecimento e 23% arrefecimento), portanto, considerado todos os consumos de energia (quer associados ao edifícios quer às actividades nele desenvolvidas) a fase de construção tem um impacte relativo menor.

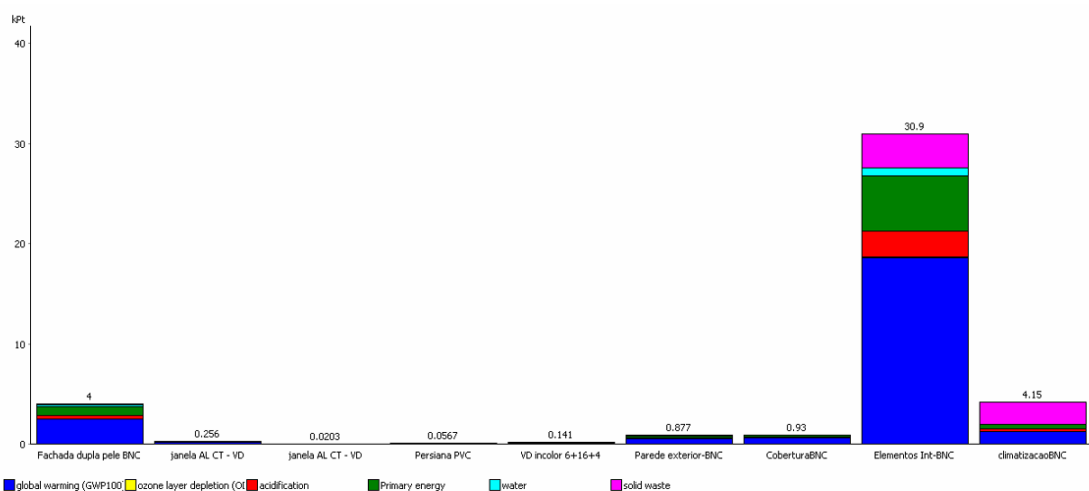


Figura 5.85 - Valores do indicador ambiental único para a fase de construção do edifício de serviços

### 5.3.4- Avaliação global do edifício com uma fachada tradicional

Tendo em conta e elevada área envidraçada deste edifício e os resultados apresentados na secção 4.2.3 efectua-se nesta secção o estudo de um edifício com a configuração anterior, mas com uma fachada “tradicional” em substituição da fachada dupla pele envidraçada. Na fachada exterior são utilizadas janelas de alumínio com vidro duplo incolor, estore veneziano interior e com uma área envidraçada de 20% da área de pavimento das zonas próximas do envidraçado (até uma distância de 5 m) e com uma solução de fachada do tipo ETICS, com parede simples de alvenaria de tijolo de 22 cm, 60 mm de isolante térmico e revestimento exterior.

Com base nesta nova configuração da envolvente as necessidades térmicas de aquecimento (20°C) são reduzidas em sensivelmente 5% e as necessidades de arrefecimento (25°C) são reduzidas em sensivelmente 13%, obtendo-se um consumo de energia estimado de 327 kWh/m<sup>2</sup>/ano (95 kgep/m<sup>2</sup>/ano). A estimativa do consumo do edifício ao longo do período de 50 anos encontra-se indicada no Quadro 5.23.

Quadro 5.23 - Estimativa do consumo de energia eléctrica durante 50 anos

Utilização (50 anos)	Fachada dupla pele (kWh)	Fachada tradicional (kWh)
Consumo energia eléctrica - aquecimento	3,509,094	3,325,906
Consumo energia eléctrica - arrefecimento	15,815,219	13,781,250
Consumo energia eléctrica - ventilação e bombas	24,953,358	24,953,358
Consumo energia eléctrica - iluminação	18,029,513	18,029,513
Consumo energia eléctrica - equipamentos	8,973,000	8,973,000
Consumo energia eléctrica - UPS	48,860,650	48,860,650
Consumo energia eléctrica - estacionamento	7,872,385	7,872,385
Consumo energia eléctrica - outros	22,863,439	22,863,439
<b>Total</b>	<b>150,876,657</b>	<b>148,659,501</b>

Da informação das secções anteriores, sobre as estimativas dos materiais do edifício (Quadro 5.18) e do consumo de energia (Quadro 5.23) é possível estimar o impacte ambiental

do edifício ao longo do ciclo de vida de acordo com o método apresentado no capítulo 3. Na Figura 5.86, Figura 5.87 e no Quadro 5.24 apresentam-se os resultados obtidos.

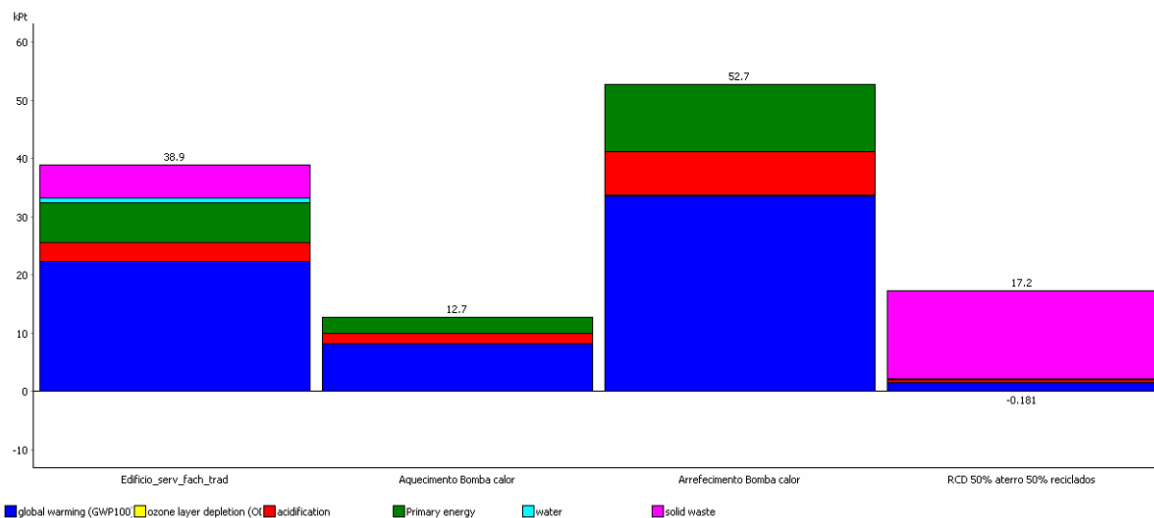


Figura 5.86 - Valores do indicador ambiental para ACV do edifício de serviços - consumo possível com fachada tradicional

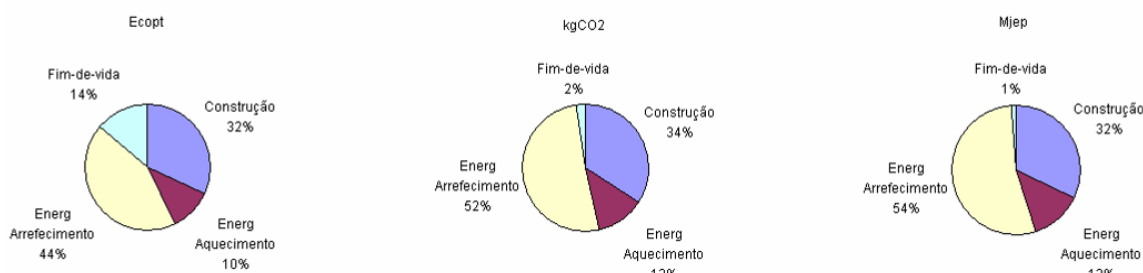


Figura 5.87 - Importância relativa na ACV do edifício de serviços - consumo possível fachada tradicional

Quadro 5.24 - Avaliação do impacte ambiental do edifício de serviços com fachadas tradicionais - 50 anos consumo possível

	tonCO <sub>2</sub>	GJep	Ecopt	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	Mjep/m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>
Construção	5460	73200	38900	600	8044	4,27
Energia Aquecimento	1980	29400	12700	218	3231	1,40
Energia Arrefecimento	8210	122000	52700	902	13407	5,79
Fim-de-vida	358	2840	17000	39	312	1,87
<b>TOTAL</b>	<b>16008</b>	<b>227440</b>	<b>121300</b>	<b>1759</b>	<b>24993</b>	<b>13,3</b>

Os valores referem-se à área útil.

Destes resultados, a fase de construção (32%) e a fase de fim-de-vida (14%) apresentam um impacte ambiental importante face aos recursos directamente relacionados com o edifício. Esta solução de fachada permite reduzir em sensivelmente 8% o impacte ambiental do edifício face à solução com a fachada dupla envidraçada, principalmente

devido à redução das necessidades de arrefecimento (13%), na fase de construção (6%) e das necessidades de aquecimento (6%)<sup>1</sup>.

Estes resultados evidenciam que para minimizar o impacto ambiental dos edifícios se deve procurar minimizar as necessidades energéticas, bem como se deve procurar utilizar materiais com menor impacto ambiental e com potencial de reutilização.

### 5.3.5 - Avaliação de soluções alternativas para melhoria do desempenho térmico

Na secção 4.2.4 foram estudadas soluções de fachada dupla pele envidraçada do tipo *box-window*, foi efectuada a avaliação do comportamento térmico do edifício com a solução de fachada dupla pele não ventilada, com vidro exterior cinza e vidro duplo baixo emissivo do lado interior, que permitiria reduzir as necessidades de climatização em 30% face à solução da obra. Por outro lado, em relação à configuração edifício com fachada tradicional foi avaliada a influência da alteração da espessura do isolamento térmico da envolvente. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.88.

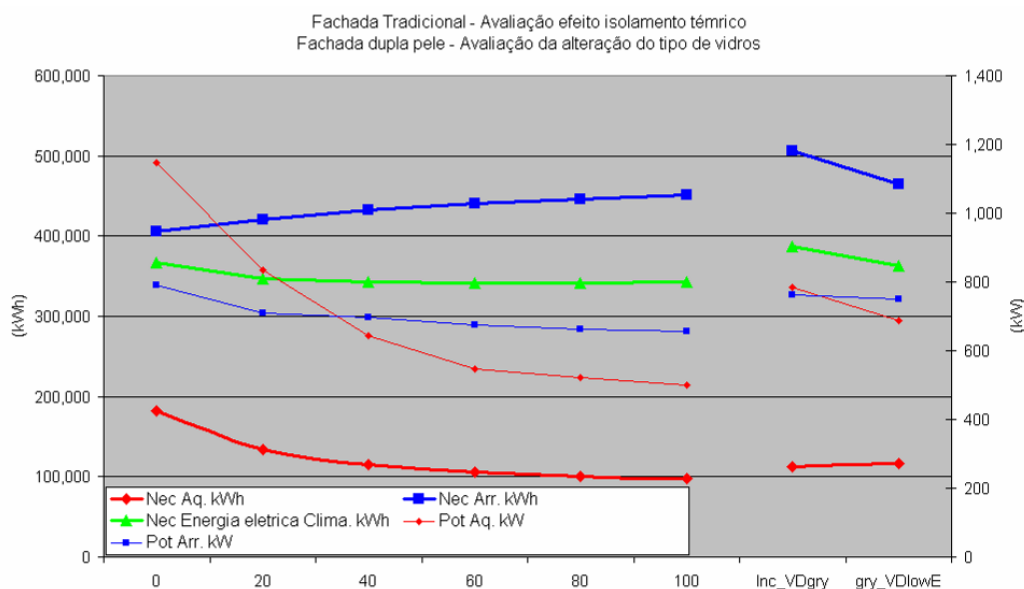


Figura 5.88 - Avaliação do impacto de soluções alternativas nas necessidades de climatização

Dos resultados obtidos regista-se:

- No edifício com fachada tradicional para espessuras de isolamento acima de 40 mm, por cada incremento de 20 mm, obtém-se uma redução das necessidades energéticas negligenciável, inferior a 1%, pois a redução das necessidades de aquecimento é contrabalançada pelo incremento das necessidades de arrefecimento. Por outro lado, regista-se uma redução significativa na potência de aquecimento.
- Na situação de edifício com fachadas tradicionais (60 mm de isolamento) até seria possível dispensar a instalação de aquecimento, pois o número de horas com temperatura interior inferior a 17°C é de sensivelmente 20 horas; não sendo contudo

<sup>1</sup> Caso fossem considerado todos os consumos de energia era estimado um indicadores ambiental de 624 kPt, face aos 635 kPt da solução com fachada dupla pele.

possível dispensar o sistema de arrefecimento, pois o número de horas com temperatura superior a 29°C é de 900 horas.

- A “otimização” dos envidraçado da fachada dupla pele permite reduzir em sensivelmente 6% as necessidades energéticas de climatização face à solução de fachada existente, pois existem ganhos térmicos superiores aos considerados na secção 4.2.4, bem como o edifício tem uma zona open-space que não é afectada pelo desempenho da envolvente. Apesar da melhoria, esta solução de fachada apresenta também um consumo de energia superior em 6% face à solução de fachada tradicional com 60 mm de isolante térmico.

### 5.3.6 - Síntese

Neste secção foi estudado um edifício com consumo de energia relativamente elevados, devido em grande parte a equipamentos e a uma inadequada gestão da iluminação e do sistema AVAC. Com base nos consumos reais é estimado um consumo nominal de energia de 124 kgep/m<sup>2</sup> e o indicador ambiental único de 88 Pt/m<sup>2</sup>, um valor muito superior ao valor de típico de 15 Pt/m<sup>2</sup> dos casos de estudo de habitação (Quadro 5.25). Melhorando a gestão do AVAC e da iluminação é possível reduzir o consumo de energia a 96 kgep/m<sup>2</sup>, ou seja 69,8 Pt/m<sup>2</sup>. Neste edifício existem equipamentos que consomem cerca de 60% da energia, pelo que não é fácil baixar o consumo de energia sem melhorar a eficiência desses equipamentos.

Centrando a ACV nas componentes de construção, fim-de-vida, aquecimento e arrefecimento (20% do problema) é estimado um impacte ambiental de 14,5 Pt/m<sup>2</sup> para o perfil de consumo de energia possível. Nestas circunstâncias, o impacte da construção e fim-de-vida corresponde a cerca de 44% do ciclo de vida do edifício<sup>1</sup>. Optimizando a envolvente através da alteração do tipo de vidros é possível reduzir o impacte ambiental em cerca de 3% (14,0 Pt/m<sup>2</sup>). Por outro lado se fosse aplicada uma fachada tradicional era possível reduzir o impacte ambiental em cerca de 8% (13,3 Pt/m<sup>2</sup> e 95 kgep/m<sup>2</sup>). Da análise efectuada ao impacto do isolamento térmico da envolvente opaca regista-se que este não tem praticamente significado, sendo razoável adoptar 40 mm de isolamento térmico. Neste edifício, adoptando os critérios de conforto adaptativo seria possível dispensar o sistema de aquecimento, mas teria de se dispor de meios de arrefecimento, devido às grandes cargas internas.

No Quadro 5.25 resumem-se os resultados da ACV dos três casos de estudo, de onde se conclui que nos edifícios de escritórios o impacte do edifício (construção, climatização e fim-de-vida) poderá corresponder a cerca de 20% do impacte ambiental do ciclo de vida do edifício, sendo esse valor de 30% para o edifícios de habitação multifamiliar e 45% para a moradia. Da Figura 5.89 pode verificar-se que a fase de construção e de fim-de-vida pode corresponder a cerca de 10% a 40% do impacte ambiental do ciclo de vida de edifício e que se a análise se centrar apenas nos aspectos intrinsecamente relacionados com o edifício (construção, fim-de-vida e climatização) a relevância é de 20% a 90%.

---

<sup>1</sup> Se forem tidos em conta todos os consumos de energia do edifício esta relevância da construção e fim-de-vida é reduzida para 10% e o impacte da energia de climatização para 30%, devendo procura-se minimizar o consumos de energia dos diversos equipamentos e da iluminação.

Tendo em conta que este edifício tem uma arquitectura e utilização que limita o aproveitamento da luz natural nas zonas do open-space, não facilita a implementação de sistemas de ventilação, é de realçar que em edifício onde seja possível tirar partido das técnicas solares passivas e nos quais as cargas térmicas internas sejam menores, os consumos de energia durante a utilização sejam menores e, portanto, a relevância dos impactes ambientais na construção e no fim-de-vida sejam ainda maiores do que os aqui determinados.

Quadro 5.25 - Resumos de indicadores do impacte ambiental do ciclo de vida de edifícios

Edifício:	Moradia		Apartamento		Escritórios (real) <sup>2</sup>		Escritórios (possível) <sup>1</sup>	
Unidades:	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>
Tudo	1471	13,4	1793	15,4	13 407	88	10 560	70
Construção, Climatização, Fim-de-vida	593	6,1	471	4,8	3 859	27	1 943	14,5
Construção	474	3,3	380	2,8	641	4,6	641	4,6
Energia Climatização	74	0,5	60	0,4	3 181	20,4	1 265	8,1
Fim-de-vida	45	2,4	31	1,7	37	1,8	37	1,8

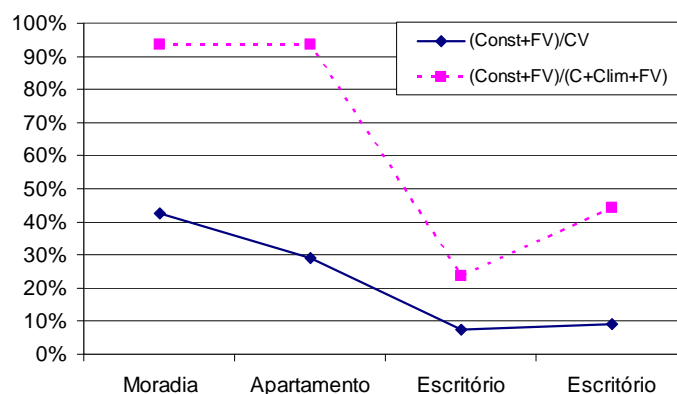


Figura 5.89 - Importância relativa da construção e fim-de-vida no ciclo de vida do edifício

<sup>1</sup> Ver Quadro 5.21.

## 6- CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1- CONTRIBUIÇÕES DA TESE

#### 6.1.1- Análise do ciclo de vida

A investigação realizada tinha por objectivo estimar o impacte ambiental dos edifícios no clima Português ao longo do ciclo de vida através da aplicação da metodologia de análise do ciclo de vida e avaliar a relevância da fase de construção face aos consumos de energia de climatização e avaliar em maior detalhe as implicações nas necessidades de climatização do isolamento térmico da envolvente, da permeabilidade ao ar e das propriedades dos envidraçados.

Da aplicação da análise de ciclo de vida a edifícios novos, com base no indicador ambiental único, pode concluir-se que uma das parcelas preponderantes no impacte ambiental é a energia consumida pelos diversos equipamentos (70% no edifício de serviços, 30% a 35% nas habitações a que acresce 13% referente às AQS), portanto é fundamental a adopção de equipamentos eléctricos e electrónicos eficientes.

Nos casos de estudo o impacte ambiental do edifício e da energia de climatização é de sensivelmente 30% a 45% nas habitações<sup>1</sup> e de 30% no edifício de serviços<sup>2</sup>. Centrando a análise nestas componentes que são intrínsecas ao edifício, verificou-se que nas habitações a carga ambiental da fase de construção e de fim-de-vida corresponde a cerca de 80% (30% a 40% do total) e que no edifício de serviços corresponde a 45% (14% do total). Portanto, conclui-se que o impacte ambiental da construção é relevante quando comparado com a energia de climatização (Quadro 6.1), tendo um peso substancialmente maior do que o verificado nos países mais frios.

Deste modo, numa perspectiva global, para minorar o impacte ambiental dos edifícios é fundamental reduzir o consumo de energia dos diversos equipamentos utilizados nos edifícios (informática, elevadores, electrodomésticos, AQS, etc), o que é objecto sistemas de etiquetagem energética. No que se reporta ao edifício e à climatização, para minimizar os impactes ambientais e a emissão de gases de efeito de estufa concluiu-se ser tão ao mais importante reduzir a carga ambiental da construção e fim-de-vida como a da climatização, nas habitações, mas também no edifício de serviços. Este aspecto é particularmente importante porque na construção nova o impacte da construção é imediato. Assim, uma das formas eficientes de reduzir o impacte ambiental dos edifícios passa por privilegiar a reabilitação de edifícios existentes, reutilizando pelo menos a estrutura e as lajes.

---

<sup>1</sup> Considerando o consumo de energia para climatização, AQS, electricidade para utilidades e a água para o consumo humano.

<sup>2</sup> Considerando o consumo de energia para climatização, electricidade para utilidades.

Quadro 6.1 – Indicadores do impacte ambiental dos casos de estudo

<b>Edifício:</b>	<b>Moradia<sup>1</sup></b>		<b>Apartamento</b>		<b>Escritórios</b>		<b>Escritório</b>	
Unidades:	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	Ecopt/m <sup>2</sup>
Tudo	1471	13,4	1793	15,4	13 407	88	10 560	70
Construção, Climatização, Fim-de-vida	593	6,1	471	4,8	3 859	27	1 943	14,5
Construção	474	3,3	380	2,8	641	4,6	641	4,6
Energia Climatização	74 <sup>(1)</sup>	0,5 <sup>(1)</sup>	60 <sup>(1)</sup>	0,4 <sup>(1)</sup>	3 181 <sup>(2)</sup>	20,4 <sup>(2)</sup>	1 265 <sup>(3)</sup>	8,1 <sup>(3)</sup>
Fim-de-vida	45	2,4	31	1,7	37	1,8	37	1,8

(1) Valor referente ao limite regulamentar para 1200 GD (Lisboa).

(2) Valor referente ao consumo real de um edifício em Lisboa.

(3) Valor possível no edifício em Lisboa implementando algumas medidas de URE.

Com a ACV das habitações concluiu-se que para minimizar o impacte ambiental existe um limite para o isolamento térmico a partir do qual a redução das necessidades térmicas não compensa o aumento da carga ambiental do aumento da espessura do isolante térmico. Para os casos analisados concluiu-se que a espessura limite é de 60 mm em Faro e de 100 mm em Lisboa e Bragança. Efectuando uma análise da viabilidade económica do nível de isolamento térmico para um período de retorno de 8 anos, obtêm-se espessuras de isolamento térmico significativamente inferiores às anteriores (Figura 5.32, Figura 5.68), pelo que, para uma construção sustentável, na definição dos limites regulamentares do desempenho térmico dos edifícios se poderá adoptar como limiar inferior o nível de isolamento que seja viável economicamente e para extremo superior (edifícios classe A) os valores atrás indicados que minimizam o impacte ambiental dos edifícios no seu ciclo de vida. No edifício de serviços estudado o efeito do isolante térmico a partir da espessura de 40 mm é negligenciável (Figura 5.88).

Em relação aos vãos envidraçados, constatou-se a vantagem da utilização de caixilharia de madeira (durável e de origem controlada) ou de PVC, devido ao seu menor impacte ambiental na construção e também devido ao seu maior isolamento térmico. Contudo, se forem adoptados perfis de alumínio reciclado e que sejam reciclados no fim-de-vida então o desempenho ambiental da caixilharia de madeira e de alumínio são equivalentes. De uma forma geral os vidros duplos baixo emissivos apresentam menor impacte ambiental (Bragança e Lisboa), podendo em climas mais quentes (Faro) a opção pender para o vidro duplo incolor. A utilização de caixas-de-ar de Árgon pode ser razoável, contudo deve ser evitada a utilização de gases raros como Krypton ou Xénon, pois as poupanças de energia não compensam a carga ambiental incorporada.

Os impactes das instalação de climatização na fase de construção são relativamente baixos quando comparados com o edifício, cerca de 3% (Figura 5.6 e Figura 5.38). O maior impacte ambiental advém do consumo de energia durante a utilização. Pelo que se considera importante otimizar a envolvente do edifício de forma a limitar o número de horas de desconforto e a tentar dispensar a instalação de equipamentos de arrefecimento, que se verificou ser possível nos edifícios de habitação e em edifícios de serviços situados na zona

<sup>1</sup> Admitindo 1 kg de RSU/d/p, durante 50 anos tal conduz a 4800 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> na moradia e 8300 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> no multifamiliar, revelando a necessidade de um adequado tratamento dos RSU para minimizar o potencial de aquecimento global.



I1/V1 e com baixas cargas térmicas internas. No edifício de serviços estudado verificou-se que podia ser dispensada a aplicação de sistema de aquecimento.

Na Figura 6.1 apresenta-se uma ordem de grandeza da alteração do indicador de impacte ambiental de habitações associado à alteração da espessura de isolamento térmico, às propriedades dos envidraçados, à temperatura interior de conforto, à reciclagem e reutilização dos elementos de construção, ao sistema de ventilação e ao caudal de ventilação associado à classe de emissão de poluentes para o ar interior. Dessa figura conclui-se da importância da energia eléctrica com base em fontes renováveis (por exemplo, hídrica ou painéis fotovoltaicos) e da reciclagem e reutilização no fim-de-vida.

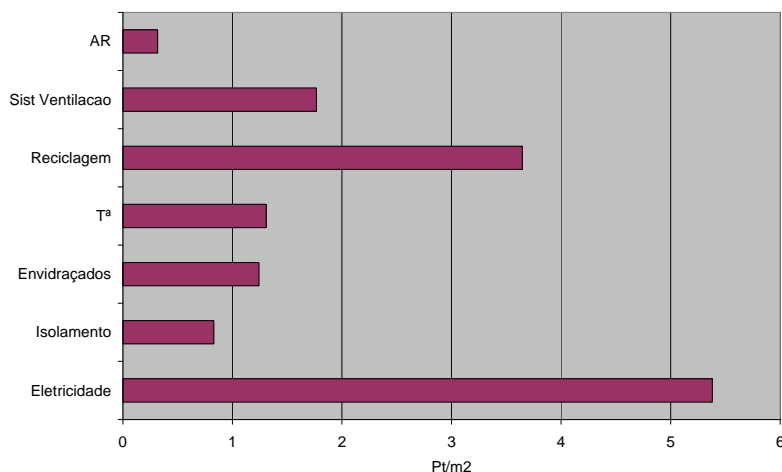


Figura 6.1 – Gama de variação do indicador ambiental em habitações

Durante o estudo foram investigados alguns aspectos cujos principais conclusões se detalham seguidamente:

- O indicador ambiental único ecopontos definido no capítulo 3, baseado nos ecopontos do UK, revelou-se satisfatório para a ACV dos edifícios e materiais de construção, pois uma análise baseada no indicador “ecoindicator 99 H/H” apresentou resultados correspondentes aos dos ecopontos. Contudo o indicador ecopontos tem a vantagem de incluir algumas categorias de impacte ambiental às quais as pessoas são mais sensíveis, nomeadamente consumo de energia primária, emissões de CO<sub>2</sub>, resíduos, consumo de água e potencial de destruição da camada de ozono, apesar de não considerar alguns aspectos relevantes como por exemplo a ecotoxicidade (incorporada no ecoindicator 99). Contudo a ecotoxicidade e as outras categorias para os materiais de construção apresentam um peso relativamente pequeno face às 5 categorias de impacte ambiental incluídas nos ecopontos (Figura 5.69 e Figura 5.70).
- Na análise do desempenho ambiental de paredes foi evidenciado que a adopção dos ecopontos como indicador do impacte ambiental pode conduzir a resultados ligeiramente diferentes dos previstos apenas com a energia incorporada, pois no indicador ambiental único encontram-se ponderados outros aspectos ambientais, como os resíduos, permitindo ter uma avaliação ambiental mais abrangente.
- Foi mostrado que as soluções de fachadas envidraçadas apresentam um impacte ambiental superior às fachadas tradicionais de alvenaria com áreas envidraçadas limitadas (20% área de pavimento). Se na constituição da fachada for adoptado alumínio reciclado e no fim-de-vida esse alumínio voltar a ser reciclado, então o desempenho da

fachada totalmente envidraçada na fase de construção poderá ser menor que o das paredes tradicionais. Em relação às fachadas dupla pele, pelas razões anteriores, estas apresentam um impacto ambiental superior ao das fachadas tradicionais, mesmo na condição de utilização de alumínio reciclado.

- Da ACV efectuada a fachadas com envidraçados de 20% da área de pavimento, verificou-se que os caixilhos de madeira ou PVC são os que apresentam menor impacto ambiental. Em climas como Lisboa e Faro é curioso registar que os perfis de alumínio monolítico apresentam um impacto ambiental menor que os perfis de alumínio com corte-térmico na ocupação contínua e equivalente na ocupação gabinete pois, as poupanças de energia associadas aos perfis de alumínio com corte-térmico são contrabalançadas pela maior carga ambiental devido à maior massa de alumínio e à inclusão de poliamidas nos perfis de corte-térmico. As soluções de fachada leve (e protecção solar interior) na ocupação tipo gabinete apresentam pior desempenho térmico e ambiental que a fachada tradicional com 20% de área de vidro.
- Nos sistemas de ventilação de habitações (este aspecto não foi avaliado no edifícios de e serviços) verificou-se a vantagem dos sistemas de ventilação natural e mista face à ventilação mecânica centralizada, pois os sistemas mecânicos centralizados apesar de conduzirem a menores necessidades térmicas, são penalizados pelo consumo de energia dos ventiladores e pela maior carga ambiental dos seus materiais. Da análise efectuada, os sistemas de ventilação mecânica com recuperação de calor apresentam também menor eficiência ambiental, mesmo em climas como Bragança, apesar de terem melhor desempenho térmico.
- É evidenciado que o controlo da permeabilidade ao ar pode ter uma importância superior à alteração da espessura do isolamento térmico em Lisboa e Faro e poderá ter um impacto equivalente ao acréscimo de 20 mm na espessura do isolamento da envolvente em Bragança. No caso do edifício multifamiliar limitar a permeabilidade ao ar permite reduzir o impacto ambiental do edifício em sensivelmente 30% em Faro, 25% em Lisboa e 11% em Bragança. A limitação da permeabilidade ao ar da envolvente usualmente não implica um acréscimo de recursos materiais ou componentes particularmente sofisticados, pelo que é uma forma eficaz de melhorar a eficiência energética e ambiental dos edifícios.
- Foram definidas as condições de conforto térmico a adoptar na ACV dos edifícios, tendo em conta as propostas sobre o conforto adaptativo e foram estabelecidos critérios, baseados na pesquisa bibliográfica, de forma a decidir sobre a necessidade de instalar sistemas de climatização. Tendo em conta as condições de conforto adaptativo verificou-se que através de uma concepção e isolamento térmico adequado dos edifícios de habitação é possível dispensar a instalação de sistemas de arrefecimento nos climas de Lisboa e Bragança, sendo recomendada a sua existência em climas mais quentes como o de Faro, pois o número de horas de desconforto (temperatura superior a 29°C) pode exceder 100 horas por ano. Em relação ao Inverno, verificou-se que mesmo em Faro é recomendável a instalação de sistemas de aquecimento, pois o número de horas de desconforto (temperatura inferior a 17°C) é superior a 1000 horas por ano. No estudo do gabinete com baixas cargas térmicas internas foi possível verificar que na zona climática I1/V1 são verificados os requisitos para dispensar a utilização de aquecimento e de arrefecimento. Nos espessos com ocupação contínua e com cargas térmicas internas importantes não são verificados os critérios para dispensar a instalação dos sistemas de

climatização. Salienta-se que estes são resultados determinados no contexto definido no texto e que em edifícios diferentes ou com perfis de utilização diferentes deve proceder-se a uma análise em regime dinâmico<sup>1</sup>.

- A utilização das condições de conforto padrão para edifícios climatizados aumenta significativamente (por vezes 100%) as necessidades de climatização, pelo que uma das primeiras medidas de minimização das necessidades de climatização passa pelo alargamento da gama de temperaturas de conforto e por aplicar termóstatos que limitem temperaturas excessivamente quentes no Inverno e frias no Verão.
- Foi concluído que os envidraçados de grande dimensão podem afectar as condições de conforto local no interior, sendo propostas medidas de minimização. Nesses casos foi evidenciada a importância de ser utilizado como parâmetro a temperatura operativa em vez da temperatura do ar, pois devido à temperatura superficial do vidro poderá ser necessário aumentar/diminuir em 2°C a temperatura do ar para compensar as trocas de calor por radiação.
- Foram estudados e propostos caudais de ventilação para os edifícios de habitação, tendo em conta o clima Português e os pressupostos em relação à taxa de emissões de poluentes para o ar interior dos materiais. Com base no estudo realizado é formulada uma proposta para os caudais de ventilação em habitações que permite controlar a humidade relativa interior (fundamental para prevenir o desenvolvimento de microrganismos) e os poluentes típicos. Foram avaliados em termos numéricos e experimentais a adequação dos caudais de ventilação de extracção em instalações sanitárias e cozinhas. Do estudo realizado é evidenciado que os caudais de ventilação podem variar consoante o clima, nomeadamente devido à influência do vapor de água do ar exterior.

### 6.1.2 - Vãos envidraçados

Foi analisado o impacto da área envidraçada e do tipo de envidraçado no desempenho térmico e energético (climatização e iluminação) de espaços do tipo gabinete com ocupação temporária e de um quarto com ocupação e climatização contínua, por exemplo do tipo quarto de internamento. As conclusões principais do trabalho apontam no sentido de que deve ser limitada a área envidraçada da envolvente, consoante o clima, a localização da protecção solar e o tipo de ocupação do espaço. A minimização das necessidades térmicas é normalmente conseguida com a aplicação de vidros duplos baixo emissivos e caixilharia isolante, de madeira ou PVC. Apesar do vidro duplo baixo emissivo minimizar as necessidades energéticas anuais de climatização em vários casos, com as áreas envidraçadas optimizadas, as diferenças face ao vidro duplo corrente são pouco significativas, comprometendo a viabilidade económica desta solução. No estudo efectuado considerou-se que a ventilação era intensificada no período de verão e quando a temperatura exterior permite arrefecer o interior, por exemplo, através da abertura de janelas ou *free-cooling* do sistema de ventilação.

---

<sup>1</sup> Neste âmbito salienta-se que no RSECE face a uma simulação dinâmica que evidenciasse um número reduzido de horas de desconforto que satisfizesse aos critérios definidos no capítulo 3 se deveria considerar a ausência de consumo de energia de climatização, em vez de se considerar que esse espaço será climatizado a 20°C ou 25°C com um sistema de referência de baixa eficiência, penalizando as soluções solares passivas.

Seguidamente detalham-se alguns dos principais resultados do estudo paramétrico do desempenho dos envidraçados:

- Da análise do desempenho térmico e energético dos envidraçados na ocupação do tipo gabinete foi evidenciado que devem ser evitadas grandes áreas envidraçadas na fachada, sendo suficiente dispor de uma área de sensivelmente 20 a 30% da área de pavimento, dependente da zona climática, da exposição solar e da protecção solar ser exterior ou interior ao envidraçado, quadro 4.46.
- Quando se pretender adoptar vidros de grande dimensão (por razões estéticas, comerciais, etc) deve seleccionar-se vidros baixo emissivos e protecção solar exterior, por exemplo estore veneziano, palas, etc.
- No caso de espaços com ocupação contínua a área envidraçada não deve exceder 15% da área de pavimento pois existe um aumento das necessidades energéticas com o aumento da área envidraçada. No caso de espaços não ocupados e sem ganhos internos de calor as necessidades energéticas de climatização diminuem com o aumento da área envidraçada para os vidros duplos com protecção solar exterior e nos restantes casos a área envidraçada não deve exceder 20% na zona climática V1 e 15% na zona V2 e V3.
- É verificado que os vidros simples, que se encontram em desuso, apresentam necessidades energéticas superiores às dos vidros duplos. Face ao pequeno acréscimo de custo dos vidros duplos face ao vidro e simples e as melhorias de conforto térmico e acústico que este proporciona, o vidro duplo deve ser a solução de referência para os envidraçados.
- No gabinete exposto a sul o aumento da inércia térmica (removendo o pavimento e o tecto falso) reduz as necessidades térmicas de arrefecimento, contudo aumenta as necessidades de aquecimento, pois limita o aquecimento mais rápido do interior com os ganhos solares, pelo que se a protecção solar for interior ao vidro o aumento da inércia conduz a um ligeiro decréscimo das necessidades de climatização e o oposto para a protecção exterior.
- Foi apreciado o desempenho de uma fachada dupla pele do tipo *box-window* e foi mostrada a ineficiência de fachadas não-ventiladas no clima Português, devendo optar-se por fachadas com aberturas controladas ou então com aberturas permanentes para o exterior. Na fachada sul para minimizar as necessidades energéticas regista-se a vantagem de aplicar vidro com baixo factor solar na pele exterior. Na pele interior é vantajoso aplicar um vidro duplo baixo emissivo, tanto na fachada sul com na fachada norte. Mesmo com aberturas fixas as fachadas dupla pele apresentam pior desempenho que uma fachada tradicional ( $A_{env}=20\%A_p$ ), contudo podem constituir uma boa solução quando se pretende dispor de uma envolvente com uma grande área transparente, sem agravar muito o desempenho térmico do edifício.
- Foi verificado teoricamente e experimentalmente que as palas de sombreamento permitem reduzir os ganhos solares na estação de arrefecimento, desde que tenham uma dimensão de sensivelmente metade da altura do envidraçado. Foi verificada a concordância dos resultados experimentais com os obtidos nas simulações do modelo ESP-r. Nas células de teste com um vão com vidro duplo incolor e espaço com inércia térmica fraca, as palas de sombreamento podem reduzir a temperatura interior em

sensivelmente 7°C em Junho e Setembro. Dos resultados obtidos regista-se que a utilização de palas é eficaz para complemento das protecções solares interiores e quando são utilizados envidraçados de área generosa, não atingindo contudo o desempenho de um estore veneziano exterior.

- O impacto dos perfis é significativo essencialmente na estação de aquecimento, sendo a diferença entre os vários materiais dos perfis tanto maior quanto mais frio for o clima e é mais importante em espaços com ocupação contínua do que com ocupação intermitente.
- Procurou-se desenvolver um método experimental em células passivas destinado a determinar o factor solar de vãos envidraçados o qual apresenta uma incerteza relativamente elevada de  $\pm 0,10$  e, portanto, não é eficaz para soluções com baixo factor solar. Contudo, deste estudo foi evidenciado que existe uma gama alargada de valores do factor solar que pode permitir obter um erro RMS inferior a 1°C, entre os valores experimentais e teóricos.
- Do estudo de várias configurações do gabinete exposto a sul regista-se um agravamento das necessidades energéticas anuais com o aumento do caudal de ventilação, pelo que é importante limitar as emissões de poluentes no interior de forma a reduzir as necessidades de ventilação.

Salienta-se que para aproveitar o potencial dos envidraçados é necessário dispor de um sistema de iluminação artificial eficiente e com meios de controlo, pois em edifícios de serviços o consumo de energia de iluminação pode corresponder a 27 a 60 kWh/m<sup>2</sup>/ano (775 a 1790 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> em 50 anos), bem como aumenta as necessidades de arrefecimento e neste caso ser-se-ia conduzido a vãos de pequena dimensão e com baixo factor solar.

### **6.1.3 - Permeabilidade ao ar e ventilação**

Apesar da construção "pesada" existente em Portugal verificou-se experimentalmente que a permeabilidade n50 pode variar entre 1,8 a mais de 10, sendo registado um valor médio de 5 com base em 32 resultados de ensaios. Com esta gama alargada de permeabilidade ao ar, demonstrou-se que podem existir infiltrações de ar importantes, que podem aumentar substancialmente (duplicar) as necessidades térmicas dos edifícios, principalmente as necessidades de aquecimento. Desta forma concluiu-se que a permeabilidade ao ar é um parâmetro importante para a qualidade térmica dos edifícios e para a eficiência energética que deve ser controlado.

Com base no conhecimento da permeabilidade ao ar dos edifícios, foram estabelecidos limites para a permeabilidade ao ar da envolvente de forma a minorar as necessidades térmicas, tendo em conta o clima Português, Quadro 6.2 e Quadro 6.3.

Em apartamentos de um mesmo edifício de habitação multifamiliar foram medidos n50 que variam entre 3,1 a 7,2, evidenciando que apesar de se tratarem dos mesmos materiais e realizados na mesma altura pela mesma empresa, existem aspectos de execução em obra que condicionam a permeabilidade de cada zona. Nesse sentido considera-se necessário especificar a realização de ensaios de pressurização dos edifícios após a construção de forma a comprovar os valores pretendidos. Este ensaio é um complemento das propriedades que devem ser especificadas na fase de projecto para alguns elementos da envolvente, como por exemplo as janelas e as caixas de estore.

Para assegurar o caudal de ventilação de base através das infiltrações de ar pela envolvente (sem grelhas de ventilação) é necessário ter uma permeabilidade ao ar elevada n50 de 8 a 15 (n50 de 3 a 6 na exposição ao vento 4), o que são valores relativamente elevados e, portanto, não serão atingidos numa grande maioria dos edifícios. Neste caso, não é possível assegurar as taxas de renovação de ar pretendidas, pelo que se considerada que na tabela IV.1 do RCCTE deveria ser excluída a possibilidade de fazer a ventilação natural sem grelhas de admissão de ar.

Quadro 6.2 - Classificação da exposição ao vento dos locais

Região A										Região B								
Rug I			Rug II			Rug III			Rug I			Rug II			Rug III			
Cidade			Urbano			Plano			Cidade			Urbano			Plano			
Protecção	Não	Nor	Prot.	Não	Nor	Prot.	Não	Nor	Prot.	Não	Nor	Prot.	Não	Nor	Prot.	Não	Nor	Prot.
H ≤ 10 m	1	A	A	2	1	A	3	3	A	1	A	A	2	1	A	3	3	A
10 < H ≤ 18 m	1	A	A	2	1	A	3	3	A	2	1	A	3	3	A	4	3	1
18 < H ≤ 28 m	2	1	A	3	3	A	4	3	1	2	1	A	3	3	A	4	3	1
< 28H ≤ 60 m	3	3	A	4	3	1	4	3	1	3	3	a	4	3	1	4	3	1

Quadro 6.3 - Limites recomendados para a permeabilidade da envolvente n50

Construção corrente			Edifícios de elevada eficiência energética		
Nº fachadas expostas ao vento:	2 fach	4 fach	2 fach	4 fach	
Classe de exposição ao vento	Abrigada	2,9	3,8	1,1	1,5
	1	2,1	2,8	0,8	1,1
	2	1,8	2,5	0,7	1,0
	3	1,2	1,6	0,5	0,6
	4	0,9	1,2	0,4	0,5

Seguidamente apresentam-se algumas conclusões mais específicas relacionadas com os ensaios e com a determinação dos limites para a permeabilidade ao ar.

#### Aspectos relacionados com os ensaios

- Com base nos resultados dos ensaios efectuados não foi encontrada uma correlação entre a permeabilidade da envolvente e a unidade de área da envolvente exterior ou o volume interior, devido ao comportamento singular de alguns elementos como as caixas e estore. Deste modo a adopção de n50 ou outro parâmetro é algo subjectiva, tendo neste trabalho sido adoptado n50 como parâmetro da permeabilidade ao ar.
- Apesar do método de ensaio de pressurização aplicada a cada uma das fracções de um edifício multifamiliar não ser totalmente adequado, devido às eventuais infiltrações para as fracções adjacentes que não se encontram pressurizadas, foi possível verificar num edifício que essas infiltrações entre zonas são pequenas. Nesse sentido considera-se razoável o ensaio de fracções individuais para aferir a permeabilidade ao ar da envolvente.
- Da análise da permeabilidade ao ar de toda a envolvente dos edifícios, verifica-se que as janelas são responsáveis por cerca de 5% a 10%, as caixas de estore 50% e a restante envolvente por 40%. Através de uma adequada concepção é possível reduzir de forma substancial a permeabilidade ao ar das janelas a valores da ordem de  $0,2 \Delta P^{0,67}$ , em vez de  $2,0 \Delta P^{0,67}$  medidos em obra.

- Com base nos resultados experimentais, apresentam-se valores para a permeabilidade a ar de alguns elementos da construção que poderão servir de referencial para caracterizar elementos da envolvente.

#### Limites para a permeabilidade ao ar e comportamento térmico

- Na definição dos limites para a permeabilidade ao ar da envolvente foram analisadas diferentes tipologias com diferentes sistemas de ventilação. Para esse efeito, foi necessário caracterizar componentes de sistemas de ventilação, principalmente de ventilação natural, onde foi efectuada uma compilação bibliográfica e foi realizada uma apreciação experimental e numérica de alguns componentes. Deste trabalho salienta-se a implementação do modelo do ventilador estático no topo de chaminés, que tem em conta a interacção vento/caudal evacuado, o qual pode ser responsável por uma redução de 20% a 40% do caudal escoados nas condutas.
- Considera-se adequado que o limite  $n_{50}$  varie com a exposição ao vento do edifício e com o número de fachadas expostas ao vento, tendo em conta as acções que promovem as infiltrações de ar, pois com este critério não se registou uma alteração relevante do desempenho térmico do edifício nas diferentes classes de exposições ao vento.
- Em edifícios com ventilação natural situados em locais com uma acção do vento pouco intensa (classe de exposição inferior a 2) devem ser adoptadas grelhas auto-reguláveis a partir de 2 Pa pois, caso sejam adoptadas grelhas auto-reguláveis a partir de 20 Pa será necessário um elevado número de grelhas para assegurar o caudal de ventilação pretendido.
- Os edifícios com  $n_{50}$  que satisfazem aos limites indicados no Quadro 6.3 para a velocidade média do vento têm um caudal de infiltrações de zero.
- Para os casos estudados com sistema VMC a metodologia do RCCTE (2006) prevê uma taxa de infiltrações de zero, pois o desequilíbrio entre o caudal extraído por meios mecânicos é superior a 0,6 rph. Neste estudo evidencia-se que esse caudal de infiltrações depende da permeabilidade da envolvente e que pode ter valores importantes, originando um agravamento das perdas térmicas de que pode ser superior a 100% (Figura 4.129, a Figura 4.131).

#### **6.1.4 – Proposta para análise da eficiência energética e ambiental dos edifícios**

Tendo em conta método de ACV desenvolvido e os resultados obtidos, considera-se existir potencial para efectuar a qualificação energética e ambiental de edifícios com base na comparação do desempenho de um edifício real com um edifício de referência, com as condições definidas no capítulo 3. Para o edifício de referência, com base nas características que minimizam o impacte ambiental, seriam adoptados os seguintes elementos de referência:

- caixilharia de alumínio, vidro duplo incolor com estore veneziano pelo exterior e com uma área envidraçada de 15% da área de pavimento;
- elementos opacos de parede dupla de alvenaria, com isolamento térmico função do clima:

- $U_{par} \leq 0,45 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ,  $U_{cob} \leq 0,5 \text{ W/m}^2/\text{K}$  (60 mm de isolamento térmico) nos climas equivalentes ao de Faro
- $U_{par} \leq 0,29 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ,  $U_{cob} \leq 0,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$  (100 mm de isolamento) nos climas equivalentes a Lisboa e Bragança.
- Edifício dotado de sistema de ventilação natural e que cumpre os requisitos de permeabilidade ao ar do Quadro 6.3.
- Instalação de sistema de climatização apenas se o número de horas de desconforto previsível o justificar.

Através da utilização de uma envolvente e de uma construção que satisfaça os parâmetros atrás referidos é expectável uma redução significativa do impacte ambiental dos edifícios, conforme apresentado nos casos de estudo.

## **6.2- PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS**

Tendo por base o trabalho desenvolvido, prevê-se a continuidade da aplicação da ACV a materiais de construção, através da análise dos sectores mais relevantes como seja a indústria do cimento, dos materiais cerâmicos e metálicos de forma a facultar aos produtores e projectistas informações que permitam seleccionar os materiais com menor impacte ambiental.

Pretende-se aplicar a metodologia de ACV a um maior número de edifícios de forma a ser possível estabelecer referenciais para o desempenho ambiental e permitir estabelecer uma qualificação ambiental de edifícios baseada na ACV. Neste âmbito será também pertinente avaliar a eficácia de algumas soluções solares passivas na perspectiva de dispensar a climatização e na perspectiva ACV.

Tendo em conta a relevância da reciclagem e reutilização dos materiais de construção pretende-se aplicar a metodologia utilizada neste estudo no suporte a estudos de reabilitação e no apoio de estudos de construção nova onde seja prevista a fase de desmontagem dos materiais.



## BIBLIOGRAFIA

- ADEME, 2006 - **Bâtiment et démarche HQE**. Paris: ADEME.
- ADENE, 2005 - **Estudo do consumo de energia no sector doméstico**. Alfragide: ADENE.
- Advanced Glazing Components, 2005. Consulta em 30-03-2005, disponível em [www.paslink.org/iqtest/casestudies/advanced\\_glazing/](http://www.paslink.org/iqtest/casestudies/advanced_glazing/)
- Afonso, C. e Maldonado, E., 1988 - **Determinação de níveis de infiltrações típicos em edifícios portugueses**. 3ª Jornadas de física e tecnologia de edifícios. Lisboa.
- Afonso, C. et al, 2004 - **Air exchange rates and indoor air quality in offices of the faculty of engineering of Porto University**. Proceedings, Roomvent, Coimbra, September.
- Allen, C., 1985 - **Leakage distribution in buildings**. Coventry: AIC. Nota Técnica 16.
- Amaral, A.S., 1999- **Dados de referencia para benchmarking. Produção d tijolo e abobadilha em portugal**. Coimbra: CTCV.
- Anderson, J. e Edwards, S., 2000 - **Addendum to BRE Methodology for Environmental Profiles of Construction Materials, Components and Buildings**. Garston : Centre for Sustainable Construction.
- Anderson, J.; Shiers, D.E. e Sinclair, M., 2002 - **The BRE Green Guide to Specification**. London: Blackwell Publishing.
- Anink, D.; Boonstra, C. e Mak, J., 1996 - **Handbook of sustainable building. An environmental preference method for selection of materials for use in construction and refurbishment**. London: James & James.
- Araújo, A.T., 2007 - **Relatório do observatório nacional das doenças respiratórias 2007**. ONDR, 2007.
- Ardente, F. Beccali, M. e Cellura, M., 2004 - **F.A.L.C.A.D.E.: a fuzzy software for the energy and environmental balances of products**. Ecological Modelling. Nº 176. Pag. 359-379.
- Arens, E.A. e Baughman, A., 1996 - **Indoor Humidity and human health-Part II: Buildings and their systems**. ASHRAE Transactions. Vol 102.
- Arrêté, 2000 - **relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments**. Arrêté du 29 novembre 2000, J.O. Numéro 277 du 30 Novembre 2000. RT 2000.
- ASHRAE 189, 2007 - 1<sup>st</sup> draft - **Standard for the Design of High-Performance Green Buildings Except Low-Rise Residential Buildings First Public Review (May 2007)**. Atalanta: ASHRAE.
- ASHRAE 55, 2004 - **Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta: ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55, 2004
- ASHRAE 62.1, 2003 - **Ventilation and acceptable indoor air quality**. Atlanta: ASHRAE.
- ASHRAE 62.2, 2003 - **Ventilation and acceptable indoor air quality in low-rise residential buildings**. Atlanta: ASHRAE.
- ASHRAE, 1997 - **ASHRAE Handbook fundamental 1997**. Atlanta; ASHRAE.
- Asif, M; Davidson, A. e Muneer, T., 2001 - **Embodied energy analysis of aluminium-clad windows**. Building Serv. Eng. Res. Technol.22,3, pag 195 a 199.
- Athienitis, A.K. e Tzempelikos, A., 2002 - **A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device**. Solar energy, Vol 72, pag 271 a 281.

- Awbi, H., 2003 - **Ventilation of buildings**. London : SPON.
- Baker, N. Standeven, M., 1996 - **Thermal comfort for free-running buildings**. Energy and Buildings, Vol 23.
- Baldwin, R. et al, 1998 - **BREEAM 98 for offices an environmental assessment method for office buildings**. Watford: BRE.
- Bartak, M.; Dunovska, T. e Hensen, J., 2001 - **Design support simulations for a double-skin façade**. In 1st Int. Conf. on Renewable Energy in Buildings "Sustainable Buildings and Solar Energy, Brno.
- Baughman, A. e Arens, E.A., 1996 - **Indoor Humidity and human health-Part I: Literature review of health effects of humidity-influenced indoor pollutants**. ASHRAE Transactions. Vol 101.
- Berge, B., 2005 - **The ecology of building materials**. Oxford: Architectural Press.
- Bluyssen, P.M, Oliveira, E.O.F. et al, 2003 - **Why, when and how do HVAC-systems pollute the indoor environment and what to do about it? The European AIRLESS project**. Building and environment. Vol. 38.
- Bluyssen, P.M., 1993 - **Do filters pollute or clean the air?** Air infiltration review, nº 14.
- Brager, G. e Dear, R. D., 2000 - **A standard for natural ventilation**. ASHRAE Journal.
- Brohus, H. et al, 2006 - **Comfort indicators for the assessment of indoor environment building performance**. Proceedings Healthy Buildings HB 2006. Lisboa.
- Bruin, Y., 2005a - **Characterization of Indoor Sources (COSI). Emission of chemical substances from materials and products**. Ispra: Institute for Health and Consumer Protection.
- Bruin, Y., 2005b - **HEXPOC. Human Exposure Characterization of chemical substances: quantification of exposure routes**. Ispra: Institute for Health and Consumer Protection.
- BS 5250, 2002 - **Code of practice for control of condensations in buildings**. London: BSI.
- BS 5925, 1991 - **Code of practice for ventilation principles and designing for natural ventilation**. London: BSI.
- Buchanan, I. S. e Apte, M. G., 2006 - **Air filter materials and building related symptoms in the BASE study**. Proceedings, Healthy Buildings HB 2006, Lisboa, Junho.
- Burroughs, H. E. e Hansen, S., 2004 - **Managing Indoor Air Quality**. New York: The Fairmont Press. 3ª Edição.
- Camelo, S., 1995 - **Estudo do comportamento térmico de edifícios em Portugal no período de verão**. Lisboa: IST. Tese de mestrado.
- Cavaleiro e Silva, A. e Malato, J.J., 1969 - **Geometria da insolação de edifícios**. Lisboa: LNEC. ITE 5.
- CCE (Centro para a conservação de energia), 1995 - **A gestão da energia e o regulamento de gestão do consumo de energia (R.G.C.E.)**. Lisboa: DGE.
- CDNHW (Canadian Department of national health and welfare), 1987 - **Exposure guidelines for residential indoor air quality**. Ottawa: Minister of supply and services Canada.
- CDNHW (Canadian Department of national health and welfare), 1995 - **Indoor air quality in office Buildings: A technical guide**. Ottawa: Minister of supply and services Canada.
- CE, 2007 - **European union energy & transport in figures. 2006. Part 2: energy**. Brusseles: European commission. Directorate-general for energy and transport.

- CEC, 2005 - **Green Paper on Energy efficiency or doing more with less.** Brussels: Commission of the European communities.
- CEN/TR 14788: 2006 - **Ventilation for buildings - design and dimensioning of residential ventilations systems:** Brussels: CEN.
- Certivea, 2006 - **Référentiel technique de certification. Bâtiments tertiaires - Démarche HQE. Bureau - enseignement.** Paris : Cerivea.
- Chapman, K. S. e Sengupta, J., 2004 - **Window performance for human thermal comfort.** Kansas: Kansas State University. Final Project report, Research Project 1162.
- Chevalier, J.L. e Téno, J.F., 1996 - **Requirements for an LCA-based Model for the Evaluation of the Environmental Quality of Building Products.** Building and Environment, Vol. 31, No. 5, pp. 487-491.
- CIB, 1998 - **Sustainable development and the future of construction. A comparison of visions from various countries.** Roterdão: CIB. CIB publication 225.
- CIB, 1999 - **Agenda 21 on sustainable construction.** Roterdão: CIB. CIB publication 237.
- CIBSE, 1987 - **Applications manual - Window design 1987.** London: CIBSE.
- Cimpor, 2006 - **Centro de produção de souselas. Declaração ambiental intercalar 2004.** Lisboa: Cimpor.
- Citherlet, S. et al, 2000 - **Window and advanced glazing systems life cycle assessment.** Energy and Buildings 32, pag 225 a 234
- Clarke, J.A., 2001 - **Energy simulation in building design.** Oxford: Butterworth Heinemann. 2ª edição.
- Clausen, G., 2004 - **Ventilation filters and indoor air quality: a review of research from the international centre for indoor environment and energy.** Indoor Air. Vol. 14.
- Cole, R.J. e Kernan, P.C., 1996 - **Life-Cycle Energy Use in Office Buildings.** Building and Environment. Vol. 31, No. 4, pp 307-317.
- Comissão Europeia, 2000 - **Management of Construction and Demolition Waste. WORKING DOCUMENT N°1. 2000.**
- Concannon, P., 2002 - **Residential ventilation.** Coventry: AIVC. Technical note AIVC 57.
- Coucelo, C., 1986 - **FORTTRAN 77.** Lisboa: CIIST.
- CR 1752, 1998 - **Ventilation for buildings - Design criteria for the indoor environment.** Brussels: CEN.
- CSFVP, 2007 - **Fiche de caractéristiques environnementales et sanitaires. Double vitrage peu émissif.** Paris: Chambre Syndicale des fabricants de verre plat.
- CTBA, ECOBILAN, CIRAD, 2004 - **Analyses de cycle de vie de panneaux contreplaques.** Paris: Ademe.
- Daisey, J.M et all, 1993 - **Volatile Organic Compounds in twelve California office buildings: classes, concentration and sources.** Helsinki: Indoor air 93 - 6th International conference on indoor air quality and climate.
- Davies, M. et all, 2004 - **A review of evidence linking ventilation rates in dwellings and respiratory health - a focus on house dust mites and mould.** International journal of ventilation. Vol 3, nº2.
- Dear, R. J. e Brager, G. S., 1998a - **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference.** ASHRAE Transactions, vol 104.
- Dear, R. J. e Brager, G. S., 1998b - **Thermal adaptation in the built environment: a literature review.** Energy and Building.

- Dear, R. J., 2006 - **Adaptive thermal comfort in building management and performance**. Proceedings Healthy Buildings HB 2006. Lisboa.
- Decreto-Lei nº 255/80 de 30 de Julho - **Definição de limites de concentrações à superfície e nas emissões de poluentes atmosféricos**.
- Decreto-Lei nº 276/99 de 23 de Julho - **Gestão da qualidade do ar e transposição da directiva nº96/62/CE**.
- Decreto-Lei nº 37/2007 de 14 de Agosto - **Normas para a protecção dos cidadãos da exposição involuntária ao fumo do tabaco e medidas de redução da procura relacionadas com a dependência e a cessação do seu consumo**.
- DEWO (Department of the environment and the welsh office), 1995 - **The Building regulations 1991 - Ventilation. Approved document F**.
- DEWO (Department of the environment and the welsh office), 2000 - **The building regulations 2000. Approved document L2. Conservation of fuel and power**.
- Dewson, T. et al, 1993 - **Model validation using the PASSYS test cells**. Building and environment, Vol 28, pag 153-165.
- DGA, 2001a - **Índice de qualidade do ar**. Alfragide: Direcção Geral do Ambiente.
- DGA, 2001b - **Relatório do estado do ambiente 2000**. Alfragide: Direcção geral do ambiente.
- DGE, 1994 - **Caracterização energética do sector de serviços. Relatório de síntese**. Outubro de 1994. Lisboa: Direcção Geral de Energia.
- DGE, 2001 - **Energia - Estatísticas rápidas**. Lisboa, DGE. nº10.DGGE, 2004 - **Balanço energético nacional 1970 a 2003**. Lisboa: Direcção Geral de Geologia e Energia.
- Dick, H.A.L.V. e Oversloot, H.P., 2003 - **WIS, the European tool to calculate thermal and solar properties of windows and window components**. In 8<sup>th</sup> International IBPSA conference, Building simulation 2003. Eindhoven.
- Dickerhoff, D. J.; Diamond, R.C. e Feustel, H.E., 1996 - **Ventilation and infiltration in high-rise apartment buildings**. Berkeley: LBNL. LBL-38103
- Dickie, I. e Howard, N., 2000 - **Assessing environmental impacts of construction. Industry consensus, BREEAM and UK Ecopoints**. Watford: BRE. Digest 446.
- Dickson, A., 2004 - **Modelling double-skin facades**. Glasgow: University of Strathclyde. Tese Mestrado.
- Dijk, H.A.L.V. e Linden, G.P.V, 1993 - **The PASSYS method for testing passive solar components**. Building and environment, Vol 28, pag 115 a 126.
- Directiva 2002/91/CE de 16 de Dezembro de 2002 - **relativa ao desempenho energético dos edifícios**. Brussels: Jornal Oficial, 2003.
- Directiva 2004/42/EC - **Directive on the limitation of emissions of volatile organic compounds due to the use of organic solvents in certain paints and varnishes and vehicle refinishing products and amending Directive 1999/13/EC**. Brussels: Comissão Europeia, 2004. O.J. nº L143 de 30-04-2004.
- Directiva 76/769/CEE - **Relativa à aproximação das disposições legislativas, regulamentares e administrativas dos Estados-Membros respeitantes à limitação da colocação no mercado e de utilização de algumas substâncias e preparações perigosas**. Brussels: Comissão Europeia, 2002. O.J. nº L262 de 27-09-1976.
- Directiva 89/106/CEE - **Relativa à aproximação das disposições legislativas, regulamentares e administrativas dos Estados-Membros no que respeita aos**

- produtos de construção.** Brussels: Comissão Europeia, 2002. O.J. nº L040 de 11-02-1989.
- Directiva 96/62/CE de 27 de Setembro de 1996 - **relativa à avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente.** Brussels: Jornal Oficial, 1996.
- DSIC (Danish society of indoor climate), 2000 - **Introduction to the principles behind the indoor climate labeling.** Taastrup: DSIC, 2000.
- DSIC (Danish society of indoor climate), 2003 - **Standard test method for determination of the indoor-relevant time-value by chemical analysis and sensory evaluation.** Taastrup: DSIC, 2003. 2ª edição.
- Duffie, J.A. e Beckman, W.A., 1991 - **Solar Engineering of thermal processes.** New York: John Wiley & Sons. 2ª Edição.
- ECA (European Collaborative Action), 1992 - **Indoor air quality & its impact on man - Guidelines for ventilation requirements in buildings.** Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1992. Report nº11.
- ECA (European Collaborative Action), 1993 - **Indoor air quality & its impact on man - Biological particles in indoor environment.** Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1993. Report nº12.
- ECA (European Collaborative Action), 1997 - **Indoor air quality & its impact on man - Total volatile organic compounds (TVOC) in indoor air quality investigations.** Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1997. Report nº19.
- Eckert, E.R.G; Jackson, T.W., 1951 - **Analysis of turbulent free-convection boundary layer on flat plate.** NACA report 1015.
- EDP e CCE - **Iluminação no sector dos serviços.** Lisboa: EDP. Colecção Utilização Racional de Energia Eléctrica.
- EDP, 2005 - **Relatório e contas 2005. Caderno de sustentabilidade.** Lisboa, EDP.
- EN 12207, 1999 - **Windows and doors. Air permeability. Classification.** Brussels : CEN.
- EN 12207, 2002 - **Windows and doors - air permeability - classification.** Brussels: CEN.
- EN 13141-1, 2004 - **Ventilation for buildings - Performance testing of components/ products for residential ventilation - Part 1: Externally and internally mounted air transfer devices.** Brussels: CEN.
- EN 13363-1, 2002- **Solar protection devices combined with glazing - calculation of solar and light transmittance - part 1: Simplified method.** Brussels: CEN.
- EN 13363-2, 2002 - **Solar protection devices combined with glazing - calculation of solar and light transmittance - part 2: Reference method.** Brussels: CEN.
- EN 13790, 2004 - **Thermal performance of buildings - Calculation of energy use for space heating.** Brussels: CEN.
- EN 13799, 2007 - **Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems.** Brussels: CEN.
- EN 13829, 2000 - **Thermal performance of buildings - determination of air permeability of buildings - fan pressurization method (ISO 9972:1996 modified).** Brussels: CEN.
- EN 13986, 2002 - **Wood-based panels for use in construction - Characteristics, evaluation of conformity and marking.** Brussels: CEN, 2002.
- EN 15242, 2007 - **Ventilation for buildings - Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration.** Brussels: CEN.

- EN 15251, 2007 - **Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics**. Brussels: CEN.
- EN 410, 1998 - **Glass in buildings - determination of luminous and solar characteristics of glazing**. Brussels: CEN.
- EN 13141-5, 2004 - **Ventilation for buildings - Performance testing of components/products for residential ventilation - Part 5: Cowls and roof outlet terminal devices**. Brussels: CEN.
- EPA (Environmental Protection Agency), 1995 - **The inside story: A guide to indoor air quality**. Washington: US EPA. EPA document 402-K-93-007.
- EPA (Environmental Protection Agency), 2001 - **Mold remediation in schools and commercial buildings**. Washington: US EPA.
- Erlandsson, M. e Borg, M., 2003 - **Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services - today practice and development needs**. Building and Environment 38, pag 919 a 938.
- Esbensen e Baker, N., 1998 - **Design Standards for Energy Efficient Buildings**. Energy Comfort 2000, nº 6.
- ESRU, 2001 - **Data Model Summary. ESP-r. Version 9 Series**. Strathclyde: Energy Systems Research Unit (ESRU).
- ESRU, 2002 - **The ESP-r System for Building Energy Simulation. User Guide Version 10 Series**. Glasgow: ESRU.
- European Commission, 2006 - **EU energy and transport in figures — Statistical pocketbook**. Luxembourg: 2006. Available on-line:
- Eurostat, 2003 - **European union - energy & transport in figures 2003**. European commission directorate-general for energy and transport.
- Fang, L. et al, 2004 - **Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance**. Indoor Air, Suppl (7).
- Fanger, P. O. e Toftum, J., 2002 - **Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates**. Energy and Building.
- Fanger, P. O. et al, 1988 - **Air turbulence and sensation of draught**. Energy and Buildings, vol 12.
- Fanger, P. O., 1972 - **Thermal Comfort. Analysis and applications in environmental engineering**. New York: McGraw-Hill.
- Fanger, P. O., 1988a - **Air pollution sources in offices and assembly halls quantified by the olf unit**. Energy and Buildings. Vol 6.
- Fanger, P. O., 1988b - **Introduction of the olf and decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors**. Energy and Buildings. Vol. 12.
- Farinha, J.S.B. e Reis, A. C., 1993 - **Tabelas técnicas**. Lisboa: IST.
- Fernandes, E.O. et al, 2005 - **The Index Project. Critical appraisal of the setting and implementation of indoor exposure limits in EU. Final report**. Ispra: Institute for Health and Consumer Protection.
- Ferrão, P.C., 1998 - **Introdução à gestão ambiental. A avaliação do ciclo de vida de produtos**. Lisboa: ISTpress.
- Ferreira, F.A., 1990 - **Moderna saúde pública**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- FIB, 2003 - **Environmental issues in prefabrication**. Lausanne: Fédération Internationale du béton. State-of-art report bulletin 21.

- Flamant, G et al, 2004 - **Real-scale testing of ventilated double façades performance assessment in paslink test cell.** Brussels: BBRI.
- Fonseca, M.S., 1997 - **Curso sobre regras de medição na construção.** Lisboa: LNEC.
- Forsberga, A. e Malmborgc, F., 2004 - **Tools for environmental assessment of the built environment.** Building and environment, Vol 39.
- Fracastoro, G.V. e Perino, M., 2001 - **Natural vs mechanical ventilation - a tool to help making a choice.** International journal of ventilation. Vol 1, nº 2, pag 101 a 108.
- Fracastoro, G.V. et al, 2002 - **A simplified tool to assess the feasibility of hybrid ventilation systems.** Turin: IEA Annex 35.
- Freire, L. e Brito, J., 2000 - **Custos e benefícios da demolição selectiva.** In Construção XXI, Lisboa, IST.
- Funch, L.W e Clorius, C., 2002a - **Indoor climate of single-family house constructed by use of glued solid wood elements. In-situ measurements and calculations.** Taastrup: Danish Technological Institute.
- Funch, L.W., 2002b - **Determination of emissions from solid wood elements.** Taastrup: Danish Technological Institute, 2002.
- Gäbel, K.; Forsberg, P. e Tillman, A., 2004 - **The design and building of a life cycle-based process model for simulating environmental performance, product performance and cost in cement manufacturing.** Journal of Cleaner Production 12, pag 77 a 93.
- GEV, 2002 - **GEV - Testing Method. Determination of volatile organic compounds for control of emissions from products for flooring installation.** Düsseldorf: Association for the Control of Emissions in Products for Flooring Installation.
- Ghisi, E. e Tinker, J.A., 2005 - **An ideal window area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings.** Building and environment, Vol 40, pag 51 a 61.
- Givoni, B., 1991 - **Performance and Applicability of Passive and Low-Energy Cooling Systems.** Energy and Buildings. Elsevier.
- Godish, T., 1997 - **Air quality.** New York: Lewis Publishers.
- Goedkoop. M. e Spriensma, R., 2001 - **The eco-indicator 99 A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology report.** Amersfoort: Pré consultants.
- GOMES, Ruy J., 1977 - **Condicionamentos climáticos da envolvente dos edifícios para habitação.** Lisboa: LNEC. Memória 181.
- Gonçalves. H., 1990 - **Interacção de Sistemas Solares Passivos de Ganho Directo e de Ganho Indirecto - Estudo Numérico e Experimental.** Porto: FEUP. Tese de doutoramento.
- González, B; Adenso-Diaz, B. e González-Torre, P.L., 2002 - **A fuzzy logic approach for the impact assessment in LCA.** Resources, Conservation and Recycling 37, pag 61 a 79.
- Gonzalez, M. A., 1984 - **On the aerodynamics of natural ventilators.** Building and environment. Vol 19, nº3.
- Goodfellow, H. E Tahti, E., 2001 - **Industrial ventilation. Design Guidebook.** San Diego: Academic Press.
- Goulding, J.R.; Lewis, J.O.; Steemers, T.C., 1992 - **Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook.** B.T. Londres, Batsford, Ltd.
- Gugliermetti, F. e Bisegna, F., 2006 - **Daylighting with external shading devices: design and simulation algorithms.** Building and environment, Vol 41, pag 136 a 149.

- Guinée, J.B. et al, 2001 - **Life cycle assessment An operational guide to the ISO standards.** Leiden: *Leiden University, 2001.* Final report.
- Hadley, D.L., 1990 - **Results of a pre-field measurement program fan pressurization comparative test.** ASTM STP 1067.
- Haghighat, F. E Bellis, L., 1998 - **Material emission rates: Literature review, and impact of indoor air temperature and relative humidity.** Building and Environment. Vol 33, nº5.
- Harris, D.J., 1999 - **A quantitative approach to the assessment of the environmental impact of building materials.** Building and Environment 34, pag 751 a 758.
- Hates, R. et al, 1995 - **Office equipment: design, indoor air emissions, and Pollution Prevention Opportunities.** Cincinnati: United States Environmental Protection Agency.
- Heiselberg, P. et al, 1995 - **Energy-efficient measures to avoid downdraft from large glazed facades.** ASHRAE Transactions 101 (2).
- Heiselberg, P., 1994 - **Draught risk from cold vertical surfaces.** Building and Environment, vol 29.
- Hille, K.M, 2004 – **Understanding Environmental Pollution .** Cambridge: Cambridge Press.
- Hiller, F.S e Lieberman, G.J., 1990 - **Introduction to operations research .** New York: McGraw-Hill. 5ª Edição.
- Hodgson, A.T. e Beal, D., 2002 - **Sources of formaldehyde, other aldehydes and terpenes in a new manufactured house.** Indoor Air. Vol 12. nº4.
- Howard, N. ; Edwards, S. e Anderson, J., 1999 - **The BRE methodology for environmental profiles of construction materials, components and buildings.** Garston : BRE.
- Howieson, S.G. et al, 2003 - **Domestic ventilation rates, indoor humidity and dust mite allergens: are our homes causing the asthma pandemic?** Building Services Engineering Research Technology.  
[http://ec.europa.eu/dgs/energy\\_transport/figures/pocketbook/doc/2006/2006\\_energy\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/figures/pocketbook/doc/2006/2006_energy_en.pdf)
- Hummelgaard, J. et al, 2005 - **Indoor air quality and occupant satisfaction in five mechanically and four naturally ventilated open-plan office buildings.** Proceedings, Indoor air 2005, Beijing.
- IAI, 2005 - **Aluminium for future generations sustainability update 2005.** London: International Aluminium Institute.
- Idel'cik, I. E., 1969 - **Mémento des pertes de charge.** Paris, Eyrolles.
- IEA (International Energy Agency), 1991 - **Condensation and energy source book. Report Annex XIV. Volume 1.** Coventry: IEA.
- IPPC, 2001a - **Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries.** Integrated Pollution Prevention and Control, Dezembro 2001.
- IPPC, 2001b - **Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industries.** Integrated Pollution Prevention and Control, Dezembro, 2001.
- ISO 14025, 2000 - **Environmental labels and declarations -- Type III environmental declarations.** Genève: ISO.
- ISO 14040, 2006 - **Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework.** Genève: ISO.
- ISO 15099, 2003 - **Thermal performance of windows, doors and shading devices - detailed calculations.** Geneve: ISO.



- ISO 7730, 1994 - **Moderate thermal environments - Determinations of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.** Genève: ISO, 1994.
- ISO 7730, 2005 - **Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.** Genève: ISO.
- ISO 9972, 1996 - **Thermal performance of buildings - determination of air permeability of buildings - fan pressurization method (ISO 9972:1996 modified).** Genève: ISO.
- Janssens, A. e Paepe, M. D., 2005 - **Effect of moisture inertia models on the predicted indoor humidity in a room.** In 26<sup>th</sup> AIVC Conference, Brussels: AIVC.
- Jönsson, A., 2000 - **Tools and methods for environmental assessment of building products - methodological analysis of six selected approaches.** Building and Environment 35, pag 223 a 238.
- Junilla, S., 2004 - **The environmental impact of an office building throughout its life cycle.** Espoo. Tese de doutoramento.
- Keikkila, K., 2004 - **Environmental impact assessment using a weighting method for alternative air-conditioning systems.** Building and Environment 39, pag 1133 a 1140.
- Kiani, M. R., 2001 - **Evaluate the whole life environmental impact of glass in a fully glazed commercial building.**
- Kischkoweit-Lopin, M., 2002 - **An overview of daylight systems.** Solar energy, Vol 73, pag 77 a 82.
- Knapen, M., 2001 - **Comparative Applications. A Comparison of Different Tool Results on Similar Residential and Commercial Building.** IEA: Annex 31-Energy-Related Environmental Impact of Buildings.
- Knight, I. e Dunn, G., 2005 - **Measured energy consumption and carbon emissions of air-conditioning in UK office buildings.** Building Serv. Eng. Res. Technol, Vol 26, pag. 89 a 98.
- Koroneos, Christopher e Dompros, Aris, 2007 - **Environmental assessment of brick production in Greece.** Building and Environment 42, 2114 a 2123
- Kosareo, Lisa e Ries, Robert, 2007 - **Comparative environmental life cycle assessment of green roofs.** Building and Environment 42, pag 2606 a 2613.
- Kukkonen, E., 2003 - **Principles, experiences and new developments of the emissions classification of building materials in Finland.** In Proceedings: Healthy Buildings 2003. Singapore.
- Kurvers, S. R. et al, 2006 - **Adaptive thermal comfort set to practice: Considerations and experiences with the new Dutch guideline.** In Proceedings Healthy Buildings HB 2006. Lisboa.
- Leigh, S. et al, 2004 - **A study on cooling energy savings potential in high-rise residential complex using cross ventilated double skin facade.** Journal of Asian Architecture and building engineering. November, pag 275 a 282.
- Liddament, M., 1998 - **Preface to special issue Optimum ventilation and air flow control in buildings.** Energy and buildings, Vol 27, pag 221 a 222.
- Lieb, O. e Heusler, L., 2001 - **Double-skin facades. Integrated planning.** Munich: Prestel.
- Limb, M. J., 2001 - **A review of international ventilation, airtightness, thermal insulation and indoor air quality criteria.** Coventry: AIVC. Technical Note 55.
- Littlefair, P., 1999 - **Daylighting and solar control in the building regulations.** Watford: BRE.
- Littlefair, P., 1999b - **Review of domestic lighting in the building regulations.** Watford: BRE.

- LNEC, 1983 - **Ventilador Estático Féria, Mod. A-30, Análise do Comportamento**. Lisboa: LNEC. Proc. 84/1/4798
- Lyons, P. et al, 2000 - **Window performance for human thermal comfort**. ASHRAE winter meeting, Dallas.
- Maldonado, E. e Nascimento, C., 1997 - **Edifícios públicos termos de referência**. Lisboa: CCE. Vol 3 da série Divulgação de técnicas de URE em edifícios.
- Manz, H. e Frank, T., 2004 - **Analysis of thermal comfort near cold vertical surfaces by means of computational fluid dynamics**. Indoor and built environment, vol 13.
- Matson, N., 1998 - **How tight are American houses?** Home energy magazine online.
- Matson, U., 2005 - **Comparison of the modeling and the experimental results on concentrations of ultra-fine particles indoors**. Building and Environment. Vol. 40.
- McCartney, K. J. e Nicol, J. F., 2002 - **Developing an adaptive control algorithm for Europe**. Energy and Building.
- McEvoy, M. E. et al, 2003 - **Test cell evaluation of supply air windows to characterize their optimum performance and its verification by the use of modeling techniques**. Energy and Buildings, Vol 35, pag 1009-1020.
- Meadows, D.H. e al, 1972 - **The Limits to Growth. A Report to The Club of Rome**. MIT.
- Meier, A., 1994 - **Infiltration: Just ACH50 divided by 20?** Home energy magazine online, January/February.
- Menzies, G.F. e Wherrett, J.R., 2005 - **Multiglazed windows: potential for savings in energy, emissions and cost**. Building Serv. Eng. Res. Technol. 26,3, pag 249 a 258.
- Millet, J.R. et al, 1996 - **Ventilation naturelle et utilisation du gaze n réhabilitation**. Paris: CSTB. Cahier 2887.
- Mimoso, J.M., 1988 - **Ensaio de janelas. Sua escolha face à utilização**. LNEC, Lisboa. ITE 21.
- Mithraratne, N. e Vale, B., 2004 - **Life cycle analysis model for New Zealand houses**. Building and Environment 39, pag 483 a 492.
- Modera, M. P.; Wilson, D. J., 1990 - **The effects of wind on residential building leakage measurements**. ASTM STP 1067.
- Modera, M.P. e Sherman, M., 1986 - **AC pressurization: A technique for measuring leakage area in residential buildings**. Berkeley: LBNL. LBL-18395.
- Mølhave, L., 2003 - **Organic compounds as indicators of air pollution**. Indoor Air, Suppl n° 6.
- Moon, H.J. e Augenbroe, G.L.M., 2004 - **Toward a practical mould growth risk indicator**. Building Services Engineering Research Technology.
- Mora, E.P., 2007 - **Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials**. Building and Environment 42, pag 1329 a 1334.
- Moshfegh, B. et al, 1989 - **Heat transfer at modern windows-risk of condensation**. Energy and Buildings, vol 13.
- Mourão, J.F. e Branco, O.P., 2005 - **Habitação para o futuro. Exigências e modelos para a sociedades da informação. Sustentabilidade ambiental da habitação e áreas residenciais**. Lisboa: LNEC.
- NF P 01-010, 2004 - **Qualité environnementale des produits de construction - déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction**. Paris : AFNOR.

- NF P 01-020-1, 2005 - **Qualité environnementale des bâtiments. Partie 1 : cadre méthodologique pour la description et la caractérisation des performances environnementales et sanitaires des bâtiments.** Paris AFNOR.
- NF XP P 50-410, 1995 - **Installations de ventilation mécanique contrôlée - Règles de conception et de dimensionnement.** Paris: AFNOR. DTU 68.1.
- NP 1037-1, 2002 - **Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás. Parte 1: edifícios de habitação. Ventilação natural.** Monte da Caparica: IPQ.
- NP 1796, 2007 - **Segurança e saúde do trabalho. Valores limite de exposição profissional a agentes químicos.** Monte da Caparica: IPQ.
- NP EN 250-2, 2001 - **Durabilidade da madeira e de produtos derivados «. Durabilidade natural de madeira maciça. Pate 2: Guia da durabilidade natural da madeira e da impregnabilidade de espécies de madeira selecionadas pela sua importancia na europa.** Monte da Caparica: IPQ.
- NRC, 1999 - **Wood Products Life-Cycle Analysis Study: Assessment of Life-Cycle Analysis of Building Materials.** Ottawa: Natural Resources Canada.
- Nyman, M. e Simonson, C. J., 2005 - **Life cycle assessment of residential ventilation units in a cold climate.** Building and Environment 40, pag 15 a 27.
- O'Connor et al, 1997 - **Tips for daylighting with Windows. The integrated approach.** Orlando: LBNL
- Orme, M., 1999 - **Applicable Models for Air Infiltration and Ventilation Calculations.** Coventry: AIVC. TN 51.
- Oseland, N.A. et al, 1997 - **Occupant satisfaction with environmental conditions in naturally ventilated and air-conditioned offices.** CIBS, National conference.
- Oseland, N.A., 1995 - **Predicted and reported thermal sensation in climate chambers, offices and homes.** Energy and Building, vol 23.
- Ozisik, M. N., 1990 - **Transferência de Calor. Um texto básico.** Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.
- Paiva. J.A.V., 1985 - **Conservação de energia nos edifícios.** Lisboa: LNEC, 1985. Relatório 317/85-NCct.
- Parson, K.C e Olesen, B.W., 2002 - **Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730.** Energy and Building.
- Patrícia, A. e Gonçalves, H., 1997 - **Condições de conforto térmico numa escola tradicional portuguesa.** VIII Congresso Ibérico de Energia solar, Porto.
- Pereira, A. e Brito, J., 2000 - **Utilização de inertes cerâmicos reciclados em argamassas e betões.** In Construção XXI, Lisboa, IST.
- Persily, A.K., 1999 - **Myths about building envelopes.** ASHRAE Journal, Março.
- Petersen, A. K. e Solberg, B., 2005 - **Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden.** Forest Policy and Economics, 7, pag 249 a 259.
- Pettenkofer, M., 1858 - **Über den Luftwechsel in Wohngebäuden.** München: Literarisch-Artistische Anstalt der J.G. Cotta'schen Buchhandlung.
- Peuportier, B.L.P., 2001 - **Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context.** Energy and Buildings 33, pag 443 a 450.

- Pfrommer, P et al, 1995 - **The radiation transfer through coated and tinted glazing**. Solar Energy, Vol 54, pag 287 a 299.
- Pinheiro, M.D., 2006 - **Sistemas de gestão ambiental para a construção sustentável**. In Encontro nacional sobre qualidade e inovação na construção. QIC2006. Lisboa: LNEC.
- Pinheiro, M.D., 2007 - **Ambiente e construção sustentável**. Amadora: Instituto do Ambiente.
- Pinto, A.T.S., 2001 - **Ensaio de componentes de edifícios - Calibração de instrumentos para medição de caudal de ar**. Lisboa: LNEC. Relatório 26/01-NCCp.
- Pinto, A.T.S., 2002 - **Comportamento térmico de caixilharia exterior. Coeficientes de transmissão térmica referentes ao mercado nacional**. Lisboa: LNEC, 2002. Relatório 41/2002-NCI.
- Pinto, A.T.S., 2002b - **Balanço térmico de janelas na estação de aquecimento Coeficiente de transmissão térmica eficaz de caixilharia**. XI-Congresso Ibérico e VI-Congresso Ibero-Americano de energia solar. Vilamoura.
- Pinto, A.T.S., 2005 - **Componentes de edifícios. Desempenho térmico de caixilharia e vãos envidraçados**. Lisboa: LNEC.
- Pinto, A.T.S., 2006a - **Ventilação mecânica de edifícios de habitação**. Lisboa: LNEC, 2006. Relatório 01/2006-NCI.
- Pinto, A.T.S., 2006b - **Características térmicas de vãos envidraçados. Análise de aspectos específicos de conforto térmico**. Lisboa: LNEC. Relatório 110/2006-NCI.
- Pinto, A.T.S., 2007 - **Caixilharia de edifícios. Aspectos de segurança e resistência mecânica do vidro**. Lisboa: LNEC.
- Platts-Mills, T.A.E. e Arlian, L. G., 2001 - **The biology of dust mites and the remediation of mite allergens in allergic disease**. J. Allergy Clinical Immunology.
- PRé Consultants, 2003 - **Database manual. The BUWAL 250 library**. Amersfoort: PRé Consultants.
- Prek, M., 2004 - **Environmental impact and life cycle assessment of heating and air conditioning systems, a simplified case study**. Energy and Buildings 36, pag 1021 a 1027.
- Raeissi, S. e Taheri, M., 1993 - **Optimum overhang dimensions for energy saving**. Building and environment, Vol 33, pag 293-302.
- Ramos, C.D. et al, 2006 - **Indoor air quality in 30 Portuguese Office Buildings**. In Proceedings Healthy Buildings, 2006. Lisboa.
- Rao, S. et al, 2000 - **ECO homes The environmental rating for homes**. Watford: BRE.
- RCCTE, 1990 - **Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios**. Decreto Lei 40/90, de 6 de Fevereiro. Lisboa: INCM.
- RCCTE, 2006 - **Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios**. Decreto Lei 80/2006, de 4 de Abril. Lisboa: INCM.
- RE, 1992 - **Rotulagem energética**. Directiva 92/75/CEE, de 22 de Setembro.
- REGENER, 1997 - **European methodology for the evaluation of environmental impact of buildings. Life cycle assessment**. Brussels: European commission.
- Reinikainen, L.M. e Jaakkola, J. J. K, 2003 - **Significance of humidity and temperature on skin and upper airway symptoms**. Indoor Air, Vol. 13.
- Resolução n.º 24/2003 de 2 de Abril - **Utilização de amianto em edifícios públicos**.

- RETV, 2002 - **Critérios ecológicos revistos para atribuição do rótulo ecológico comunitário a tintas e vernizes para interiores.** Brussels: Comissão Europeia, 2002. O.J. nº L236 de 04-09-2002. Decisão da Comissão 2002/739/EC
- RGCE, 1982 - **Regulamento de gestão do consumo de energia.** Decreto Lei 58/82, de 26 de Fevereiro. Lisboa: INCM.
- RGSPDADAR, 1995 - **Regulamento de geral dos sistemas publicos e prediais de distribuição de água e de drenagem de águas residenciais.** Decreto Lei 23/95, de 23 de Agosto. Lisboa: INCM.
- Roaf, S. et al, 2003 - **Ecohouse2. A design guide.** Amsterdam: Architectural Press.
- Rogner, H.-H., D. Zhou, R. Bradley. P. Crabbé, O. Edenhofer, B.Hare (Australia), L. Kuijpers, M. Yamaguchi, 2007 - **Introduction. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge: Cambridge University Press.
- Roos, D. e Hartless, R., 2005 - **The revision of ventilation regulations for England and wales.** In 2005. 26<sup>th</sup> AIVC Conference. Brussels: AIVC.
- Rostron, J., 1997 - **Sick building syndrome. Concepts issues and practice.** London: E&FN Spon.
- Roulet, A.C. e Vandaele, 1991 - **Airflow patterns within buildings measurement techniques.** Coventry: AIVC. AIVC TN 34.
- Roulet, A.C., 2006 - **Indoor air quality and energy performance of buildings.** Lisboa: Healthy Buildings 2006. pag 37-47. RQAE, 1999 - **Regulamento da qualidade do ar exterior.** Decreto-Lei n.º 276/99 de 23 de Julho. INCM.
- RSA, 1983 - **Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes.** Decreto Lei 235/83, de 31 de Maio. Lisboa: INCM.
- RSECE, 1998 - **Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios.** Decreto Lei 118/98, de 7 de Maio. Lisboa: INCM.
- RSECE, 2006 - **Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios.** Decreto Lei 79/2006, de 4 de Abril. Lisboa: INCM.
- RSPT, 1983 - **Regulamento sobre prevenção do tabagismo.** Decreto-Lei n.º 226/83 de 27 de Maio. INCM.
- Rubin, M. et al, 1998 - **Window optics.** Solar energy, Vol 62, nº3.
- Rubin, M., 1982 - **Solar optical properties of windows.** Energy Research, Vol 6, pag 123 a 133.
- Rueegg, T. et al, 2001 - **Must cold air down draught be compensated when using highly insulating windows?** Energy and Buildings, vol 33.
- Saarela, K et al, 2002 - **Emission classification of building materials: Protocol for chemical and sensory testing of building materials.** Helsinki: The building information foundation RTS.
- Sandberg, M. e Blomqvist, C., 1994 - **Energy efficient ventilation of bathrooms.** Proceedings, The Role of ventilation, 15<sup>th</sup> AIVC conference, Buxton, September, 1994.
- Santamouris, M. e Asimakopoulos, D., 1996 - **Passive cooling of buildings.** London: james&james.
- Santos, C.A.P. e Matias, L., 1995 - **Curso de especialização sobre Isolamento térmico de edifícios.** Lisboa: LNEC.

- Santos, C.A.P. e Paiva, J.A.V., 1986a - **Caracterização térmica de paredes de alvenaria**. Lisboa: LNEC. ITE 12.
- Santos, C.A.P. e Paiva, J.A.V., 1986b - **Caracterização térmica de pavimentos prefabricados**. Lisboa: LNEC. ITE 11.
- Santos, C.A.P. e Paiva, J.A.V., 1997 - **Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios**. Lisboa: LNEC. ITE 28.
- Santos, C.A.P., 1993 - **Materiais granulares leves no isolamento térmico de edifícios. Estudo experimental da sua viabilidade e desempenho**. Lisboa: IST. Tese de Doutoramento.
- SCE, 2006 - **Sistema Nacional de certificação energética e da qualidade do ar interior nos edifícios**. Decreto Lei 78/2006, de 4 de Abril. Lisboa: INCM.
- Scheuer, C. et al, 2002 - **Evaluation of LEED using Life Cycle Assessment Methods**. NIST, GCR 02-836
- Scheuer, C. et al, 2003 - **Life cycle energy and environment performance of a new university building: modeling challenges and design implications**. Energy and buildings. pag 1049 a 1064.
- Schmidt, A. et al, 2004 - **A comparative life cycle assessment of building insulation products made of stone wool, paper wool and flax**. International Journal LCA, nº 9, pag 53 a 66.
- Schreiber, F. W., 2000 - **Perceived Air Quality: Investigation of the Non-Sensory Odor Assessment in Indoor Environments**. Berlin: Hermann-Rietschel-Institute-Technical University of Berlin. Tese de Doutoramento.
- Seppänen, O. A. e Fisk, W. J., 2002 - **Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers**. Indoor Air, Vol. 12.
- Seppänen, O. A. e Fisk, W. J., 2004 - **Summary of human responses to ventilation**. Indoor Air, Vol. 14.
- Seppänen, O. A. e Fisk, W. J., 2005 - **Indoor climate and productivity**. Proceedings, 26th AIVC conference. Ventilation in relation to the energy performance of buildings, Brussels.
- Seppänen, O., 2003 - **Performance criteria of buildings for health and comfort**. Helsinki: ISIAQ/CIB. International Society Indoor Air quality (ISIAQ) -CIB (Conseil International du bâtiment) Task Group 42.
- Shaviv, E., 2008 - **Passive and Low Energy Architecture (PLEA) VS Green Architecture (LEED)**. Proceedings, PLEA 2008 - 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, Outubro.
- Shaw, C. Y. et al, 1999 - **Improvement of indoor air quality in four problem homes**. Building and Environment. Vol 34.
- Shaw, C. Y., 1997 - **The effect of office landscape on ventilation and indoor air quality in open-plan offices**. Cost-effective open-plan environments (COPE) Seminar, Ontario.
- Shaw, C.Y.; Magee, R.J. e Rousseau, J., 1991 - **Overall and component airtightness values of a five-story apartment building**. ASHRAE Transactions, Vol 97, Part 2, pag 347 a 353
- Sherman, M. e Dickerhoff, 1994 - **Monitoring ventilation and air leakage in a low-rise commercial building**. ASME. Solar engineering.
- Sherman, M. et al, 1979 - **The low pressure leakage function of a building**. Berkeley: LBL, 1979. LBNL-9162.
- Sherman, M. H. e Dickerhoff, D., 1998 - **Air-tightness of US dwellings**. LBNL 35700.

- Sherman, M. H. e Grimsrud, D.T., 1980 - **Measurement of infiltration using fan pressurization and weather data.** LBNL..
- Sherman, M. H. e Hodgson, A.T., 2004 - **Formaldehyde as a basis for residential ventilation rates.** Indoor Air. Vol 14.
- Sidler, C.O. - **Logements a faibles besoins en énergie. Guide de recommandations et d'aide à la conception.** Paris: ADEME.
- Silva, A.M.C.R., 1991 - **Caracterização das infiltrações médias anuais em edifícios portugueses através do método de pressurização.** Porto: FEUP. Tese de Mestrado.
- Silva, F.M., 2003 - **Ventilação Natural de edifícios. Turbulência atmosférica.** Lisboa: IST. Tese de doutoramento.
- Silva, G.V.A., 2000 - **Estudo de emissões de COVs por materiais usados em interiores de edifícios.** Porto: Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Departamento de Química. Tese de Doutoramento.
- Simmler, H., 2001 - **Measurement + simulation of transparent building components with shading (test site).** In IQ-Test workshop 30.10.2001.
- Simonson, C. J. et al, 2002 - **The effect of structures on indoor humidity - possibility to improve comfort and perceived air quality.** Indoor Air, nº 12.
- Slater, A., 1999 - **Building regulations requirements for lighting in non-domestic buildings.** Watford: BRE.
- Soares, C.S., 1999 - **Análise energética e ambiental de sistemas de climatização.** Lisboa: IST. Tese de mestrado.
- Spiegel, R. e e Meadows, D., 2006 - **Green Building Materials. A guide to product selection and specification.** New York: John Wiley & sons, inc. 2ª edição.
- Stack, A. et al, 2000 - **Shading systems. Solar shading for the European climates.** Dublin: University College Dublin. Publicação ENERGIE.
- Sterling, E. M. et al, 1985 - **Criteria for human exposure to humidity in occupied buildings.** ASHRAE Transactions.
- STR PVC, 2002 - **Caractéristiques environnementales et sanitaires des canalisations pvc destinées à la collecte et à l'évacuation des eaux usées et des eaux vannes à l'intérieur des bâtiments.** Paris: Syndicat des tubes et raccords en PVC.
- Straube, J. F. e Straaten, R., 2002 - **The technical merit of double facades for office buildings in cool humid climates.** University of Waterloo. Disponível em <http://www.civil.uwaterloo.ca/beg/reports.htm>
- Sundell, J., 2004 - **On the history of indoor air quality and health.** Indoor air, 2004. Suppl 7.
- Suzuki, M. e Oka, T., 1998 - **Estimation of life cycle energy consumption and CO2 emission of office buildings in Japan.** Energy and Buildings 28, pag 33 a 41.
- Symonds et al, 1999 - **Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts.** Brussles: European Commission. Report to DGXI, European Commission. Final Report.
- Syrrakou, E., et al, 2005 - **Environmental assessment of electrochromic glazing production.** Solar Energy Materials & Solar Cells 85, pag 205 a 240.
- Tavares, R. S., 2004 - **Ventilação imprescindível.** Lisboa, Climatização.
- Taylor, G.D., 2002 - **Materials in construction. Principles, practice and performance.** Harlow: Pearson Longman.
- TIPvent, 2000 - **Towards improved performances of mechanical ventilation systems.** Programa Joule IV.

- Toftum, J. Jorgensen, A.S. e Fanger, P.O., 1998a - **Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort.** Energy and Building.
- Toftum, J. Jorgensen, A.S. e Fanger, P.O., 1998b - **Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin.** Energy and Building.
- Tzempelikos, A. e Athienitis, A.K., 2005 - **Integrated thermal and daylighting analysis for design of office buildings.** ASHRAE transactions, Vol 111(1), pag 227 a 238.
- UEAtc, 1989 - **Guide technique UEAtc pour l'agrément des fenêtres avec profilés métalliques à performance thermique améliorées.** Cahiers du CSTB, Cahier 2344.
- UEAtc, 2005 - **Environmental impact of construction products based on life cycle assessment- Environmental characteristics.** UEAtc. First Draft.
- USGBC, 2005- **LEED for New Construction (& Major Renovations) Version 2.2.** U.S. Green Building Council.
- Vartianen, E. et al, 2000 - **Daylight optimization of multifunctional solar facades.** Solar Energy, Vol 68, pag 223 a 235.
- Vásquez, E. e Barra, M., 2000 - **Recycling of aggregates in the construction industry.** In CIB symposium Construction & environment theory into practice. São Paulo.
- Veiga, R., 1999 - **Curso de especialização sobre revestimento de paredes.** Lisboa: LNEC.
- Viegas, J.C.G. et al, 2002a - **Assessment of the performance of natural ventilation in an apartment building.** Proceedings, Roomvent 2002, 8<sup>th</sup> International conference on air distribution in rooms, Copenhagen, September.
- Viegas, J.C.G. et al, 2002b - **Ventilation of dwellings: Requirements and experiments.** Proceedings, XXX IAHS World Congress on Housing. 2002, Coimbra, September.
- Viegas, J.C.G. et al, 2004 - **Natural ventilation of an apartment: a case study.** Proceedings, Roomvent, Coimbra, September.
- Viegas, J.C.G., 1995 - **Ventilação natural de edifícios de habitação.** Lisboa: LNEC, 1995.
- Viegas, J.C.G., 2006 - **Componentes de edifícios. Selecção de caixilharia e seu dimensionamento mecânico.** Lisboa: LNEC. ITE 51.
- Wallace, L. A. et al, 2004 - **Effect of central fans and in-duct filters on deposition rates of ultrafine and fine particles in an occupied townhouse.** Atmospheric environment, Vol. 38.
- Wallentén, P. e Wall, M., 1993 - **Performance of shading devices in buildings - A collaboration between Lund University and Nordic manufactures.**
- Wargocki, P., 2004 - **Sensory pollution sources in buildings.** Indoor Air, n<sup>o</sup> 14.
- White, F., 1986 - **Fluid mechanics.** NewYork: McGraw Hill.
- WHO (World Health Organization), 1987 - **Air quality guidelines for Europe.** Copenhagen: WHO Regional office for Europe. WHO Regional publications, European series, n<sup>o</sup> 23.
- WHO (World Health Organization), 1989 - **Indoor air quality: organic Pollutants.** Copenhagen: WHO Regional office for Europe, 1989.
- WHO (World Health Organization), 2000a - **Air Quality guidelines for Europe.** Copenhagen: WHO, 2000.
- WHO (World Health Organization), 2000b - **Guidelines for air quality.** Geneva: WHO, 2000.
- Willers, S. M. et al, 2006 - **Gas cooking, kitchen ventilation, and exposure to combustion products.** Indoor air, Vol. 16 (1), 65-73.
- Winther, B.N. e Hestnes, A.G., 1999 - **Solar versus green: the analysis of a Norwegian row house.** Solar Energy, Vol. 66, N<sup>o</sup>6, pag 387 a 393.



- Won D. et al, 2005 - **A material emission database for 90 target VOCs**. Proceedings, Indoor air 2005, The 10<sup>th</sup> International conference on Indoor air quality and climate, Beijing China.
- Wright, E. e Azapagic, A., 2005 - **The Sustainability of Polyvinyl Chloride (PVC) Literature Review A Report for the PVC Sustainability Research Network**. Surrey: Centre for Environmental Strategy.
- Wu, X.; Zhang, Z. e Chen, Y., 2005 - **Study of the environmental impacts based on the "green tax" - applied to several types of building materials**. Building and Environment 40, pag 227 a 237.
- Yaglou, C.P. et al, 1936 - **Ventilation requirements**. ASHVE Transactions, Vol. 42, 133 - 162.
- Yang, L. et al, 2005 - **Investigating potential of natural driving forces for ventilation in four major cities in China**. Building and Environment. Vol 40, pag 738 a 746.
- Yu, C. e Crump, D., 1998 - **A review of the emission of VOCs from polymeric Materials used in Buildings**. Building and Environment, Vol. 33.

