



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS
Núcleo de Acústica, Iluminação, Componentes
e Instalações

Proc. 0809/11/16210

CAIXILHARIA DE EDIFÍCIOS

Aspectos de segurança e resistência mecânica do vidro

Estudo integrado no Plano de Investigação Programada
do LNEC

Lisboa • Outubro de 2007

I&D EDIFÍCIOS

RELATÓRIO 290/2007 – NAICI

CAIXILHARIA DE EDIFÍCIOS

Aspectos de segurança e resistência mecânica do vidro

Resumo

A aplicação do vidro na construção tem sofrido um desenvolvimento acentuado nos anos mais recentes, com a aplicação de vidros com propriedades reforçadas de isolamento térmico, controlo solar, isolamento sonoro, tendo propiciado a aplicação de envidraçados cada vez de maior dimensão.

Neste relatório pretende-se sintetizar os aspectos de segurança a que os vidros devem satisfazer, de forma a minimizar o risco de rotura dos vidros e de ferimentos em pessoas, tendo em conta as normas Europeias publicadas nos anos mais recentes. Nesse âmbito, foi efectuado um estudo detalhado do risco de rotura por choque térmico dos vidros para as condições climáticas de Portugal, no sentido de auxiliar na especificação de vidro de elevada resistência ao choque térmico.

CAIXILHARIA DE EDIFÍCIOS
Aspectos de segurança e resistência mecânica do vidro

Índice

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 - Aspectos gerais	1
1.2 – Vidro.....	2
1.2.1 - Vidro na construção	2
1.2.2 - Vidro temperado	4
1.2.3 - Vidro termoendurecido	7
1.2.4 - Outros vidros.....	8
1.2.5 - Bordo do vidro	10
1.3 - Choque térmico	12
2 - ASPECTOS DE SEGURANÇA.....	14
2.1 - Aspectos gerais e definição de vidro de segurança.....	14
2.2 - Risco de ferimentos causados por fragmentos.....	15
2.2.1 - Zonas de risco	16
2.2.2 - Vidros a adoptar	17
2.2.3 - Informação complementar	17
2.3 - Segurança contra choques – visualização do vidro transparente.....	19
2.4 - Risco de queda	21
2.4.1 - Zonas de risco	21
2.4.2 - Vidros a adoptar	22
2.5 - Outros aspectos	22
3 - RESISTÊNCIA AO VENTO DE VIDROS APLICADOS NA VERTICAL	24
3.1 - Aspectos gerais	24
3.2 - Quantificação da acção do vento	24
3.3 - Cálculo da espessura de vidro simples recozido.....	30
3.4 - Factor de equivalência (ϵ) para outros tipos de vidro	33
3.5 - Cálculo da flecha dos vidros	35
3.6 – Resumo do método de cálculo	36

3.7 - Exemplo de aplicação	38
3.8 - Fachadas com vidros fixos pontualmente.....	40
3.9 - Ensaio de rotura de um vidro simples recozido instalado num caixilho de alumínio..	40
4 - MÉTODO DE CÁLCULO PARA APRECIAR O RISCO DE CHOQUE TÉRMICO	42
4.1 - Análise do estado de tensão e da diferença de temperatura máxima admissível no vidro recozido.....	42
4.1.1 - Análise do estado de tensão	42
4.1.2 - Diferença de temperatura máxima admissível no vidro	44
4.2 - Cálculo da diferença de temperatura do vidro	46
4.3 - Condições climáticas	47
4.3.1 - Radiação solar.....	47
4.3.2 - Temperatura do ar exterior.....	50
4.3.3 - Condições interiores.....	52
4.4 - Classificação da inércia térmica da gola dos vidros e temperatura da gola.....	52
4.5 - Zona central do vidro	58
5 - VALORES MÁXIMOS DA ABSORTÂNCIA PARA O VIDRO RECOZIDO DE MODO A MINIMIZAR A ROTURA POR CHOQUE TÉRMICO	61
5.1 - Vidros na vertical ($\beta > 60^\circ$).....	62
5.2 - Vidros em cobertura ($\beta < 30^\circ$).....	64
5.3 - Recomendações.....	65
6 - CASOS ESPECIFICOS QUE REQUEREM VIDRO DE ELEVADA RESISTÊNCIA AO CHOQUE TÉRMICO	66
6.1 - Envidraçados situados em frente a paredes opacas.....	66
6.2 - Sistemas VEC	67
6.3 - Vidros com a mesma face exposta ao ambiente interior e ao ambiente exterior.....	67
6.4 - Sistemas de aquecimento	68
6.5 - Outros casos	68
BIBLIOGRAFIA.....	69
ANEXO A – PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO VIDRO	
ANEXO B – CÁLCULO DA INTENSIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NOS ENVIDRAÇADOS	
ANEXO C – ANÁLISE DA TEMPERATURA DO AR E AMPLITUDE TÉRMICA DIÁRIA	

CAIXILHARIA DE EDIFÍCIOS
Aspectos de segurança e resistência mecânica do vidro

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Tipos de vidro - tijolo de vidro	3
Figura 1.2 – Tipos de vidro - vidro impresso	4
Figura 1.3 – Exemplo de tensões internas no vidro temperado	5
Figura 1.4 – Exemplo de fragmentação de um vidro temperado esmaltado	5
Figura 1.5 – Exemplo de fragmentação de um vidro recozido	6
Figura 1.6 – Exemplo de selagem de um vidro duplo.....	9
Figura 1.7 – Arestas abatidas	10
Figura 1.8 – Bordo roçado.....	11
Figura 1.9 – Bordo roçado sem irregularidades	11
Figura 1.10 – Bordo polido	11
Figura 1.11 – Ilustração das tensões de tracção devido ao fenómeno de choque térmico	12
Figura 1.12 – Exposições dos envidraçados susceptíveis de rotura por choque térmico.....	12
Figura 2.1 – Zonas críticas de aplicação de envidraçados	16
Figura 2.2 – Ilustração do comprimento de palas ou varandas	18
Figura 2.3 – Ilustração do comprimento de palas ou varandas	18
Figura 2.4 – Peças de fixação de fachadas VEFP [11].....	19
Figura 2.5 – Exemplos de envidraçados que não requerem motivos para evidenciar a presença de vidro.....	20
Figura 2.6 – Exemplo de motivos decorativos a aplicar para evidenciar a presença de um vidro transparente (400 cm ² /m de largura de vidro)	21
Figura 3.1 - Nível de referência em terrenos de inclinação superior a 60°	25
Figura 3.2 - Nível de referência em terrenos de inclinação superior a 15° e inferior a 60°.....	26
Figura 3.3 – Protótipo submetido ao ensaio de rotura do vidro	41
Figura 4.1 – Fluxo de radiação global no Inverno	47
Figura 4.2 – Fluxo de radiação global na Primavera/Outono	48
Figura 4.3 – Fluxo de radiação global no Verão	48
Figura 4.4 – Radiação solar difusa em elementos verticais	49
Figura 4.5 – Zonas climáticas de Inverno de Portugal Continental [1].....	51

Figura 4.6 – Temperatura do ar exterior	51
Figura 4.7 – Temperatura da gola isoladora – Inércia fraca.....	55
Figura 4.8 – Temperatura da gola condutora – Inércia fraca	55
Figura 4.9 – Temperatura da gola condutora – Inércia média	56
Figura 4.10 – Temperatura da gola condutora – Inércia forte.....	56
Figura 4.11 – Temperatura da gola VEC	57
Figura 6.1 – Condições para o vidro ser considerado aplicado em frente a uma parede opaca	66
Figura 6.2 – Vidro desfasados numa fachada VEC	67
Figura 6.3 – Exemplos de vidros com uma mesma face em contacto com o ambiente interior e com o ambiente exterior.....	67
Figura B.1 – Representação esquemática dos ângulos solares e da superfície	4

CAIXILHARIA DE EDIFÍCIOS
Aspectos de segurança e resistência mecânica do vidro

Índice de Quadros

Quadro 1.1 – Tipos de vidro.....	2
Quadro 2.1 – Alturas de referência para estabelecimentos escolares	17
Quadro 2.2 – Motivos ou condições que permitem identificar o vidro transparente	20
Quadro 2.3 – Exemplos de vidro com capacidade para satisfazer aos requisitos de segurança contra o risco de queda.....	22
Quadro 3.1 – Valores característicos da velocidade de rajada do vento	26
Quadro 3.2 – Coeficientes de pressão exteriores (δ_{pe}) [4].....	27
Quadro 3.3 – Coeficientes de pressão interiores (δ_{pi}) [4].....	28
Quadro 3.4 – Pressão de cálculo ($\delta_p=1,4$)	29
Quadro 3.5 – Pressão de cálculo ($\delta_p=1,0$)	30
Quadro 3.6 – Fórmulas de cálculo da espessura do vidro simples.....	31
Quadro 3.7 – Espessura nominal e espessura mínima de dimensionamento do vidro (mm)...	32
Quadro 3.8 – Espessura nominal mínima admissível para o vidro recozido	32
Quadro 3.9 – Factor de equivalência da espessura de vidros (ϵ)	34
Quadro 3.10 – Espessura equivalente para cálculo do estado de tensão do vidro laminado e vidro duplo assimétricos.....	34
Quadro 3.11 – Fórmulas de cálculo da flecha do vidro	35
Quadro 3.12 – Coeficiente (α)	35
Quadro 3.13 – Espessura equivalente para cálculo da deformação máxima do vidro	36
Quadro 4.1 - Coeficiente de cálculo das tensões de origem térmica - k_t	43
Quadro 4.2 - Tensão de trabalho do vidro - σ_{vm}	43
Quadro 4.3 - Coeficiente da sensibilidade do vidro ao choque térmico - k_v	44
Quadro 4.4 - Coeficiente de cálculo para inclinação do vidro e condições de apoio - k_a	44
Quadro 4.5 – Diferenças de temperatura máximas admissíveis entre dois pontos de um vidro recozido monolítico e laminado (°C).....	45
Quadro 4.6 – Diferenças de temperatura máximas admissíveis entre dois pontos de um vidro com resistência ao choque térmico (°C).....	45

Quadro 4.7 – Quadro com os valores máximos da radiação para cada orientação (W/m^2).....	49
Quadro 4.8 – Temperaturas do ar exterior de referência ($^{\circ}C$).....	50
Quadro 4.9 - Golas com inércia térmica fraca	53
Quadro 4.10 - Golas com inércia térmica média.....	53
Quadro 4.11 - Golas de inércia térmica forte.....	53
Quadro 4.12 – Condutâncias térmicas superficiais [$W/(m^2.K)$].....	54
Quadro 5.1 - Propriedades do dispositivo de protecção do vão	61
Quadro 5.2 – Absortância máxima admissível para o vidro recozido – Vidro simples.....	62
Quadro 5.3 - Absortância máxima admissível para o vidro recozido – Vidro duplo sem revestimento de baixa emissividade.....	62
Quadro 5.4 - Absortância máxima admissível para o vidro recozido – Vidro duplo com revestimento de baixa emissividade ($2,2 W/(m^2.K) < U_g$)	63
Quadro 5.5 - Absortância máxima admissível para o vidro recozido – Vidro duplo com revestimento de baixa emissividade ($1,5 W/(m^2.K) < U_g \leq 2,2 W/(m^2.K)$).....	63
Quadro 5.6 – Folhas de correr ou guilhotina sem estore interior.....	64
Quadro 5.7 – Absortância máxima para vidro simples aplicado em cobertura.....	64
Quadro 5.8 – Absortância máxima admissível para o vidro recozido aplicado em cobertura – Vidro duplo sem revestimento de baixa emissividade.....	65
Quadro A.1 – Principais propriedades do vidro	1
Quadro A.2 – Propriedades espectrofotométricas de alguns vidros simples (%)	2
Quadro B.1 – Constantes do modelo da radiação solar [9].....	2
Quadro C.1 – Bragança (I_3/V_2).....	1
Quadro C.2 – Lisboa (I_1/V_2)	1
Quadro C.3 – Porto (I_2/V_1).....	1
Quadro C.4 – Coimbra (I_1/V_2)	2
Quadro C.5 – Faro (I_1/V_2).....	2
Quadro C.6 – Évora (I_1/V_3).....	2
Quadro C.7 – Temperatura do ar considerada neste estudo ($^{\circ}C$)	3

CAIXILHARIA DE EDIFÍCIOS

Aspectos de segurança e resistência mecânica do vidro

1 – INTRODUÇÃO

1.1 - Aspectos gerais

O vidro para a construção, encontrando-se integrado em obras, deve permitir que estas cumpram as exigências essenciais especificados na Directiva dos Produtos da Construção (DPC) [2]. Deste modo os vidros são sujeitos às exigências seguidamente indicadas:

- Segurança em caso de incêndio, pois em alguns casos os vidros devem apresentar características de resistência ao fogo;
- Higiene, salubridade: não devendo emitir substâncias nefastas para o ambiente;
- Segurança na utilização: deve resistir às acções do vento e resistir à rotura por choque térmico e não deve apresentar risco para a segurança das pessoas, podendo ser exigidas características especiais de segurança, como seja reduzir o risco de queda de pessoas (no caso de guardas), prevenir o corte das pessoas nas suas arestas, tratamento anti-derrapante no caso de ser utilizado em pavimento;
- Isolamento sonoro: para satisfazer às exigências de isolamento sonoro das construções;
- Economia de energia e isolamento térmico: o vidro participando na limitação de espaços com exigências de conforto deve permitir minimizar as perdas térmicas no Inverno, os ganhos de calor no verão e assegurar a admissão da luz natural, através de um adequado isolamento térmico e controlo da transmissão da radiação solar.

Neste documento apresentam-se alguns aspectos relacionados com a segurança e a resistência mecânica dos vidros. Na secção 1.2 apresentam-se de uma forma resumida os vidros usualmente utilizados na construção e na secção 1.3 os aspectos relacionados com o risco de rotura dos envidraçados devido ao choque térmico. No capítulo 2 são evidenciados os aspectos de segurança a satisfazer pelos envidraçados, no capítulo 3 é apresentado um método para o dimensionamento dos vidros face à acção do vento e nos capítulos 4, 5 e 6 é apresentado um método de cálculo para apreciar o risco de choque térmico e as condições onde é requerido vidro de elevada resistência ao choque térmico.

Salienta-se que estas recomendações são aplicáveis ao vidro e que este quando instalado na caixilharia deverá satisfazer também aos requisitos aplicáveis à caixilharia, [27], [30] e [62].

1.2 – Vidro

1.2.1 - Vidro na construção

Na construção é utilizado usualmente o vidro silico-sodo-cálcico. O vidro obtido à saída do forno designa-se por produto base, podendo este depois ser objecto de transformação para alteração das suas propriedades (produto transformado) de forma a satisfazer as várias exigências aplicáveis. No Quadro 1.1 encontram-se indicados os diferentes tipos de vidro base e de vidro transformado.

Quadro 1.1 – Tipos de vidro

Produto base	Produto transformado
– Vidro <i>float</i> [38], [41]	– Vidro temperado termicamente [19]
– Vidro impresso [40], [41]	– Vidro termo-endurecido [33]
– Vidro aramado	– Vidro temperado quimicamente [21]
– Perfilado de vidro	– Vidro laminado [42] e [31]
– Vidro moldado (tijolo de vidro) [32]	– Vidro com revestimento superficial [17]
– Vidro estirado	– Vidro duplo [23]
	– Vidro dobrado
	– Vidro multicamada (camadas de vidro unidas a alta temperatura)
	– Espelho
	– Vidro de decoração
	– Vidros cromogénicos

Na construção corrente o vidro base adoptado é o vidro *float*. Os restantes produtos base têm uma utilização mais restrita, encontrando-se o vidro estirado em desuso.

Nos produtos transformados, os vidros com revestimento superficial enquadram uma grande variedade de produtos, nomeadamente: vidros de controlo solar com revestimentos pirolíticos ou catódicos, vidros serigrafados, vidros esmaltados, vidros com revestimentos de

Para limitar o risco de rotura devido ao choque térmico devem ser aplicados vidros de elevada resistência ao choque térmico, por exemplo:

- vidro temperado termicamente;
- vidro termoendurecido;
- vidro temperado quimicamente;
- vidro com baixo coeficiente de dilatação térmica (ex. Vidro borossilicato).

Para apreciar o risco de rotura do vidro recozido devido ao fenómeno de choque térmico devem ser considerados vários factores:

- ii) Condições climáticas, nomeadamente radiação solar incidente na fachada, temperatura do ar, velocidade do vento.
- iii) Existência de fontes de calor nas zonas próximas do envidraçado.
- iv) Existência de sombras projectadas no envidraçado.
- v) Natureza e constituição do vidro (vidro simples/vidro duplo, características espectrofotométricas de cada folha de vidro, isolamento térmico).
- vi) Estado de acabamento dos bordos do vidro.
- vii) Natureza da gola do vidro e do contorno do vão.
- viii) Características dos dispositivos de protecção solar do vão ou de motivos decorativos.

No capítulo 4 apresenta-se o método de cálculo destinado a apreciar o risco de choque térmico, baseado na norma francesa NF P 78-201-1/A1 [49] e no capítulo 5 são apresentados os resultados da aplicação desse método a alguns tipos de envidraçado de forma a especificar limites máximos da absorvância para a aplicação de vidro recozido. No capítulo 6 são apresentados alguns casos específicos de aplicação de vidro onde é requerido vidro de elevada resistência ao choque térmico devido às condições de temperatura no vidro.

2 - ASPECTOS DE SEGURANÇA

2.1 - Aspectos gerais e definição de vidro de segurança

A segurança associada aos envidraçados poderá comportar vários aspectos, que dependerão da aplicação específica, nomeadamente:

- A protecção das pessoas face ao risco de colisão no vidro, ao risco de ferimentos causados pelos fragmentos de vidro, bem como face ao risco de queda das pessoas. Para o risco de ferimentos causados pelos fragmentos são importantes o tipo e a dimensão dos fragmentos do vidro. No caso do risco de queda é relevante o facto de o vidro desaparecer e deixar uma abertura para o “vazio”;
- A segurança contra incêndio, minimizando o risco de propagação do fogo;
- A protecção contra o arrombamento e vandalismo, em habitações lojas, escritórios, etc. Neste caso o vidro deve permanecer no local e impedir o acesso ao interior;
- A protecção contra armas de fogo e explosões.

Para estes diferentes aspectos de segurança existem vários tipos de vidros. No entanto, por vidro de segurança entende-se um vidro destinado a minimizar o risco de ferimentos causado por fragmentos e que deve satisfazer aos seguintes requisitos:

- Resistir ao impacto sem quebrar, satisfazendo pelo menos à classe 3 de altura de queda da massa de impacto da norma EN 12600 [22].
- Se o vidro quebrar no ensaio de impacto, os fragmentos do vidro não devem ser causa de ferimentos nas pessoas. Ou seja, os fragmentos gerados devem: i) ser de pequena dimensão, satisfazendo aos critérios aplicáveis aos fragmentos do vidro temperado, EN 12150 [20]; ii) devem ficar agregados sem cair satisfazendo à classe 3B do ensaio de impacto da norma EN 12600 [22].

Seguidamente apresentam-se alguns exemplos de vidros de segurança:

- Os vidros laminados (usualmente com película intercalar de PVB – butiral de polivinil) nos quais, em caso de rotura, os fragmentos do vidro se mantêm aderentes ao intercalar sem cair, permitindo manter o vidro no local durante um certo período de tempo. De acordo com a norma EN ISO 12543-2 [42], um vidro laminado pode ser considerado um

vidro de segurança se pelo menos satisfizer à classe 3B¹ do ensaio de queda do pêndulo descrito na norma EN 12600 [22].

- Os vidros temperados termicamente que em caso de rotura apresentem fragmentos de pequena dimensão. Um vidro temperado é considerado um vidro de segurança se os seus fragmentos satisfizerem aos critérios definidos na norma EN 12150 [20].

Também se considera que podem satisfazer aos requisitos de segurança:

- O vidro aramado que dispõe de uma malha metálica que permite reter os fragmentos de vidro em caso de rotura, prevenindo o ferimento e também a queda de pessoas.
- Para vidros até 1,1 m × 1,1 m o vidro recozido com uma espessura de pelo menos 8 mm [57].

Para os vidros duplos serem vidros de segurança ambas as folhas devem ser de vidro de segurança. Saliencia-se que um vidro duplo composto por um vidro recozido e um vidro de segurança não é um vidro de segurança.

Seguidamente são apresentadas algumas recomendações referentes ao risco de ferimento causado pelos fragmentos (secção 2.2), à minimização do risco de colisão com o vidro (secção 2.3) e sobre o risco de queda no vazio (secção 2.4).

2.2 - Risco de ferimentos causados por fragmentos

Os envidraçados situados em zonas nas quais seja possível às pessoas circularem devem satisfazer aos requisitos de segurança destinados a minimizar o risco de ferimento dos ocupantes em caso de estes colidirem com o vidro.

¹ Corresponde ao ensaio com uma altura de queda do pêndulo de 190 mm. No caso de ocorrer a rotura do vidro, não são criados cortes ou aberturas no vidro que permitam a passagem de uma esfera de 76 mm sujeita a uma força não superior a 25 N. Se caírem fragmentos até 3 minutos após o ensaio, a massa total dos fragmentos não deve exceder a massa correspondente a 100 cm² do vidro original e o maior fragmente deve ter uma massa inferior a 44 cm² do vidro original.

2.2.1 - Zonas de risco

Consideram-se zonas de risco para ferimentos causados pela fragmentação do vidro, os envidraçados interiores ou exteriores situados em zonas comuns de edifícios de habitação ou de outros edifícios, seguidamente indicados, Figura 2.1 [48] e [57]:

- Portas e folhas fixas adjacentes até uma largura de 1,5 m e a toda a altura do vão.
- A zona entre o pavimento e a altura de 0,80 m.
- Vidros situados na cobertura.
- Podem ser excluídas as portas contendo folhas de vidro recozido com pelo menos 6 mm de espessura e com um dos lados do vidro não superior a 0,25 m e uma área de cada vidro não superior a 0,5 m².

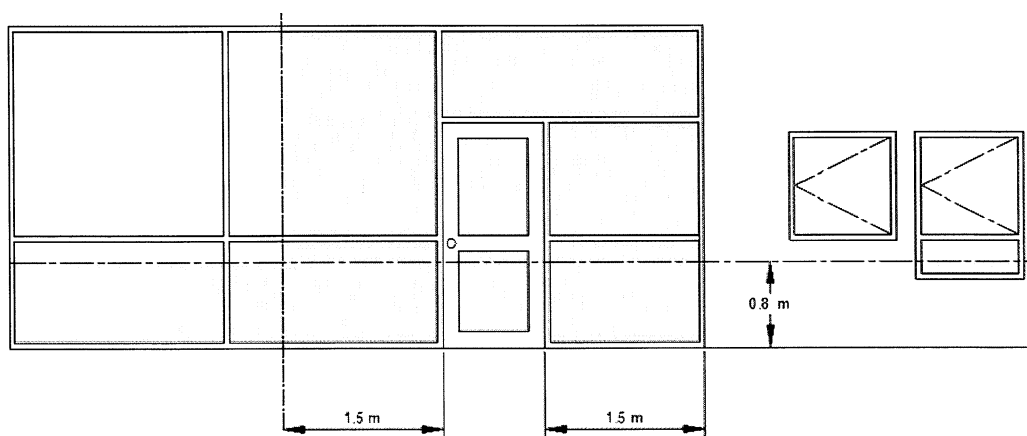


Figura 2.1 – Zonas críticas de aplicação de envidraçados

Além destas zonas gerais existem alguns casos particulares que são detalhados seguidamente:

a) Edifícios de habitação:

- Os envidraçados nos quais a sua zona inferior esteja situada a menos de 0,80 m do pavimento e que não sejam protegidos do acesso de crianças. O dispositivo de protecção do vidro pode ser uma grelha rígida/perfis com aberturas não superiores a 11 cm e com altura não inferior a 0,80 m.

b) Estabelecimentos escolares:

- Os vidros que confinem com zonas de circulação e vidros situados em locais desportivos (com ou sem jogos com bola).
- Na definição de zona crítica em vez de 0,8 m referidos anteriormente devem ser considerados os valores indicados no Quadro 2.1 [8], consoante o grau de ensino.

Quadro 2.1 – Alturas de referência para estabelecimentos escolares

Ensino pré-escolar	1,5 m
1º ciclo	1,7 m
2º ciclo e superior	1,8 m

2.2.2 - Vidros a adoptar

Nas zonas de risco deve ser aplicado vidro de segurança ou vidros que satisfaçam os requisitos de segurança. Caso contrário (ou em complemento), o envidraçado deve ser protegido com guardas ou outros elementos que inviabilizem o fácil contacto das pessoas com o vidro e que minimizem a queda de fragmentos de vidro sobre zonas com pessoas.

Nos envidraçados das coberturas, para evitar a queda de fragmentos, deve ser aplicado apenas vidro laminado. No caso de ser aplicado um vidro duplo, o vidro laminado deve estar do lado interior. Também deve ser aplicado vidro laminado do lado exterior caso exista possibilidade de impacto desse lado.

Caso seja utilizado vidro laminado no vidro duplo de segurança este deve ser aplicado no lado onde seja previsível ocorrer o choque ou dos dois lados se o choque for provável dos dois lados.

Além destes requisitos, refere-se que devem ser cumpridos os seguintes requisitos complementares:

- Não é admissível a aplicação de vidro simples recozido em envidraçados com bordos livres em zonas de passagem.
- Nas portas de vidro deve ser aplicado vidro temperado devido às exigências de resistência mecânica aplicáveis às zonas de corte e fixação.

2.2.3 - Informação complementar

Quando se pretender minimizar o impacto da queda dos fragmentos de vidro deve ser adoptado vidro laminado ou então devem existir elementos de retenção de fragmentos de vidro. Consideram-se elementos com capacidade de reter os fragmentos de vidro os seguintes [59]:

- as varandas existentes em cada piso que apresentem um comprimento de pelo menos 1/3 da distância do ponto mais alto do envidraçado ao pavimento (Figura 2.2), se a varanda tiver

um ressalto de pelo menos 10 cm na extremidade o seu comprimento deve ser pelo menos $1/2,5$ da distância do ponto mais alto do envidraçado ao pavimento (Figura 2.2).

- uma pala, laje, zona isolada, etc, com um comprimento de pelo menos $1/10$ da altura do edifício ou da distância da pala à cota mais elevada dos envidraçados, com um valor mínimo de 1,5 m, para edifícios com altura (H) não superior a 28 m. Para edifícios de altura superior a 28 m, ou envidraçados com uma elevação em relação à pala superior a 28 m a pala deve ter um comprimento de pelo menos $H/20+1,4$ m em que H é altura do edifício ou a distância da pala à cota mais elevada dos envidraçados (Figura 2.3).

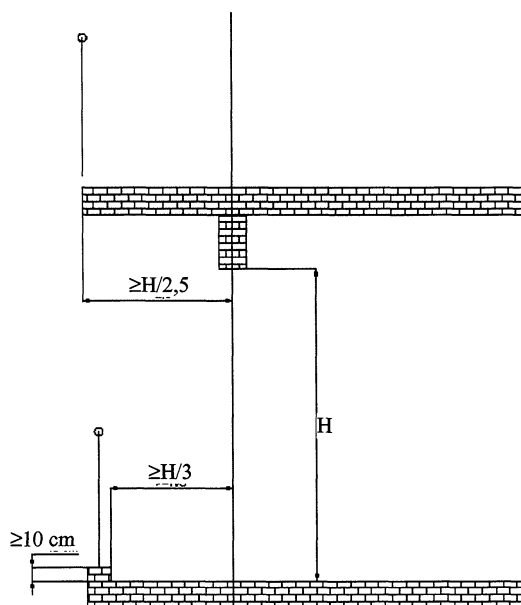


Figura 2.2 – Ilustração do comprimento de palas ou varandas

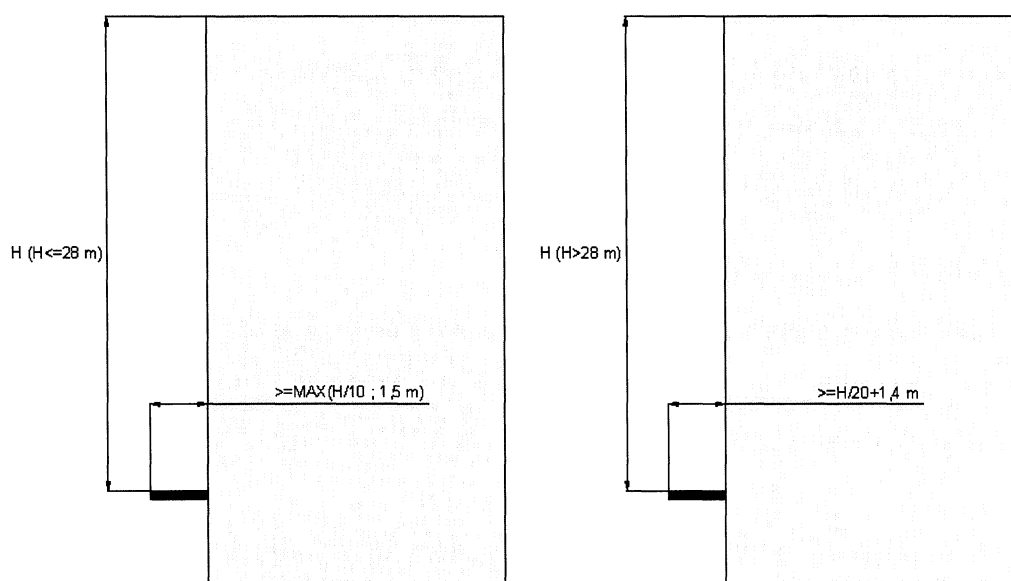


Figura 2.3 – Ilustração do comprimento de palas ou varandas

A utilização de vidro laminado nas fachadas VEFP apresenta o risco de este poder cair inteiro, em caso de rotura, devido à usual pequena dimensão dos pontos de fixação do vidro. Nesse sentido, quando for prevista a aplicação de vidro laminado em fachadas VEFP devem ser efectuados ensaios destinados a comprovar a capacidade de a fachada (peças de fixação) reter o vidro, mesmo quando este se encontra partido. Na ausência de outra informação pode ser adoptado o método de ensaio previsto na norma ASTM C 1048 [10].

Usualmente as peças de fixação das fachadas VEFP para vidros laminados apresentam uma área de contacto superior às das peças de fixação das fachadas VEFP sem vidro laminado, Figura 2.4, estando prevista a aplicação de vidro laminado com a composição vidro temperado/temperado ou temperado/termoendurecido.

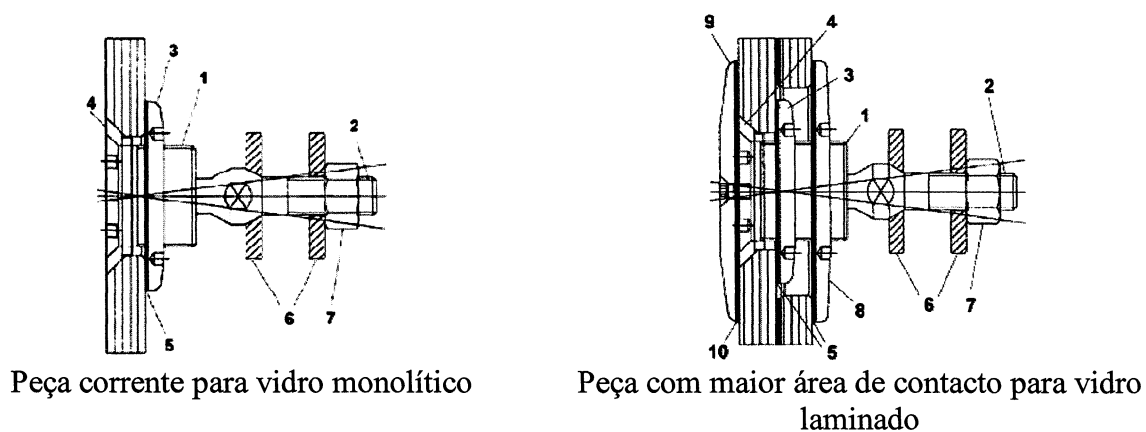


Figura 2.4 – Peças de fixação de fachadas VEFP [11]

2.3 - Segurança contra choques – visualização do vidro transparente

Apesar de os envidraçados poderem resistir ao impacto das pessoas, para minimizar o risco de as pessoas colidirem com vidros transparentes estes devem ter motivos decorativos que evidenciem a sua presença.

Considera-se que carecem de identificação os envidraçados com cotas situadas a menos de 0,60 m do pavimento e a mais de 1,50 m do pavimento [48]. De uma forma geral, o vidro é visível quando satisfaz aos requisitos indicados no Quadro 2.2 (Figura 2.5 e Figura 2.6).

Quadro 2.2 – Motivos ou condições que permitem identificar o vidro transparente

Portas	Outros vidros
<ul style="list-style-type: none"> – Portas com largura não superior a 400 mm [57] – Portas com travessa ou barra entre as cotas 0,6 m e 1,5 m [57] – Portas com perfis ou puxadores com uma área significativa [57], pelo menos de 400 cm² situada entre 0,6 m e 1,5 m – Portas com um motivo decorativo opaco de pelo menos 100 cm² situado a 1,5 m do pavimento – Portas com perfis substanciais, apresentando uma fracção envidraçada inferior a 0,80 	<ul style="list-style-type: none"> – Uma faixa, perfis, ou outro motivo situado entre 0,6 m e 1,5 m do pavimento, com uma área de 400 cm² por cada 1 m de largura de vidro – Vidros com largura não superior a 1,5 m fixos em toda a periferia por perfis ou outros elementos opacos com uma fracção envidraçada não superior a 0,80

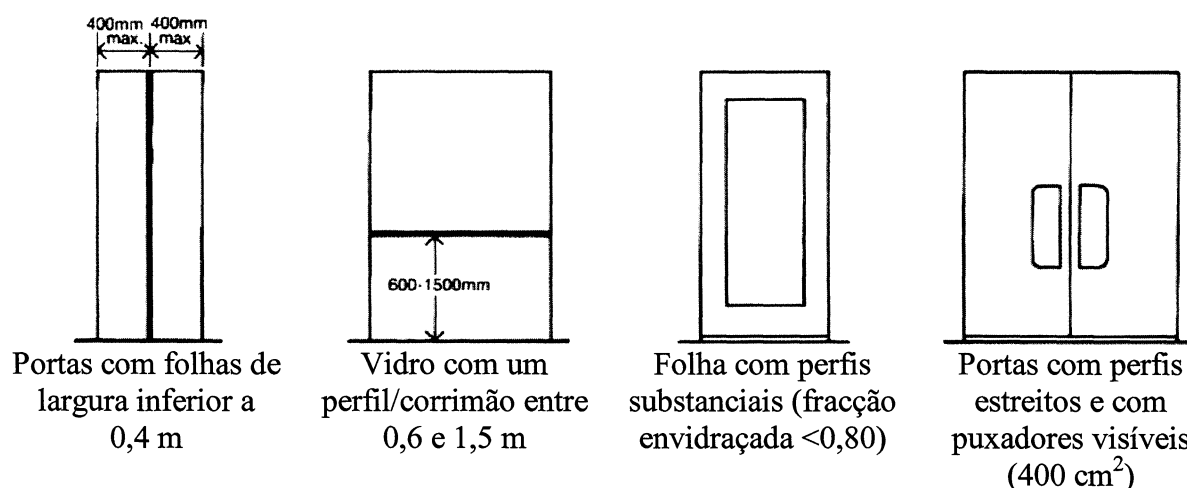


Figura 2.5 – Exemplos de envidraçados que não requerem motivos para evidenciar a presença de vidro [57]

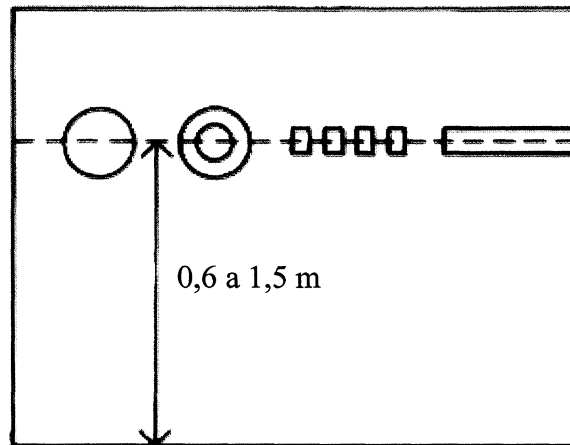


Figura 2.6 – Exemplo de motivos decorativos a aplicar para evidenciar a presença de um vidro transparente (400 cm²/m de largura de vidro) [57]

Em divisórias de vidro com espessura inferior a 8 mm, recomenda-se a colocação de um rodapé com uma altura não inferior a 12 cm, para proteger o vidro de eventuais choques ao nível do pavimento.

2.4 - Risco de queda

2.4.1 - Zonas de risco

Considera-se que o vidro deve contribuir para minimizar o risco de queda das pessoas em “precipício” quando não se encontra protegido por uma guarda [15] e satisfaz a uma das seguintes condições:

- A zona inferior do envidraçado situa-se a menos de 1,0 m do pavimento, excluindo os envidraçados que confinam com varandas, corredores, terraços ou galerias, ou se situam no rés-do-chão ou nos quais a altura de queda seja inferior a 1,0 m.
- Os envidraçados de guardas que se situam a menos de 1,0 m do pavimento, excluindo os envidraçados que dão para varandas, corredores, terraços ou galerias, ou se situam no rés-do-chão.
- Quando o envidraçado constitui um pavimento ou degraus de escada.

2.4.2 - Vidros a adoptar

Os envidraçados aplicados em zonas de risco de queda devem resistir ao ensaio de impacto de corpo mole e de corpo duro [48], devendo satisfazer à classe 1B da EN 12600 [22]². Salienta-se que para este efeito é igualmente relevante o comportamento do caixilho ou do sistema de fixação do vidro.

De acordo com o guia [8] os vidros laminados indicados no Quadro 2.3 permitem satisfazer a esse requisito, em função da área do vidro. Também pode ser adoptado um vidro temperado que resista aos choques referidos, desde que exista uma protecção residual³ do vão.

Quadro 2.3 – Exemplos de vidro com capacidade para satisfazer aos requisitos de segurança contra o risco de queda

Superfície de vidro (m ²)	Vidro laminado
≤ 0,5 m ²	33.2
≤ 2,0 m ²	44.2
≤ 4,5 m ²	55.2
≤ 6,0 m ²	66.2

No caso de vidros duplos os dois vidros (interior e exterior) devem ser laminados, ou poderão ser adoptadas as combinações: vidro interior laminado e vidro exterior temperado (para em caso de rotura minimizar o risco de queda de fragmentos perigosos) ou vidro interior temperado e vidro exterior laminado.

2.5 - Outros aspectos

De acordo com [8], para protecção elementar dos bens (por ex. em vitrinas), deve ser aplicado um vidro bi-laminado (com pelo menos 10 mm de espessura) ou tri-laminado. No caso de ser aplicado vidro duplo é aconselhado aplicar o vidro laminado no lado interior.

Para protecção reforçada dos bens, de forma a retardar o arrombamento (vitrinas com objectos de valor, museus, moradias em locais isolados), deve ser adoptado um vidro com 3 ou 4 filmes de PVB.

² De forma complementar pode ser especificado o ensaio de corpo duro definido nas Directivas UEAtc [61], com uma esfera de aço de Ø50 mm e uma altura de queda de 0,75 m (energia de impacto de 3,75 J).

A norma EN 356 [36] define os métodos de ensaio dos vidros em relação à resistência ao arrombamento. As cinco classes mais baixas (P1A a P5A) são baseadas na capacidade de resistir ao impacto de uma esfera, enquanto as classes P6B a P8B são baseadas na resistência ao impacto de um machado.

Para protecção contra tiros de armas de fogo, deve ser adoptado vidro multi-laminado, com composição especial anti-bala. Para a qualificação destes vidros devem ser adoptados os métodos de ensaio e classificação definidos na norma EN 1063 [16]. Em relação à resistência à explosão, será também requerido um vidro multi-laminado, que deverá ser especificado em concordância com a norma EN 13541 [26].

³ Por protecção residual entende-se a existência de perfis situados pelo menos a 0,15 m, 0,45 m e 1,0 m do pavimento.

3 - RESISTÊNCIA AO VENTO DE VIDROS APLICADOS NA VERTICAL

3.1 - Aspectos gerais

Os envidraçados quando aplicados nas construções encontram-se sujeitos às acções do vento, do peso próprio e, em algumas zonas, da acção da neve e diferença de temperatura. Nos vidros aplicados na vertical a acção relevante é a acção do vento, pois o peso da neve é inexistente, o peso próprio actua no plano do vidro e é considerado no dimensionamento dos calços de apoio e a acção da temperatura é minimizada pelas folgas existentes no sistema de fixação do vidro.

A verificação da segurança é efectuada com base em estados limites últimos e estados limites de utilização [4]. Em relação aos envidraçados, a verificação do estado limite de utilização envolve normalmente o cumprimento dos limites aplicados à deformação do vidro, enquanto a verificação do estado limite último envolve a satisfação dos limites para prevenir a rotura do vidro.

As normas para o cálculo da espessura dos vidros para resistir à acção do vento encontram-se em preparação no CEN, não tendo até à data (nem é previsível) sido aprovados os prEN 13471-1 [5] e prEN 13471-2 [53].

Deste modo, apresenta-se seguidamente o método de cálculo baseado na norma NF P 78-201-1 [48] para o dimensionamento de vidros aplicados na vertical.

Para o cálculo da espessura dos vidros é indicado na secção 3.2 a acção do vento a considerar, na secção 3.3 o método de cálculo da espessura do vidro simples recozido. Tendo em conta os vários tipos de vidros existentes, na secção 3.4 é apresentado o método para determinar a espessura equivalente para esses tipos de vidro e na secção 3.5 é apresentado o método de cálculo da deformação máxima do vidro. Nas secções 3.6 e 3.7 é sintetizado o método de cálculo e é apresentado um exemplo de aplicação. Na secção 3.8 são apresentadas algumas recomendações aplicáveis a vidros de fachadas VEFP e na secção 3.9 são apresentados os resultados de um ensaio de rotura de um vidro e é efectuada uma comparação com o método de cálculo descrito.

3.2 - Quantificação da acção do vento

De acordo com o método de cálculo definido na norma [48] deve ser considerada a diferença de pressão associada ao estado limite de utilização [4]. Para quantificar a acção do

vento deve ser considerada a acção do vento correspondente a um período de retorno de 50 anos, em concordância com o RSA [4].

Nesse sentido, no dimensionamento dos vidros deve ser adoptada a velocidade característica do vento indicada no Quadro 3.1, tendo em conta os critérios de exposição adoptados no RSA e na selecção de caixilharia [4], [48] e [62]:

- Zona do território
 - o Zona A: inclui a generalidade do território, excepto os locais pertencentes à zona B;
 - o Zona B: inclui os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou altitude superior a 600 m.
- Rugosidade aerodinâmica
 - o Rugosidade do tipo I: a atribuir aos locais situados no interior de zonas urbanas em que predominem os edifícios de médio e grande porte;
 - o Rugosidade do tipo II: a atribuir à generalidade dos restantes locais, nomeadamente às zonas rurais com algum relevo e periferia de zonas urbanas;
 - o Rugosidade do tipo III: a atribuir aos locais situados em zonas planas sem vegetação de grande porte ou nas proximidades de extensos planos de água nas zonas rurais.
- Altura acima do solo

Tendo em conta que os valores dos coeficientes de pressão são valores referidos à cota da cobertura, a altura acima do solo deve ser medida desde o nível de referência até ao nível da cobertura. Para edificações (fachadas) próximas de terrenos inclinados, o nível de referência a partir do qual é medida a altura depende do declive do terreno e da distância que separa o edifício desse acidente geográfico. Nesse caso consideram-se três situações:

- a) Quando o ângulo que o terreno inclinado faz com a horizontal for superior a 60° , o nível de referência a considerar corresponde à linha em traço interrompido indicada na Figura 3.1.

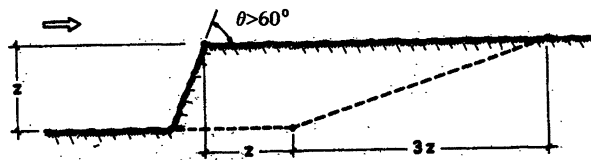


Figura 3.1 - Nível de referência em terrenos de inclinação superior a 60°

- b) Quando o ângulo que o terreno faz com a horizontal for superior a 15° e inferior a 60°, o nível de referência a considerar corresponde à linha em traço interrompido indicada na Figura 3.2.

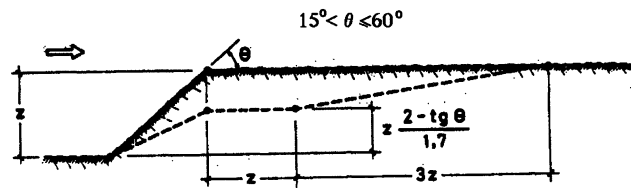


Figura 3.2 - Nível de referência em terrenos de inclinação superior a 15° e inferior a 60°

- c) Quando o ângulo que o terreno faz com a horizontal for inferior a 15°, o nível de referência a considerar corresponde à superfície do terreno.

Os valores característicos da velocidade do vento em função da altura podem ser determinados de acordo com as equações indicadas no Quadro 3.1, sendo a pressão dinâmica do vento determinada pela eq. 1. Para determinar a diferença de pressão a que se encontram sujeitos os vidros além da pressão dinâmica do vento é necessário conhecer os coeficientes de pressão (interior e exterior) do edifício, Quadro 3.2 e Quadro 3.3.

Quadro 3.1 – Valores característicos da velocidade de rajada do vento

	Rugosidade I	Rugosidade II	Rugosidade III
Zona A	$v = 18 \left(\frac{H}{10} \right)^{0,28} + 14$	$v = 25 \left(\frac{H}{10} \right)^{0,20} + 14$	$v = 32,4 \left(\frac{H}{10} \right)^{0,14} + 14$
Zona B	$v = 19,8 \left(\frac{H}{10} \right)^{0,28} + 15,4$	$v = 27,5 \left(\frac{H}{10} \right)^{0,20} + 15,4$	$v = 35,6 \left(\frac{H}{10} \right)^{0,14} + 15,4$

$$w = 0,613 v^2 \quad \text{eq. 1}$$

$$P = w(\delta p_e - \delta p_i) \quad \text{eq. 2}$$

Em que:

w, é a pressão dinâmica do vento (Pa)

v, é a velocidade do vento (m/s)


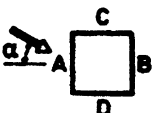
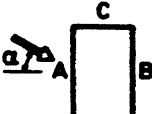
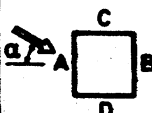
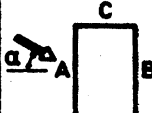
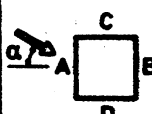

P, é a diferença de pressão entre o exterior e o interior (Pa)

H, é a altura acima do solo (m)

δp_e , é o coeficiente de pressão exterior

δp_i , é o coeficiente de pressão interior

Quadro 3.2 – Coeficientes de pressão exteriores (δp_e) [4]

Relações geométricas do edifício (*)		Planta	Direcção do vento α (graus)	Accões globais sobre as superfícies				Accões locais na faixa referenciada na figura 
$\frac{h}{b}$	$\frac{a}{b}$			A	B	C	D	
$\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$		0	+0,7	-0,2	-0,5	-0,5	-0,8
			90	-0,5	-0,5	+0,7	-0,2	
	$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} < 4$		0	+0,7	-0,25	-0,6	-0,6	-1,0
			90	-0,5	-0,5	+0,7	-0,1	
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$		0	+0,7	-0,25	-0,6	-0,6	-1,1
			90	-0,6	-0,6	+0,7	-0,25	
	$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} < 4$		0	+0,7	-0,3	-0,7	-0,7	-1,1
			90	-0,5	-0,5	+0,7	-0,1	
$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} < 6$	$1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$		0	+0,8	-0,25	-0,8	-0,8	-1,2
			90	-0,8	-0,8	+0,8	-0,25	
	$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} < 4$		0	+0,7	-0,4	-0,7	-0,7	-1,2
			90	-0,5	-0,5	+0,8	-0,1	

* h representa a altura dos edifícios, a e b representam respectivamente a maior e a menor dimensão em planta

Quadro 3.3 – Coeficientes de pressão interiores (δ_{pi}) [4]

Ausência de aberturas nas fachadas quando existe vento intenso	δ_{pi}
Quatro fachadas com permeabilidade semelhante	-0,3
Duas fachadas opostas com permeabilidade semelhante e duas impermeáveis:	
Vento normal às fachadas permeáveis	+0,2
Vento normal às fachadas impermeáveis	-0,3

De acordo com os valores dos coeficientes de pressão apresentados no RSA [4], a conjugação mais desfavorável conduz a uma diferença de coeficientes de pressão de 1,4 [62]⁴. Com estes pressupostos encontram-se indicadas no Quadro 3.4 as pressões de dimensionamento dos vidros. No Quadro 3.5 apresentam-se as pressões de dimensionamento para uma diferença de coeficientes de pressão unitária, de forma a facilitar o cálculo das pressões de dimensionamento para valores da diferença de coeficientes de pressão diferentes. Para envidraçados interiores, na ausência de outra informação, deve ser adoptada como pressão de cálculo o valor de 600 Pa [48].

Esta abordagem para a definição da pressão de dimensionamento é um pouco diferente da correspondente ao dimensionamento da caixilharia [62]. Efectivamente, no dimensionamento da caixilharia são definidas as pressões correspondentes ao estado limite de utilização (valor característico da acção) e ao estado limite último (1,5×Valor característico da acção), enquanto no dimensionamento do vidro de acordo com a norma NF P 78-201-1 [48] apenas é considerado explicitamente o valor característico da acção do vento (estado limite de utilização).

Esta situação não configura uma redução dos critérios de segurança, pois no método da norma NF P 78-201-1 [48] está intrínseco um coeficiente de segurança de 2, com base na comparação dos resultados obtidos com esse método face aos obtidos com as equações de Timoshenko (ver secção 3.3) e uma tensão de rotura do vidro recozido de 40 MPa. Por outro lado, se fosse efectuada a verificação de segurança para o estado limite último, à pressão de dimensionamento deveria ser aplicado um coeficiente de segurança de 1,5 e às propriedades do material deveria ser aplicado um coeficiente de segurança de 1,4 [53], pelo que se obteria

⁴ Zona de canto num edifício com $3/2 < h/b \leq 4$ ($\delta_{pe} = -1,2$), com duas fachadas opostas com permeabilidade semelhante e outras duas impermeáveis, com vento normal às fachadas permeáveis ($\delta_{pi} = +0,2$).

um coeficiente de segurança global ($\gamma_q \times \gamma_m$) de 2,1, próximo do valor 2 do método NF P 78-201-1 [48]⁵.

Em relação à resistência mecânica do vidro esta é tanto maior quanto mais rápida for a aplicação da carga, sendo referido por Beckett [12] que a tensão de rotura do vidro recozido é de 81 MPa para acções com a duração de 1 s, 69 MPa para acções com a duração de 10 s, 57 MPa para acções com a duração de 100 s e 39 MPa para acções com a duração de 27 h (carga estática).

No método de dimensionamento da espessura do vidro da norma NF P 78-201-1 também se encontra abrangida a satisfação do critério de uma flecha máxima no vidro de 1/100.

Quadro 3.4 – Pressão de cálculo ($\delta_p=1,4$)

Altura acima do solo	Região A			Região B		
	I	II	III	I	II	III
≤ 10 m	1000	1310	1850	1210	1580	2240
$10 \text{ m} < h \leq 18$ m	1060	1520	2080	1290	1840	2510
$18 \text{ m} < h \leq 28$ m	1240	1720	2270	1500	2080	2750
$28 \text{ m} < h \leq 40$ m	1410	1890	2440	1710	2290	2950
$40 \text{ m} < h \leq 50$ m	1530	2020	2560	1850	2440	3090
$50 \text{ m} < h \leq 60$ m	1640	2130	2660	1990	2570	3210
$60 \text{ m} < h \leq 70$ m	1740	2220	2740	2110	2690	3320
$70 \text{ m} < h \leq 80$ m	1830	2310	2820	2220	2800	3420
$80 \text{ m} < h \leq 90$ m	1920	2390	2890	2320	2890	3500
$90 \text{ m} < h \leq 100$ m	2000	2470	2960	2420	2990	3580

⁵ Caso se aplicasse o método da norma NF P 78-201-1 [48] com a pressão correspondente ao estado limite último, tal traduzia-se num incremento de cerca de 22% na espessura do vidro.

Quadro 3.5 – Pressão de cálculo ($\delta p=1,0$)

Altura acima do solo	Região A			Região B		
	I	II	III	I	II	III
≤ 10 m	720	930	1320	870	1130	1600
$10 \text{ m} < h \leq 18$ m	760	1090	1480	920	1320	1790
$18 \text{ m} < h \leq 28$ m	890	1230	1620	1070	1480	1960
$28 \text{ m} < h \leq 40$ m	1010	1350	1740	1220	1640	2110
$40 \text{ m} < h \leq 50$ m	1090	1440	1830	1320	1740	2210
$50 \text{ m} < h \leq 60$ m	1170	1520	1900	1420	1840	2300
$60 \text{ m} < h \leq 70$ m	1240	1590	1960	1500	1920	2370
$70 \text{ m} < h \leq 80$ m	1310	1650	2020	1580	2000	2440
$80 \text{ m} < h \leq 90$ m	1370	1710	2070	1660	2070	2500
$90 \text{ m} < h \leq 100$ m	1430	1760	2110	1730	2130	2560

3.3 - Cálculo da espessura de vidro simples recozido

No cálculo da espessura de vidro necessária para resistir à acção do vento é utilizada a fórmula de Timoshenko [58]. Para um vidro rectangular apoiado em 2, 3 e 4 lados a espessura do vidro simples pode ser obtida pela eq. 3.

$$e = a \sqrt{\frac{6 \times \beta \times P}{\sigma_{adm}}} \quad \text{eq. 3}$$

Em que:

e, espessura do vidro (mm)

a, num vidro apoiado em 4 lados corresponde ao lado de menor dimensão (m);
num vidro apoiado em 3 lados corresponde ao lado oposto ao que não se encontra apoiado (m);

num vidro apoiado em 2 lados corresponde à distancia entre apoios (m);

b, dimensão do lado perpendicular ao lado a (mm);

β , coeficiente que depende da relação b/a e do tipo de apoio do vidro;

P, é a pressão de dimensionamento (Pa);

σ_{adm} , tensão admissível para o vidro recozido (MPa).

Com base na fórmula teórica anterior, na norma NF P 78-201-1[48] são propostas as fórmulas indicadas no Quadro 3.6 para o cálculo da espessura do vidro simples, para os diferentes tipos de apoio do vidro.

Quadro 3.6 – Fórmulas de cálculo da espessura do vidro simples

Vidro apoiado em 4 lados	Vidro apoiado em 3 lados	Vidro apoiado em 2 lados
$\begin{cases} e = \sqrt{\frac{S \times P}{72}} & \text{se } L/l \leq 3 \\ e = \frac{l\sqrt{P}}{4,9} & \text{se } L/l > 3 \end{cases}$	Bordo livre corresponde ao lado maior $\begin{cases} e = \sqrt{\frac{L \times 3l \times P}{72}} & \text{se } L/l \leq 9 \\ e = \frac{3l\sqrt{P}}{4,9} & \text{se } L/l > 9 \end{cases}$	Bordo livre corresponde ao lado maior $e = \frac{L\sqrt{P}}{4,9}$
	Bordo livre corresponde ao lado menor $e = \frac{l\sqrt{P}}{4,9}$	Bordo livre corresponde ao lado menor $e = \frac{l\sqrt{P}}{4,9}$

No Quadro 3.6, as variáveis são:

- e, espessura do vidro (mm);
- P, pressão de dimensionamento (Pa);
- S, área do vidro (m²);
- L, lado maior do vidro (m);
- l, lado menor do vidro (m).

Este método de cálculo é baseado na condição de o apoio do vidro apresentar uma deformação não superior a 1/200 do vão, para a pressão de dimensionamento.

Para folhas fixas a espessura calculada com as fórmulas do Quadro 3.6 pode ser reduzida, de acordo com:

- Factor de redução de 0,8 para folhas de grande dimensão, com superfície superior a 5 m², apoiadas em 4 lados ou em 3 lados com o lado livre com um comprimento superior a 2 m e com o bordo superior do vidro situado a menos de 6 m de altura.
- Factor de redução de 0,9 nos restantes casos.

Tendo em conta as tolerâncias de fabrico do vidro *float*, na especificação da dimensão nominal do vidro deve ser considerada a espessura mínima aplicável (e_{\min}) à correspondente dimensão nominal (e_{nom}) Quadro 3.7 [38].

Quadro 3.7 – Espessura nominal e espessura mínima de dimensionamento do vidro (mm)

e_{nom}	3±0,2	4±0,2	5±0,2	6±0,2	8±0,3	10±0,3	12±0,3	15±0,5	19±1,0	25±1,0
e_{\min}	2,8	3,8	4,8	5,8	7,7	9,7	11,7	14,5	18,0	24,0

Independentemente dos resultados obtidos, a espessura do vidro recozido não deve ser inferior aos valores indicados no Quadro 3.8, função da largura do vidro.

Quadro 3.8 – Espessura nominal mínima admissível para o vidro recozido

Largura do vidro (m)	0,66	0,92	1,5	2
Espessura nominal do vidro (mm)	3	4	5	6

De forma complementar, a espessura nominal do vidro deve satisfazer aos seguintes requisitos:

- Para vidros situados a mais de 50 m do solo a espessura nominal mínima é de 6 mm.
- Para vidros de grande dimensão ($S > 5 \text{ m}^2$) a espessura nominal não deve ser inferior a 6 mm para vidros com o bordo inferior a mais de 0,6 m do pavimento e 8 mm no caso do vidro se encontrar a 0,6 m ou menos do pavimento.
- Para vidros com uma área superior a 1 m^2 e com um bordo livre⁶, a espessura nominal não deve ser inferior a 8 mm se o comprimento do bordo livre é inferior a 2 m e a 10 mm para comprimento iguais ou superiores a 2 m.

⁶ Por bordo livre entende-se um bordo do vidro que não se encontra fixo numa gola, nem é suportado por um contraventamento ou estabilizador.

3.4 - Factor de equivalência (ϵ) para outros tipos de vidro

Para outros tipos de vidro a verificação das condições de segurança pode ser efectuada com base numa espessura de vidro equivalente (e_{eq} , eq. 4) que deve ter um valor superior ao determinado pelas equações indicadas na secção 3.3 ($e_{\text{vidro simples recozido}}$), eq. 5. De uma forma simples o factor de equivalência pode ser determinado com base na tensão de trabalho dos vidros eq. 6 [14]. O factor de equivalência para vários tipos de vidro encontra-se indicado no Quadro 3.9.

$$e_{eq} = e/\epsilon \quad \text{eq. 4}$$

$$e_{eq} \geq e_{\text{vidro simples recozido}} \quad \text{eq. 5}$$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\text{tensão de trabalho vidro recozido}}{\text{tensão de trabalho do vidro}}} \quad \text{eq. 6}$$

No caso de vidros laminados ou duplos a espessura equivalente e_{eq} (eq. 4) pode ser obtida pelas as equações indicadas no Quadro 3.10 [14].

O método de cálculo da espessura equivalente indicado no Quadro 3.10 conduz a espessuras ligeiramente superiores às previstas com base na norma NF P 78-201-1 [48]. Por exemplo, para um vidro duplo simétrico a abordagem especificada na norma NF P 78-201-1 [48] conduz a uma espessura de cada chapa de vidro de $0,75 \times e_{\text{vidro simples recozido}}$, enquanto o método indicado no Quadro 3.10 conduz a uma espessura de $0,81 \times e_{\text{vidro simples recozido}}$. De forma semelhante, para um vidro laminado simétrico, a abordagem especificada na norma NF P 78-201-1 [48] conduz a uma espessura de cada chapa de vidro de $0,65 \times e_{\text{vidro simples recozido}}$, enquanto o método indicado no Quadro 3.10 conduz a uma espessura de $0,71 \times e_{\text{vidro simples recozido}}$.

Quadro 3.9 – Factor de equivalência da espessura de vidros (ϵ)

Tipo de vidro	ϵ
Vidro simples, plano aramado	1,20
Vidro aramado incolor	
Vidro impresso aramado	
Vidro plano temperado	0,80
$P \leq 900$ Pa	
$P > 900$ Pa	0,75
Vidro termoendurecido	0,90
Vidro laminado*	1,30
Com duas chapas de vidro de espessura próxima**	
Com três chapas vidros de espessura próxima **	1,60
Vidro duplo* (com duas chapas de vidro de espessura próxima)**	1,50
Vidro triplo* (com três chapas de vidro de espessura próxima)**	1,70

* O valor e da eq. 4 corresponde à soma das espessuras de cada chapa de vidro

** Diferença de espessura entre chapas de vidro não superior a 2mm

Quadro 3.10 – Espessura equivalente para cálculo do estado de tensão do vidro laminado e vidro duplo assimétricos

Tipo de vidro	Espessura equivalente
Vidro laminado com n chapas de vidro de igual espessura (e')	$e_{eq} = e' \sqrt{n}$
Vidro laminado assimétrico (e_1 espessura da chapa de vidro mais espessa)	$e_{eq} = e_1 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^3}{e_1^3}}$
Vidro duplo simétrico (cada chapa de vidro de espessura e')	$e_{eq} = 1,226 \times e'$
Vidro duplo assimétrico (e_1 espessura da chapa de vidro mais espessa)	$e_{eq} = e_1 \sqrt{\frac{e_1^3 + e_2^3}{1,33 \times e_1^3}}$

3.5 - Cálculo da flecha dos vidros

Tendo em conta a maior resistência do vidro temperado face ao vidro recozido, para a mesma pressão de dimensionamento é possível obter menores espessuras no vidro temperado (teoricamente $0,58 \times e$, de acordo com a eq. 6), o que se pode traduzir numa maior deformação do vidro, em comparação com o vidro recozido. Nesse sentido, para evitar deformações excessivas do vidro, a flecha máxima deve ser inferior a:

- 1/100 em vidros simples
- 1/150 em vidro duplos.

No Quadro 3.11 apresentam-se as fórmulas de cálculo da deformada máxima para vidros simples apoiados em 2 e 4 lados. Para outros tipos de vidro deve ser adoptada a espessura de vidro equivalente indicada no Quadro 3.13.

Quadro 3.11 – Fórmulas de cálculo da flecha do vidro

Vidro apoiado em 2 lados	Vidro apoiado em 4 lados
$f = \frac{0,142 \times P \times l^4}{E \times e^3}$	$f = \frac{\alpha \times P \times l^4}{E \times e^3}$

Em que:

f é a deformação máxima do vidro (m);

P é a pressão de dimensionamento (Pa);

l, é o comprimento do lado de menor dimensão do vidro (m);

E, é o módulo de elasticidade do vidro (MPa);

e é a espessura do vidro (m);

α , é o coeficiente indicado no Quadro 3.12.

Quadro 3.12 – Coeficiente (α)

l/L	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,5	3,0	∞
α	0,044	0,062	0,077	0,091	0,102	0,111	0,123	0,134	0,142

Quadro 3.13 – Espessura equivalente para cálculo da deformação máxima do vidro

Tipo de vidro	Espessura equivalente
Vidro laminado com n vidros de igual espessura (e')	$e_{eq} = e' \sqrt[3]{n}$
Vidro laminado assimétrico	$e_{eq} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n e_i^3}$
Vidro duplo simétrico (cada chapa de vidro de espessura e')	$e_{eq} = 1,146 \times e'$
Vidro duplo assimétrico	$e_{eq} = \sqrt[3]{\frac{e_1^3 + e_2^3}{1,33}}$

3.6 – Resumo do método de cálculo

Nesta secção sintetiza-se o método de dimensionamento da espessura do vidro e a informação necessária para esse efeito.

Folha 1 - Informação sobre o edifício e cálculo da pressão de dimensionamento			
Designação:			
Zona do território:		Zona A	Zona B
Rugosidade aerodinâmica:		I	II III
Altura de referência do edifício (H)		(m)	
Calcular coeficiente de pressão		Sim	Não
Maior dimensão do edifício em planta (a)		(m)	
Menor dimensão do edifício em planta (b)		(m)	
a/b=	h/b=	δp_e (Quadro 3.2) Canto	
		δp_e (Quadro 3.2) Centro fachada	
δp_i (Quadro 3.3)			
P($\delta p=1$)(Quadro 3.5)		(Pa)	
Pzona de canto = P($\delta p=1$)×(δp_e Canto - δp_i)		(Pa)	
Pcentro da fachada = P($\delta p=1$)×(δp_e Centro fachada - δp_i)		(Pa)	
P(zona de canto e centro da fachada) Quadro 3.4			(Pa)

Na determinação dos coeficientes de pressão, além dos valores indicados no Quadro 3.2 e no Quadro 3.3, poderão ser adoptados valores mais específicos, por exemplo os indicados na norma EN 1991-1-1 [35], que incluem a solução de fachadas de dupla pele. Em relação à determinação dos coeficientes de pressão, salienta-se que também poderá ser relevante ponderar, a situação correspondente à fase de construção.

Folha 2 - Condições de aplicação do vidro e cálculo da espessura			
Pressão dimensionamento (Folha 1)			(Pa)
Dimensão do vidro		L (m)	l (m)
L/l		S	(m ²)
Fórmula de cálculo da espessura do vidro simples (Quadro 3.6):			
2 apoios	3 apoios	4 apoios	e _a (mm)
Folha fixa: Sim k1=0,9 Não k1=1,0			k1
Folha fixa de grande dimensão, com superfície superior a 5 m ² , fixa em 4 lados ou em 3 lados com o lado livre com um comprimento superior a 2 m e em que o bordo superior do vidro se situa a menos de 6 m. Sim k2=0,89, Não k2=1,0			k2
Espessura vidro simples $e = e_a \times k1 \times k2$			(mm)
Vidro recozido			
Espessura nominal deve satisfazer (Quadro 3.7, Quadro 3.8 e requisitos secção 3.3)			e vidro simples recozido (mm)
Outros vidros*:			
Factor de equivalência (ε) (Quadro 3.9)			
Espessura $e \geq e_{\text{vidro simples recozido}} \times \epsilon$			

* No caso de vidro laminado e vidro duplo simétrico (chapas de vidros com uma diferença de espessura inferior a 2mm) a espessura e é dada pela soma da espessura de cada uma das chapas de vidro de acordo com o referido no Quadro 3.9. No caso de os vidros serem assimétricos devem ser adoptadas as equações indicadas no Quadro 3.10 e verificado que $e_{eq} \geq e_{\text{vidro simples recozido}}$.

3.7 - Exemplo de aplicação

Para exemplificar o método de cálculo da espessura dos vidros admita-se que se está a dimensionar os vidros para serem aplicados numa fachada-cortina de um edifício com uma altura de referência de 40 m, situado na zona de Lisboa. Está prevista a aplicação de um vidro duplo, de 1,5 m × 1,7 m. Em planta o edifício apresenta as dimensões de 50 m × 20 m.

Folha 1 - Informação sobre o edifício e cálculo da pressão de dimensionamento				
Designação:				
Zona do território:		Zona A	Zona B	
Rugosidade aerodinâmica:		I	II	III
Altura de referência do edifício (h)		40 (m)		
Calcular coeficiente de pressão		Sim	Não	
Maior dimensão do edifício em planta (a)		50 (m)		
Menor dimensão do edifício em planta (b)		20 (m)		
a/b= 2,5	h/b=2	δp_e (Quadro 3.2) Canto	-1,2	
		δp_e (Quadro 3.2) Centro fachada	+0,8	
δp_i (Quadro 3.3) 4 fachadas com permeabilidade semelhante		-0,3		
P($\delta p=1$)(Quadro 3.3)		1350 (Pa)		
P _{zona de canto} = P($\delta p=1$)×(δp_e Canto - δp_i)		1215 (Pa)		
P _{centro da fachada} = P($\delta p=1$)×(δp_e Centro fachada - δp_i)		1485 (Pa)		
P(zona de canto e centro da fachada) Quadro 3.4			1890 (Pa)	

Folha 2 - Condições de aplicação do vidro e cálculo da espessura			
Pressão dimensionamento (Folha 1)		1485 (Pa)	
Dimensão do vidro		1,7 L (m)	1,5 l (m)
L/l	1,33	S	2,55 (m ²)
Fórmula de cálculo da espessura do vidro simples (Quadro 3.6):			
2 apoios	3 apoios	4 apoios $e = \sqrt{\frac{S \times P}{72}}$	e _a (mm) 7,25
Folha fixa: Sim k1=0,9 Não k1=1,0		k1 1,0	
Folha fixa de grande dimensão, com superfície superior a 5 m ² , fixa em 4 lados ou em 3 lados com o lado livre com um comprimento superior a 2 m e em que o bordo superior do vidro se situa a menos de 6 m. Sim k2=0,89 Não k2=1,0		k2 1,0	
Espessura vidro simples e = e _a × k1 × k2		7,25 (mm)	
Vidro recozido			
Espessura nominal deve satisfazer (Quadro 3.7, Quadro 3.8 e requisitos secção 3.3)		e vidro simples recozido (mm) 7,25	
Outros vidros*:		Vidro Duplo	
Factor de equivalência (ε) (Quadro 3.9)		1,5	
Espessura e ≥ e _{vidro simples recozido} × ε		10,9 (mm)	

* No caso de vidro laminado e vidro duplo simétrico (chapas de vidros com uma diferença de espessura inferior a 2mm) a espessura e é dada pela soma da espessura de cada uma das chapas de vidro de acordo com o referido no Quadro 3.9. No caso de os vidros serem assimétricos devem ser adoptadas as equações indicadas no Quadro 3.10 e verificado que $e_{eq} \geq e_{\text{vidro simples recozido}}$.

Com base na espessura equivalente obtida de 10,9 mm, parece ser possível aplicar um vidro duplo com a composição 6+5. Contudo, atendendo à soma das espessuras mínimas desses vidros de 10,6 (5,8 e 4,8 - Quadro 3.7), revela-se necessário adoptar vidros de espessura superior, por exemplo 6+6. Também poderia ser adoptada uma composição assimétrica 8+5, a qual conduz a uma espessura equivalente de 7,4 mm (Quadro 3.10) e permite satisfazer ao critério ($e_{eq} \geq e_{\text{vidro simples recozido}}$).

Neste exemplo efectuou-se apenas o dimensionamento para as folhas móveis da fachada-cortina, por corresponderem à condição mais desfavorável face às folhas fixas, pois

não é razoável nas zonas transparentes aplicar vidros com espessuras diferentes, pois tal pode-se traduzir em ligeiras alterações da cor entre vidros adjacentes.

Neste exemplo também se evidencia a adequação de ser efectuado um estudo dos coeficientes de pressão mais adequados para o edifício, pois os valores por defeito (com δp de 1,4) podem majorar significativamente a pressão de dimensionamento, neste exemplo 1890 Pa face a 1485 Pa.

Neste exemplo, com fachadas com permeabilidade uniforme ($\delta p_i = -0,3$) é estimada uma pressão de dimensionamento para a zona dos cantos da fachada inferior à da zona central da fachada, pelo que se adoptou como pressão de dimensionamento a da zona central da fachada, pois para alguns rumos as zonas de canto comportam-se como zonas do centro da fachada. No entanto, seria admissível, em vez de se considerar o valor máximo de δp_e , efectuar uma selecção da condição mais desfavorável por fachada, tendo em conta o rumo do vento.

3.8 - Fachadas com vidros fixos pontualmente

No âmbito do estudo de viabilidade técnica das fachadas com vidros fixos pontualmente é efectuada a análise da resistência mecânica do vidro e são indicadas as regras de dimensionamento, espessuras e tipos de vidro a adoptar, devendo a utilização destas fachadas ser condicionada à satisfação dos requisitos resultantes desse estudo.

Como pré-dimensionamento da chapa de vidro a adoptar, pode ser utilizado o método de cálculo definido no guia da UEA_{tc} [60].

Como condições a apreciar refere-se o estado limite de utilização, para o qual não deve ser excedida uma flecha de 1/100 entre pontos de fixação do vidro nos vidros simples e 1/150 nos vidros duplos, sem contudo ser excedida uma deformação máxima de 50 mm face aos pontos de fixação do vidro [59]. Em relação ao estado limite último, a pressão de dimensionamento é 1,5 vezes a pressão correspondente ao estado limite de utilização, não devendo a tensão máxima no vidro exceder a tensão admissível [59].

3.9 - Ensaio de rotura de um vidro simples recozido instalado num caixilho de alumínio

Com o objectivo de apreciar a metodologia do dimensionamento dos vidros, foi realizado um ensaio de rotura de um vidro simples recozido de 6 mm de espessura, instalado

5 - VALORES MÁXIMOS DA ABSORTÂNCIA PARA O VIDRO RECOZIDO DE MODO A MINIMIZAR A ROTURA POR CHOQUE TÉRMICO

Nos quadros seguintes são indicados os valores máximos da absorção solar dos vidros recozidos para limitar o risco de rotura por choque térmico. Estes valores são apresentados para vidros admitindo a aplicação de uma cortina pelo interior, suficientemente afastada do vidro para permitir a ventilação em pelo menos três lados (distância de 5 cm ao vidro) e a possibilidade de existirem sombras projectadas no vidro, considerando que as persianas exteriores não estão em contacto com o vidro.

Nos cálculos foi admitida uma protecção interior de referência, com as propriedades indicadas no Quadro 5.1 e afastada do vidro 5 cm. Em salas onde seja previsível a ocultação total do envidraçado, como por exemplo, salas de projecção, devem ser consideradas as propriedades da protecção solar de cor preta, as quais carecem de cálculos específicos de acordo com o capítulo 4.

Quadro 5.1 - Propriedades do dispositivo de protecção do vão

	Protecção de referência	Protecção preta
τ	10%	0%
α	50%	90%
ρ	40%	10%

Os resultados são apresentados para vidros na vertical ($\beta > 60^\circ$), que compreende os vidros cujo plano faz um ângulo superior a 60° face ao pavimento, e para vidros na horizontal ($\beta < 30^\circ$), que são os vidros que fazem um ângulo inferior a 30° com o pavimento.

Na definição da absorção máxima dos vidros foi seleccionada a condição mais desfavorável, para cada inércia térmica da gola, não sendo registada uma variação significativa entre as zonas climáticas I1, I2 e I3, pelo que os valores indicados nos quadros seguintes são válidos para todo o continente.

5.1 - Vidros na vertical ($\beta > 60^\circ$)

Nos quadros 5.2 a 5.6 apresentam-se os resultados referentes à aplicação do método a vidros na vertical. Nos quadros, VE corresponde ao vidro exterior e VI ao vidro interior.

Quadro 5.2 – Absortância máxima admissível para o vidro recozido – Vidro simples

Persiana Interior	Natureza do vidro	Apoio do vidro	Bordo bruto			Bordo roçado		
			Inércia da Gola			Inércia da Gola		
			Fraca	Média	Forte	Fraca	Média	Forte
Não	Monolítico	Periférico	0,67	0,55	0,35	0,83	0,55	0,35
		Outro	0,51	0,41	0,22	0,64	0,41	0,22
	Laminado	Periférico	0,47	0,37	0,19	0,67	0,55	0,35
		Outro	0,35	0,27	0,10	0,51	0,41	0,22
Sim	Monolítico	Periférico	0,46	0,34	0,20	0,64	0,34	0,20
		Outro	0,31	0,22	0,10	0,43	0,22	0,10
	Laminado	Periférico	0,27	0,19	*	0,46	0,34	0,20
		Outro	0,18	0,11	*	0,31	0,22	0,10

* deve ser aplicado vidro com elevada resistência ao choque térmico

Quadro 5.3 - Absortância máxima admissível para o vidro recozido – Vidro duplo sem revestimento de baixa emissividade

Persiana Interior	Natureza do vidro	Apoio do vidro	Bordo bruto						Bordo roçado					
			Inércia da Gola						Inércia da Gola					
			Fraca		Média		Forte		Fraca		Média		Forte	
			VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI
Não	Monolítico	Periférico	0,44	0,49	0,33	0,35	0,24	0,19	0,57	0,61	0,45	0,46	0,33	0,29
		Outro	0,31	0,38	0,22	0,24	0,14	*	0,41	0,47	0,31	0,33	0,22	0,17
	Laminado	Periférico	0,28	0,35	0,19	0,21	0,12	*	0,44	0,49	0,33	0,35	0,24	0,19
		Outro	0,18	0,26	0,11	0,13	*	*	0,31	0,38	0,22	0,24	0,14	*
Sim	Monolítico	Periférico	0,41	0,13	0,34	*	0,18	*	0,54	0,21	0,44	0,15	0,26	*
		Outro	0,30	*	0,24	*	0,10	*	0,39	0,11	0,32	*	0,16	*
	Laminado	Periférico	0,27	*	0,21	*	*	*	0,41	0,13	0,33	*	0,18	*
		Outro	0,19	*	0,15	*	*	*	0,30	*	0,23	*	0,10	*

* deve ser aplicado vidro com elevada resistência ao choque térmico

Quadro 5.4 - Absortância máxima admissível para o vidro recozido – Vidro duplo com revestimento de baixa emissividade ($2,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) < U_g$)

Persiana Interior	Natureza do vidro	Apoio do vidro	Bordo bruto						Bordo roçado					
			Inércia da Gola						Inércia da Gola					
			Fraca		Média		Forte		Fraca		Média		Forte	
VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	
Não	Monolítico	Periférico	0,40	0,46	0,30	0,31	0,22	0,17	0,52	0,57	0,41	0,41	0,31	0,26
		Outro	0,28	0,34	0,20	0,21	0,12	*	0,37	0,44	0,28	0,29	0,20	0,15
	Laminado	Periférico	0,25	0,31	0,17	0,18	0,10	*	0,40	0,46	0,30	0,31	0,22	0,17
		Outro	0,16	0,23	0,10	0,10	*	*	0,28	0,34	0,20	0,21	0,12	*
Sim	Monolítico	Periférico	0,43	0,11	0,35	*	0,21	*	0,54	0,18	0,45	0,11	0,29	*
		Outro	0,31	*	0,26	*	0,14	*	0,40	0,10	0,33	*	0,20	*
	Laminado	Periférico	0,28	*	0,24	*	0,12	*	0,43	0,11	0,35	*	0,21	*
		Outro	0,20	*	0,17	*	0,07	*	0,31	*	0,26	*	0,14	*

* deve ser aplicado vidro com elevada resistência ao choque térmico

Quadro 5.5 - Absortância máxima admissível para o vidro recozido – Vidro duplo com revestimento de baixa emissividade ($1,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) < U_g \leq 2,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

Persiana Interior	Natureza do vidro	Apoio do vidro	Bordo bruto						Bordo roçado					
			Inércia da Gola						Inércia da Gola					
			Fraca		Média		Forte		Fraca		Média		Forte	
VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	
Não	Monolítico	Periférico	0,36	0,41	0,27	0,27	0,19	0,15	0,47	0,51	0,37	0,37	0,28	0,23
		Outro	0,25	0,30	0,18	0,18	0,11	*	0,34	0,39	0,25	0,25	0,18	0,13
	Laminado	Periférico	0,22	0,28	0,15	0,15	*	*	0,36	0,41	0,27	0,27	0,19	0,15
		Outro	0,14	0,20	*	*	*	*	0,25	0,30	0,18	0,18	0,11	*
Sim	Monolítico	Periférico	0,41	0,10	0,36	*	0,24	*	0,53	0,16	0,46	*	0,31	*
		Outro	0,31	*	0,26	*	0,17	*	0,39	*	0,34	*	0,23	*
	Laminado	Periférico	0,28	*	0,24	*	0,15	*	0,41	0,10	0,36	*	0,24	*
		Outro	0,21	*	0,18	*	0,10	*	0,31	*	0,26	*	0,17	*

* deve ser aplicado vidro com elevada resistência ao choque térmico

Tendo em conta que nas janelas de correr ou de guilhotina as folhas podem permanecer abertas e sobrepostas durante algum tempo, foi analisado o risco de rotura por choque térmico para a situação em que as folhas permanecem abertas e sobrepostas, Quadro 5.6. Efectivamente, quando as folhas permanecem abertas e sobrepostas, o caixilho pode ter

um comportamento que se assemelha a um vidro quádruplo, devido à baixa ventilação do espaço de ar entre as folhas. Esta verificação para a situação equivalente a um vidro quádruplo deve ser efectuada apenas para o Verão e para a meia-estação, pois nos dias mais frios será pouco provável existir essa sobreposição total das folhas móveis.

Quadro 5.6 – Folhas de correr ou guilhotina sem estore interior

Natureza do vidro	Bordo bruto						Bordo roçado					
	V. Simples		V. Duplo		V. Duplo		V. Simples		V. Duplo		V. Duplo	
			VE	VI	VE	VI			VE	VI	VE	VI
Inércia da gola	Fra	Med	Fra	Fra	Med	Med	Fra	Med	Fra	Fra	Med	Med
Monolítico	0,44	0,33	0,20	0,16	0,16	0,13	0,57	0,45	0,27	0,24	0,23	0,20
Laminado	0,28	0,19	0,10	*	*	*	0,44	0,33	0,20	0,16	0,16	0,13

5.2 – Vidros em cobertura ($\beta < 30^\circ$)

Nos quadros 5.7 e 5.8 apresentam-se os resultados referentes à aplicação do método a vidros na horizontal.

Quadro 5.7 – Absortância máxima para vidro simples aplicado em cobertura

Persiana Interior	Natureza do vidro	Apoio do vidro	Bordo bruto			Bordo roçado		
			Inércia da Gola			Inércia da Gola		
			Fraca	Média	Forte	Fraca	Média	Forte
Não	Laminado	Periférico	0,29	0,21	0,12	0,44	0,34	0,24
		Outro	0,11	*	*	0,21	0,14	*
Sim	Laminado	Periférico	0,15	*	*	0,30	0,20	0,11
		Outro	*	*	*	*	*	*

* deve ser aplicado vidro com elevada resistência ao choque térmico

Quadro 5.8 – Absortância máxima admissível para o vidro recozido aplicado em cobertura –
Vidro duplo sem revestimento de baixa emissividade

Natureza do vidro	Apoio do vidro	Bordo bruto						Bordo roçado					
		Inércia da Gola						Inércia da Gola					
		Fraca		Média		Forte		Fraca		Média		Forte	
VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI	VE	VI
Monolítico	Periférico	0,31	-	0,22	0,24	0,13	-	0,42	-	0,31	-	0,21	-
	Outro	0,11	-	*	0,11	*	-	0,17	-	*	-	*	-
Laminado	Periférico	0,17	0,18	*	0,15	*	*	0,31	0,27	0,22	0,24	0,13	0,12
	Outro	*	*	*	*	*	*	0,11	0,13	*	0,11	*	*

* deve ser aplicado vidro com elevada resistência ao choque térmico

5.3 - Recomendações

Com base nos resultados anteriores, o vidro recozido incolor pode ser aplicado na generalidade das situações em que se encontra fixo através de um caixilho (gola de inércia térmica fraca). Nos restantes casos é recomendável analisar a necessidade de aplicação de vidros com elevada resistência ao choque térmico, podendo ser adoptado como critério os valores máximos admissíveis da absortância energética indicados nas secções anteriores.

Para optimizar a especificação dos vãos envidraçados poderá ser efectuada uma análise com a metodologia indicada no capítulo 4, de forma a averiguar da necessidade de adoptar vidros especiais com elevada resistência ao choque térmico.

6 - CASOS ESPECIFICOS QUE REQUEREM VIDRO DE ELEVADA RESISTÊNCIA AO CHOQUE TÉRMICO

6.1 - Envidraçados situados em frente a paredes opacas

Os envidraçados situados em frente a paredes opacas apresentam condições de temperatura particulares pois, devido ao efeito de estufa, pode ser atingida uma elevada temperatura do ar (cerca de 80°C no caso de paredes pretas e vidro incolor [52]). Esta é uma solução construtiva utilizada nas paredes de Trombe e noutras soluções enquadradas nas tecnologias solares passivas ou nas zonas opacas das fachadas-cortina.

Tendo em conta as elevadas temperaturas que podem ser atingidas, quando os envidraçados se situam em frente a paredes, estes devem apresentar características de elevada resistência ao choque térmico, por exemplo vidro temperado ou termoendurecido. Considera-se que o vidro está próximo de uma parede opaca se forem cumpridas as relações geométricas a seguir indicadas, Figura 6.1.

$$\left\{ \begin{array}{l} d1 < 0,8 \text{ m com } h1 > 0,5 d1 + 0,02 \text{ m} \\ d2 < h2 \\ d3 < h3 \end{array} \right.$$

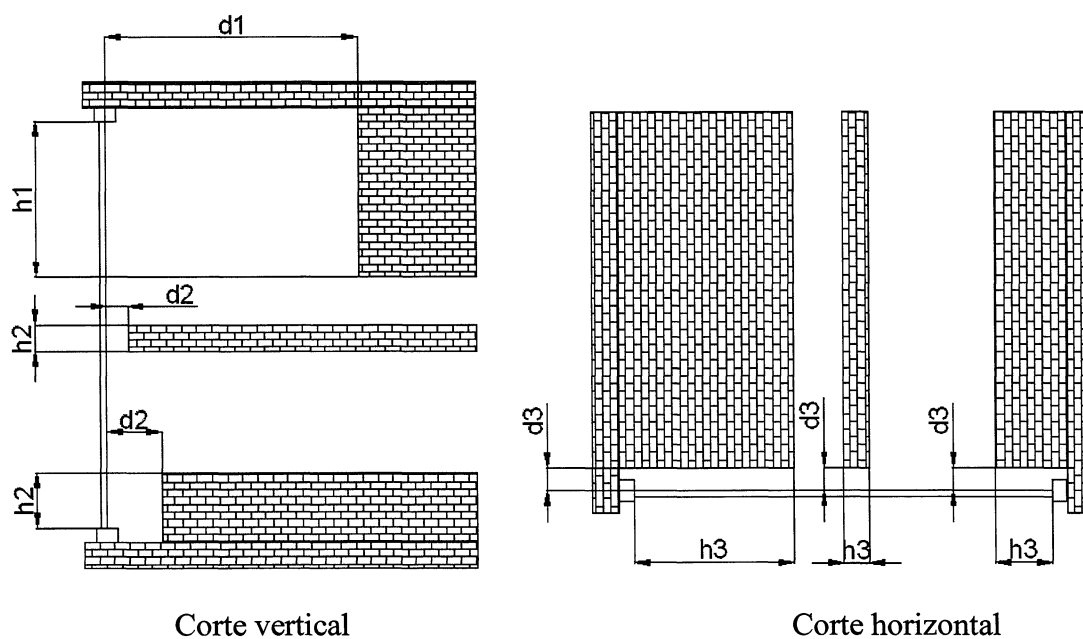


Figura 6.1 – Condições para o vidro ser considerado aplicado em frente a uma parede opaca

6.2 - Sistemas VEC

No caso de sistemas VEC com vidros desfasados, o vidro deve ser de elevada resistência ao choque térmico sempre que apresentar uma aba superior a cinco vezes a sua espessura, Figura 6.2. Nos restantes casos será necessário um estudo específico para verificar a ausência dessa necessidade.

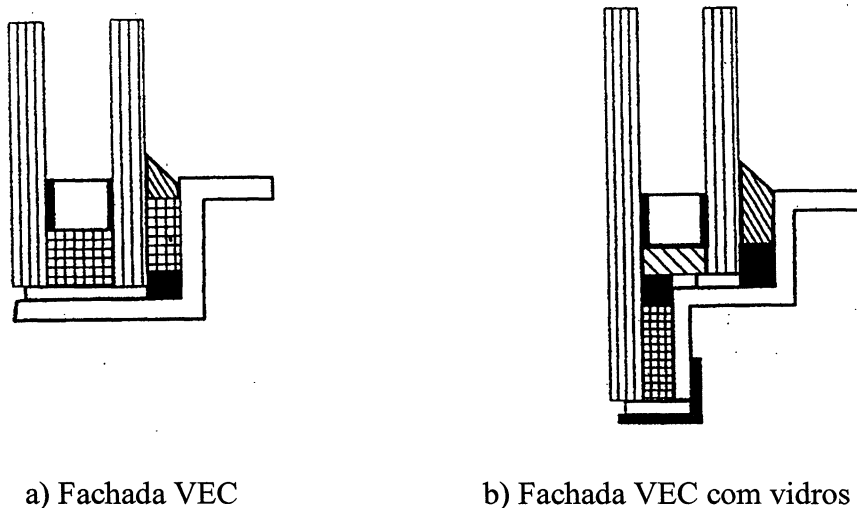


Figura 6.2 – Vidro desfasados numa fachada VEC

6.3 - Vidros com a mesma face exposta ao ambiente interior e ao ambiente exterior

Os vidros que são aplicados com uma mesma face em contacto com o ambiente interior e com o ambiente exterior devem apresentar características de elevada resistência ao choque térmico, salvo justificação em contrário, Figura 6.3

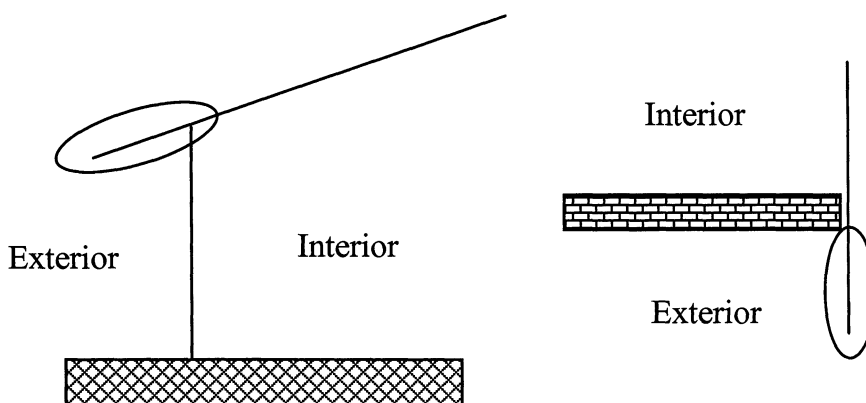


Figura 6.3 – Exemplos de vidros com uma mesma face em contacto com o ambiente interior e com o ambiente exterior

6.4 - Sistemas de aquecimento

Devido à presença de sistemas de aquecimento próximos do vidro (distância inferior a 15 cm) também pode ser provocado um gradiente térmico excessivo susceptível de causar a rotura por choque térmico. Deste modo, deve ser adoptado um vidro de elevada resistência ao choque térmico, ou ser efectuada uma análise por cálculo de forma a verificar que não são excedidos os gradientes térmicos aplicáveis ao vidro.

6.5 - Outros casos


De uma forma geral nos vidros com motivos decorativos, vidros pintados, etc, a análise do risco de rotura de choque térmico pode ser efectuada com base no método de cálculo apresentado nos capítulos anteriores. Caso não seja efectuada um estudo detalhado, é recomendada a adopção de vidros de elevada resistência ao choque térmico.

Salienta-se que em algumas situações, por exemplo montras de lojas, na fase de projecto pode não ser contemplada a adopção de motivos decorativos, mas ser previsível que estes venham a ser aplicados no decurso da utilização. Nesse sentido, é recomendado que em montras ou outras aplicações semelhantes sujeitas à incidência da radiação solar seja aplicado vidro de elevada resistência ao choque térmico.

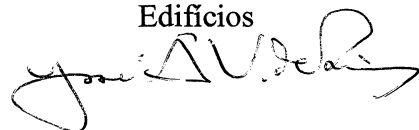
Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Outubro de 2007.

VISTOS

Per'
O Chefe do Núcleo de
de Acústica Iluminação
Componentes e Instalações



João C. Viegas

O Director do Departamento de
Edifícios



José A. Vasconcelos de Paiva

AUTORIA


Armando Teófilo Pinto
Mestre em Eng^a Mecânica
Assistente de Investigação

BIBLIOGRAFIA

- [1] - /p/-Leis, decretos, etc - **Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios**. Decreto Lei 80/2006, de 4 de Abril.
- [2] - /p/-Leis, decretos, etc – **Directiva relativa à aproximação das disposições legislativas, regulamentares e administrativas dos Estados-Membros no que respeita aos produtos de construção**. Directiva 89/106/CEE de 21 de Dezembro de 1988. Jornal Oficial nº L040 de 11/02/1989.
- [3] - /p/-Leis, decretos, etc - **Regulamento geral das edificações urbanas**. Decreto-lei nº 38382, 7 de Agosto de 1951.
- [4] - /p/-Leis, decretos, etc - **Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes**. Decreto Lei 235/83, de 31 de Maio.
- [5] - prEN13474-1: 1999 - **Glass in building – Design of glass panes – Part 1: General basis of design**. Brussels: CEN.
- [6] - ANSI/ASHRAE 55-1992- **Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta: ASHRAE, 1992.
- [7] - Rubin, M. et al – **Window optics**. Solar energy, 1998. Vol 62, nº3.
- [8] - ASFOMIR – **Guide technique 92**. Paris: ASFOMIR, 1992.
- [9] - ASHRAE - **Fundamentals 1997 Handbook**. Atlanta: ASHRAE, 1997.
- [10] - ASTM C 1048-04 – **Standard specification for heat-treated flat glass – Kind HS, Kind FT coated and uncoated glass**. West Conshocken: ASTM, 2004.
- [11] - Avis Technique 6/04-1529 – **Vitrage simple V.E.A. SGG POINT S**. Paris: CSTB, 2004.
- [12] - Beckett, H.E e Godfrey, J.A. – **Windows. Performance, design and instalation**. London: Crosby Lockwood, 1974.
- [13] - BS 6206: 1994 – **Specification for impact performance requirements for flat glass and safety plastics for use in buildings**. London: BSI.
- [14] - CSTC – **Le verre et les produits verriers – les fonctions des vitrages**. Brussels: CSTC, 1999.
- [15] - E 470: 2005 - **Guardas – Características dimensionais e métodos de ensaio**. Lisboa: LNEC.
- [16] - EN 1063: 1999 – **Glass in buildings – security glazing – testing and classification of resistance against bullet attack**. Brussels: CEN.

- [17] - EN 1096-4: 2004 – **Glass in buildings – coated glass. Part 4: Evaluation of conformity/product standard.** Brussels: CEN.
- [18] - EN 1096 (todas as partes) – **Glass in buildings – coated glass.** Brussels: CEN.
- [19] - EN 12150-2: 2004 – **Glass in building – Thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/product standard.** Brussels: CEN.
- [20] - EN 12150 (todas as partes) – **Glass in building – Thermally toughened soda lime silicate safety glass.** Brussels: CEN.
- [21] - EN 12337-2: 2004 – **Glass in building – Chemically strengthened soda lime silicate glass - Part 2: Evaluation of conformity/product standard.** Brussels: CEN.
- [22] - EN 12600: 2002 – **Glass in building – Pendulum test – impact test method and classification for flat glass.** Brussels: CEN.
- [23] - EN 1279-5: 2005 – **Glass in building – Insulating glass unit – Part 5: Evaluation of conformity.** Brussels: CEN.
- [24] - EN 1279 (todas as partes) – **Glass in building – Insulating glass unit.** Brussels: CEN.
- [25] - EN 13363-2: 2005 -**Solar protection devices combined with glazing - Calculation of solar and light transmittance - Part 2: Detailed calculation method.** Brussels: CEN.
- [26] - EN 13541: 2000 – **security glazing – testing and classification of resistance against explosion pressure.** Brussels: CEN.
- [27] - EN 13830: 2003 - **Curtain walling - Product standard.** Brussels: CEN.
- [28] - EN 14179-2: 2005 – **Glass in building - Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass – Part 2: Evaluation of conformity/product standard.** Brussels: CEN.
- [29] - EN 14179 (todas as partes) – **Glass in building - Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass.** Brussels: CEN.
- [30] - EN 14351-1: 2006 - **Windows and Pedestrian doorsets - Product standard, performance characteristics - Part 1: Windows and external pedestrian doorsets without resistance to fire and/or smoke leakage characteristics.** Brussels: CEN.
- [31] - EN 14449: 2005 – **Glass in building – laminated glass and laminated safety glass – Evaluation of conformity/Product standard.** Brussels: CEN.
- [32] - EN 1748-2-2: 2004 – **Glass in building – special basic products – glass ceramics – Part 2.2: Evaluation of conformity/Product standard.** Brussels: CEN.

- [33] - EN 1863-2: 2004 – **Glass in building – Heat strengthened soda lime silicate glass – Part 2: Evaluation of conformity/product standard.** Brussels: CEN.
- [34] - EN 1863 (todas as partes) – **Glass in building – Heat strengthened soda lime silicate glass.** Brussels: CEN.
- [35] - EN 1991-1-4: 2005 – **Eurocode 1. Actions on structures – General actions – Part 1-4: Wind actions.** Brussels:CEN.
- [36] - EN 356: 1999 – **Glass in buildings – security glazing – testing and classification of resistance against manual attack.** Brussels: CEN.
- [37] - EN 410: 1998 – **Glass in buildings – determination of luminous and solar characteristics of glazing.** Brussels: CEN.
- [38] - EN 572-2: 2004 – **Glass in building – Basic soda lime silicate glass products – Part 2: Float glass.** Brussels: CEN.
- [39] - EN 572-4: 2004 – **Glass in building – Basic soda lime silicate glass products – Part 4: drawn sheet glass.** Brussels: CEN.
- [40] - EN 572-5: 2004 – **Glass in building – Basic soda lime silicate glass products – Part 5: Patterned glass.** Brussels: CEN.
- [41] - EN 572-9: 2004 – **Glass in building – Basic soda lime silicate glass products – Part 9: Evaluation of conformity/Product standard.** Brussels: CEN.
- [42] - EN ISO 12543-2 – **Glass in building – laminated glass and laminated safety glass – Part 2: Evaluation of conformity/product standard.** Brussels: CEN.
- [43] - EN ISO 12543 (todas as partes) – **Glass in building – laminated glass and laminated safety glass.** Brussels: CEN.
- [44] - EOTA – **Guideline for European technical approval for structural sealant glazing systems (SSGS). Part 1: Supported and unsupported systems.** Brussels: EOTA, 1998.
- [45] - Gelder, D. - **The Significance of Sub-critical NiS Inclusions.** *In* Glass Processing Days 2003. Tampere: 2003.
- [46] - ISO 9050: 1990 - **Glass in building - Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance and ultraviolet transmittance, and related glazing factors.** Geneve: ISO.
- [47] - Jacob, L. - **A Review of the Nickel Sulphide induced fracture in tempered glass.** *In* Glass Processing Days 2003. Tampere: 2003.
- [48] - NF P 78-201-1: 1993 - **Travaux de bâtiment. Travaux de miroiterie-vitrerie- Partie 1 : cahier des clauses techniques.** Paris: AFNOR. DTU 39.

- [49] - NF P 78-201-1/A1: 2000 - **Travaux de bâtiment. Travaux de miroiterie-vitrerie- Partie 1 : cahier des clauses techniques - Amendement 1.** Paris: AFNOR. DTU 39.
- [50] - Nugue, J. C. e Savineau, G. - **Safe Post breakage Behavior of Point Fixed Glazing Systems - More Than a Case Study a Real Breakthrough.** *In* Glass processing days 2003. Tampere: 2003.
- [51] - Oliveira Braz, A. J.- **Tecnologia da aplicação de chapa de vidro em edifícios.** LNEC: Lisboa, 1980. ITE 9.
- [52] - Pinto, A. T. S. - **Análise das características de comportamento térmico de edifícios com fachadas-cortina. Aplicação à região de Lisboa.** Lisboa: IST, 1997. Tese de Mestrado.
- [53] - prEN 13474-2: 2000 - **Glass in building – Design of glass panes – Part 2: Design for uniformly distributed loads.** Brussels: CEN.
- [54] - Règles NV 65 - **Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes.** Paris : 2000.
- [55] - Santos, C. A. P. et al – **Temperaturas exteriores de projecto e números de graus-dia.** Lisboa: LNEC/IM, 1995.
- [56] - Steenhoudt, P. – **Les contraintes thermiques dans les vitrages: évaluation et décision.** CSTC: Brussels, 2004.
- [57] - The Building Regulations 1991 – **Glazing - safety in relation to impact, opening and cleaning.** London: 1998.
- [58] - Timoshenko, S.P e Krieger, S.W. – **Theory of plates and shells.** New York: McGrawHill, 1970.
- [59] - CSTB - **Vitrages extérieurs attachés faisant l'objet d'un Avis technique. Conditions générales de conception, fabrication et mise en œuvre.** Paris: CSTB, 1996. Cahiers du CSTB, Cahier 2914.
- [60] - UEAtc - **Rapport technique UEAtc pour l'agrément des ouvrages réalisés en vitrage extérieur attachés.** Paris: CSTB, 1998. Cahiers du CSTB, cahier 3052.
- [61] - UEAtc – **Directivas comuns UEAtc para a Homologação de fachadas leves.** Lisboa: LNEC, 1984. Tradução 587.
- [62] - Viegas, J. C. - **Componentes de edifícios. Selecção de caixilharia e seu dimensionamento mecânico.** Lisboa: LNEC, 2006. ITE 51.

ANEXO A – PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO VIDRO

Quadro A.1 – Principais propriedades do vidro

Propriedade	Valor
Massa volúmica (ρ) a 18°C	2500 kg/m ³
Modulo de elasticidade (E)	70000 MPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,2
Temperatura de fusão	≈1500 °C
Temperatura de amolecimento	≈600°C
Coefficiente de dilatação térmica linear (α)	9×10 ⁻⁶ m/m/K
Condutibilidade térmica (λ)	1 W/m/K
Calor específico (c_p)	700 J/kg/K
Tensão de rotura	
- vidro recozido	41 MPa [14]
- vidro termoendurecido	70 MPa [34]
- vidro termoendurecido esmaltado (face esmaltada em tracção)	45 MPa [34]
- vidro temperado termicamente	120 MPa [20], [29]
- vidro temperado esmaltado (face esmaltada em tracção)	75 MPa [20], [29]
Valores de cálculo para a resistência à rotura por flexão:	
- vidro recozido	20 MPa
- vidro termoendurecido	35 MPa
- vidro temperado termicamente	50 MPa
- vidro temperado termicamente e esmaltado	35 MPa
Resistência à compressão	1000 MPa

Quadro A.2 – Propriedades espectrofotométricas de alguns vidros simples (%)

Tipo de vidro	Espessura (mm)	Luz	Energia solar			
		Transmissão τ_v	Reflexão ρ_e	Absorção α_e	Transmissão τ_e	g
Incolor	3	91	8	5	87	89
	4	91	8	6	86	87
	5	90	8	8	84	86
	6	90	8	9	83	86
	8	89	7	12	81	84
	10	89	7	15	78	82
	12	88	7	17	76	80
	15	87	7	21	72	78
	19	86	7	25	68	75
Absorvente Cinza	4	54	6	37	57	66
	6	41	5	50	45	58
	8	32	5	60	35	51
	10	24	5	67	28	46
Absorvente Verde	4	78	6	36	58	68
	6	72	6	46	48	60
	8	66	5	55	40	54
	10	61	5	61	34	50
Reflectante (pirolítico) incolor						
Capa reflectante face exterior	5	47	26	21	53	59
	6	47	26	22	52	58
	8	47	26	24	50	57
Capa reflectante face interior	5	47	20	27	53	60
	6	47	19	29	52	60
	8	47	19	31	50	58
Reflectante (pirolítico) cinza						
Capa reflectante face exterior	6	29	25	36	39	48
	8	23	25	43	32	43
Capa reflectante face interior	6	29	10	51	39	52
	8	23	8	60	32	47
Reflectante (catódico) cinza						
Cinza 1, ref. face int.	6	32	11	59	30	44
Cinza 2, ref. face int.	6	40	9	54	37	50
Cinza 3, ref. face int.	6	50	7	47	46	58
Vidro laminado incolor	33.1	89	7	18	75	79
	44.1	87	7	22	71	77
	55.1	86	7	25	68	75
	33.2	88	7	20	73	78
	44.2	87	7	23	70	76
	55.2	86	7	26	67	74
	66.2	85	6	30	64	72

**ANEXO B – CÁLCULO DA INTENSIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE
NOS ENVIDRAÇADOS**

Ao atravessar a atmosfera a radiação vai ser parcialmente absorvida e difundida. A fracção que incide sobre uma determinada superfície é composta por duas componentes, a radiação directa e a radiação difusa. A radiação directa é aquela que vem directamente do disco solar enquanto a radiação difusa é toda a outra que chega de todos os lados do céu e que, para o estudo em causa, se considera distribuída isotropicamente.

A radiação solar incidente numa superfície tem tipicamente três componentes: a componente directa (I_{dir}), a componente difusa do céu (I_{dif}) e em superfícies não horizontais a componente difusa proveniente da reflexão nas superfícies fronteiras à superfície considerada (I_{ref}), eq. :

$$I_{tot} = I_{dir} + I_{dif} + I_{ref} \quad \text{eq. 1}$$

O modelo utilizado para estimar a intensidade da radiação solar de cada uma das componentes é o proposto pela ASHRAE [9]. A componente directa da radiação solar incidente numa superfície normal à incidência dos raios solares num dia sem nuvens, relativamente seco e de atmosfera clara é dada pela eq. 2:

$$I_{dir_{nor}} = A / \exp(B / \cos \theta_{hor}) \quad \text{eq. 2}$$

Em que:

- $I_{dir_{nor}}$, intensidade da radiação solar directa incidente numa normal aos raios solares (W/m^2);
- A , irradiação solar aparente (W/m^2);
- B , coeficiente de extinção da atmosfera;
- θ_{hor} , ângulo de incidência numa superfície horizontal (complementar da altura solar, equação B.11).

Os coeficientes A e B do modelo variam durante o ano devido à variação da composição da atmosfera (poeiras, vapor de água, concentração de CO_2) e devido à variação da distância entre o Sol e a Terra. Os valores correspondentes para os meses representativos encontram-se no Quadro B.1.

Quadro B.1 – Constantes do modelo da radiação solar [9]

Mês	$I_{\text{extraterrestre}}$ (W/m^2)	A (W/m^2)	B	C
Dezembro	1417	1233	0,142	0,057
Janeiro	1416	1230	0,142	0,058
Março	1381	1186	0,156	0,071
Abril	1356	1136	0,180	0,097
Junho	1326	1099	0,205	0,134
Julho	1326	1085	0,207	0,136

A estimativa da componente difusa da radiação solar incidente é efectuada através do coeficiente de difusão do céu C , que indica a relação entre a radiação difusa e a radiação directa. A radiação solar difusa incidente numa superfície horizontal é dada pela eq. 3, enquanto a radiação difusa do céu incidente numa superfície vertical é dada pela eq. 4:

$$I_{\text{dif}_{\text{hor}}} = C \cdot I_{\text{dir}_{\text{nor}}} \quad \text{eq. 3}$$

$$I_{\text{dif}_{\text{ver}}} = C \cdot Y \cdot I_{\text{dir}_{\text{nor}}} \quad \text{eq. 4}$$

em que Y é o quociente entre a energia difusa do céu incidente na superfície e a energia difusa do céu incidente numa superfície horizontal, eq. 5:

$$\begin{cases} Y = 0,55 + 0,437 \cos(\theta_{\text{sup}}) + 0,313 \cos^2(\theta_{\text{sup}}) & \text{se } \cos(\theta_{\text{sup}}) > -0,2 \\ Y = 0,45 & \text{se } \cos(\theta_{\text{sup}}) \leq -0,2 \end{cases} \quad \text{eq. 5}$$

Na eq. 5, θ_{sup} é o ângulo de incidência da radiação solar na superfície vertical que é dado pela eq. 12, Figura B.1.

Conhecendo a radiação solar incidente numa superfície normal aos raios solares, pode-se obter a radiação solar incidente em superfícies com outras orientações, através das relações geométricas indicadas mais à frente neste anexo.

Para uma superfície horizontal, a energia da radiação solar directa incidente é dada pela eq. 6:

$$I_{\text{dir}_{\text{hor}}} = I_{\text{dir}_{\text{nor}}} \cos \theta_{\text{hor}} \quad \text{eq. 6}$$

Pelo que a radiação solar total incidente numa superfície horizontal é dada pela equação eq. 7:

$$I_{\text{tot}_{\text{hor}}} = I_{\text{dir}_{\text{hor}}} + I_{\text{dif}_{\text{hor}}} = I_{\text{dir}_{\text{nor}}} (\cos \theta_{\text{hor}} + C) \quad \text{eq. 7}$$

Para determinar a radiação incidente numa superfície que não seja horizontal, conhecendo a irradiação numa superfície horizontal, é necessário considerar as contribuições da radiação directa incidente na superfície, da radiação difusa do céu e da radiação difusa correspondente à radiação reflectida pelo pavimento.

A energia da radiação solar directa incidente na superfície é calculada através da eq. 8. A radiação difusa do céu é dada pela eq. 4, sendo a radiação difusa reflectida dada pela eq. 9. Nas equações, β é a inclinação da superfície, ou seja, o ângulo entre a horizontal e a superfície, Figura B.1. Deste modo, a intensidade da radiação solar incidente numa superfície vertical é dada pela eq. 10:

$$I_{\text{dir}_{\text{sup}}} = I_{\text{dir}_{\text{nor}}} \cos \theta_{\text{sup}} \quad \text{eq. 8}$$

$$I_{\text{ref}_{\text{sup}}} = \frac{1}{2} \rho I_{\text{tot}_{\text{hor}}} \quad \text{eq. 9}$$

$$I_{\text{tot}_{\text{sup}}} = I_{\text{dir}_{\text{sup}}} + I_{\text{dif}_{\text{sup}}} + I_{\text{ref}_{\text{sup}}} = I_{\text{dir}_{\text{nor}}} (\cos \theta_{\text{sup}} + C.Y + 1/2\rho(\cos \theta_{\text{hor}} + C)) \quad \text{eq. 10}$$

Nas equações, ρ é a reflectância das superfícies fronteiras (albedo), que se admitiu tomar o valor 0,2.

b) Ângulo de incidência da radiação solar directa

O ângulo entre a normal da superfície horizontal e os raios de sol é dado pela eq. 11:

$$\cos \theta_{\text{hor}} = \cos \delta \cos \Phi \cos \omega + \sin \delta \sin \Phi \quad \text{eq. 11}$$

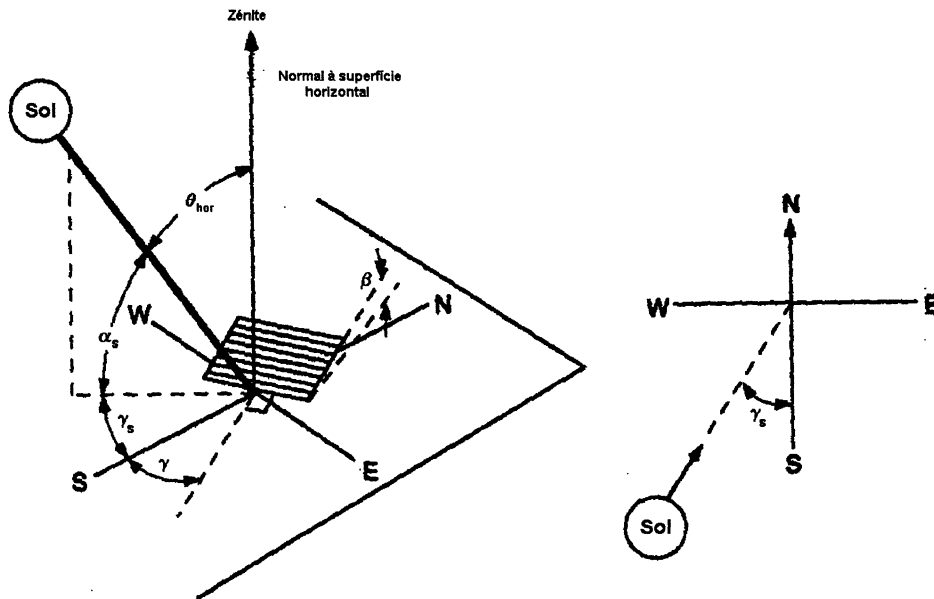


Figura B.1 – Representação esquemática dos ângulos solares e da superfície

Para uma superfície com inclinação (β) e com azimute (γ) diferente de zero, o ângulo de incidência dos raios solares é dado pela eq. 12:

$$\begin{aligned} \cos \theta_{\text{sup}} = & \sin \delta \sin \Phi \cos \beta - \sin \delta \cos \Phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \Phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \Phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad \text{eq. 12}$$

Em que:

- Φ é a latitude do lugar, no caso de Lisboa toma o valor de $38,7^\circ$
- δ é a declinação solar, sendo dada aproximadamente pela eq. 13.

$$\delta = \arcsin(0,3979 \sin \chi) \quad \text{eq. 13}$$

Na eq. 13 χ , é dado pela eq. 14, na aproximação da órbita da terra ser circular [9]:

$$\chi = \chi_0 + 0,00713 \sin \chi_0 + 0,3268 \cos \chi_0 - 0,000318 \sin(2\chi_0) + 0,000145 \cos(2\chi_0) \quad \text{eq. 14}$$

$$\chi_0 = 2\pi(n + 284)/365,25 \quad \text{eq. 15}$$

Nas equações anteriores:

- γ é o azimute da superfície, ou seja, o ângulo entre a projecção horizontal da normal à superfície e o Sul;
- ω é o ângulo correspondente à hora solar, que é dado por $15^\circ \times t$, com t em horas;
- n dia do ano.

**ANEXO C – ANÁLISE DA TEMPERATURA DO AR E AMPLITUDE TÉRMICA
DIÁRIA**

Na determinação da temperatura de ar e da amplitude térmica do ar a considerar no estudo foram apreciados os anos climáticos de referência e as normais climatológicas (1961-1990) publicadas pelo IM. Nos quadros C.1 a C.6 apresenta-se para cada localidade os valores obtidos, bem como a zona climática em que se enquadram de acordo com o definido no RCCTE [1].

Quadro C.1 – Bragança (I3/V2)

	TRY			Normais IM		
	Inverno	Primavera /Outono	Verão	Inverno	Primavera /Outono	Verão
Tmax	16,6	23,8	34,6	18	26	39
Tmin	-6,0	-0,2	8,8	-12	-5	5
Amplitude diária	15,6	18,2	17,4			

Quadro C.2 – Lisboa (I1/V2)

	TRY			Normais IM		
	Inverno	Primavera /Outono	Verão	Inverno	Primavera /Outono	Verão
Tmax	17,4	25,0	37,2	21	28	42
Tmin	1,2	5,2	10,0	0	3	14
Amplitude diária	10,4	13,0	19,4			

Quadro C.3 – Porto (I2/V1)

	TRY			Normais IM		
	Inverno	Primavera /Outono	Verão	Inverno	Primavera /Outono	Verão
Tmax	18,7	26,0	32,0	25	27	39
Tmin	0,0	1,0	9,3	-4	-2	5
Amplitude diária	16,4	15,0	18,0			

Quadro C.4 – Coimbra (I1/V2)

	TRY			Normais IM		
	Inverno	Primavera /Outono	Verão	Inverno	Primavera /Outono	Verão
Tmax	18,7	26,0	32,0	25	28	43
Tmin	0,0	1,0	9,3	-4	-2	6
Amplitude diária	16,4	15,0	18,0			

Quadro C.5 – Faro (I1/V2)

	TRY			Normais IM		
	Inverno	Primavera /Outono	Verão	Inverno	Primavera /Outono	Verão
Tmax	18,5	27,0	37,0	25	28	40
Tmin	3,0	7,0	11,7	-1	3	8
Amplitude diária	13,4	15,0	17,0			

Quadro C.6 – Évora (I1/V3)

	TRY			Normais IM		
	Inverno	Primavera /Outono	Verão	Inverno	Primavera /Outono	Verão
Tmax	16,8	24,4	38,4			
Tmin	1,6	4,6	9,6			
Amplitude diária	12,2	14,2	20,0			

Face aos anos climáticos de referência disponíveis, existem quatro localidades que pertencem às zonas climáticas I1 e V2, enquanto para as zonas climáticas I2, I3, V1 e V3 apenas existe uma localidade.

Efectuando uma análise comparativa da informação e tendo em conta o registo mais elevado da temperatura do ar de 45° na localidade Amareleja e que em várias localidades são registadas temperaturas do ar superiores a 40°C, para a análise de Verão considera-se uma temperatura máxima de 45°C para as três zonas climáticas (V1, V2 e V3). Quanto à amplitude térmica, considera-se o valor de 20°C, correspondente ao valor aproximado dos obtidos com base nos anos climáticos de referência.

Na estação de Inverno, Primavera e Outono, considera-se que não existe uma diferença significativa das temperaturas extremas e amplitudes registadas nas zona climática I1 e I2, sendo considerada uma temperatura mínima de -5°C no Inverno, 0°C na Primavera e Outono, bem como uma amplitude térmica de 15°C. Na zona climática I3, considera-se uma temperatura mínima de -15°C no Inverno, -5°C na Primavera e no Outono e uma amplitude térmica de 15°C.

No Quadro C.7 encontram-se indicadas as temperaturas do ar consideradas neste estudo. Para casos específicos, onde sejam conhecidas em maior detalhe as temperaturas do ar, poderão ser adoptados outros valores.

Quadro C.7 – Temperatura do ar considerada neste estudo (°C)

Zona climática [1]	Inverno		Primavera/Outono		Verão
	I1 e I2	I3	I1 e I2	I3	V1, V2 e V3
T _{max}	10	0	15	10	45
T _{min}	-5	-15	0	-5	25
Amplitude diária	15	15	15	15	20

