



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS
Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica
de Estruturas

Proc. 0305/14/15791

RELATÓRIO FINAL DO PROJECTO USUET

**'Análise sistémica do risco sísmico, uma visão integrada
– aplicação a centros urbanos nos Açores'**

Projecto USuET

Lisboa • Setembro de 2008

I&D ESTRUTURAS

RELATÓRIO 364/2008 – NESDE

**RELATÓRIO FINAL DO PROJECTO USuET
«ANÁLISE SISTÉMICA DO RISCO SÍSMICO:
UMA VISÃO INTEGRADA.
APLICAÇÃO A CENTROS URBANOS NOS AÇORES»**

**FINAL REPORT OF THE USuET PROJECT
«URBAN SYSTEM UNDER EARTHQUAKE THREAT:
AN INTEGRATED GLOBAL APPROACH.
APPLICATION TO THE AZORES»**

**RAPPORT FINAL DU PROJECT USuET
«SYSTÈMES URBAINS SOUS MENACE SISMIQUE:
UN ABORDAGE INTEGRÉ.
APPLICATION AUX AÇORES»**

ÍNDICE

1	Introdução.....	1
1.1	O projecto USuET, objectivos e resumo da actividade desenvolvida.....	1
1.2	Organização do relatório.....	2
2	Metodologia de análise do risco sísmico.....	5
2.1	Terminologia e definição de conceitos.....	5
2.2	Modelação de perdas em consequência de sismos.....	8
3	Inventário dos elementos em risco.....	11
3.1	Apuramentos efectuados nos Censos 2001.....	11
3.2	Estatísticas dos elementos em risco.....	14
3.3	Distribuição geográfica dos elementos em risco.....	27
3.4	Análise do inventário dos elementos em risco.....	29
3.4.1	Análise das estatísticas dos elementos em risco.....	29
3.4.2	Análise da distribuição geográfica dos elementos em risco.....	32
3.5	Conclusões.....	32
4	Simulador de Cenários Sísmicos e suas actualizações.....	35
4.1	O Simulador de Cenários Sísmicos LNECloss.....	35
4.1.1	Apresentação.....	35
4.1.2	Dados.....	36
4.1.3	Procedimentos.....	39
4.2	Actualização do Simulador de Cenários Sísmicos.....	47
5	Simulador de Cenários Sísmicos na Web.....	49
5.1	Enquadramento.....	49
5.2	Arquitectura do Simulador LNECloss em ambiente WebSIG.....	49
6	Avaliação do impacto de sismos no Arquipélago dos Açores.....	53
6.1	Acção sísmica para o cenário de 9 de Julho de 1998.....	53
6.2	Danos e perdas observadas no sismo de 9 de Julho de 1998.....	55

6.3	Reavaliação do inventário considerando o sismo de 9 de Julho de 1998.....	57
6.4	Caracterização da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional.....	58
6.5	Danos e perdas simulados para o cenário sísmico de 9 de Julho de 1998.....	59
7	Conclusões e trabalho futuro.....	65
8	Referências.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Modelação probabilística do risco sísmico [Sousa 2007].....	8
Figura 2 – Número de edifícios por época de construção.	15
Figura 3 – Número de alojamentos por época de construção.....	15
Figura 4 – Número de ocupantes por época de construção.	16
Figura 5 – Razão entre o número de alojamentos e o número de edifícios, por época de construção.	16
Figura 6 – Razão entre o número de ocupantes e o número de alojamentos, por época de construção.	17
Figura 7 – Número de edifícios por tipo de estrutura.....	19
Figura 8 – Número de edifícios por época de construção e tipo de estrutura.....	20
Figura 9 – Percentagem de edifícios por tipo de estrutura dada a época de construção.	20
Figura 10 – Número de edifícios por número de pavimentos.	21
Figura 11 – Número de edifícios por época de construção e número de pavimentos	22
Figura 12 – Percentagem de edifícios por número de pavimentos dada a época de construção.	22
Figura 13 – Número de edifícios por número de pavimentos e tipo de estrutura.....	23
Figura 14 – Percentagem de edifícios por tipo de estrutura dado o número de pavimentos.....	23
Figura 15 – Número de edifícios por Necessidade de Reparações Na estrutura.....	25
Figura 16 – Número de edifícios por Necessidade de Reparações Na estrutura, dada a época de construção.....	25
Figura 17 – Densidade de edifícios no grupo Ocidental do Arquipélago dos Açores....	27
Figura 18 – Densidade de edifícios no grupo Central do Arquipélago dos Açores.	28
Figura 19 – Densidade de edifícios no grupo Oriental do Arquipélago dos Açores.	28
Figura 20 – Fluxograma do Simulador (IM = Intensidade Macrossísmica; ER = Espectro de Resposta [modificado de Sousa, 2006].....	37

Figura 21 – Arquitectura três camadas (three-tier) aplicada aos SIG na Web [Afonso, 2007].	50
Figura 22 – Interface de opções de modelação (região e acção sísmica) [Afonso, 2007].	52
Figura 23 – a) Isossistas do sismo de 1998 na ilha do Faial [Ferreira, 2008]; simulação da acção sísmica de acordo com b) o programa EXSIM [Zonno et al., 2008], c) Boomer et al. [1998] e d) Akkar & Bommer [2007].	54
Figura 24 – Distribuição geográfica dos edifícios no estado de dano Dano Total na ilha do Faial em consequência do cenário sísmico de 1998; a) simulação estocástica do movimento sísmico pelo programa EXSIM [Zonno et al., 2008]; b) modelação da acção sísmica segundo Bommer et al. [1998]; c) modelação da acção sísmica segundo Akkar & Bommer [2007].	62
Figura 25 – Percentagem de área habitacional perdida, por freguesia; a) simulação estocástica do movimento sísmico pelo programa EXSIM [Zonno et al., 2008]; b) modelação da acção sísmica segundo Bommer et al. [1998]; c) modelação da acção sísmica segundo Akkar & Bommer [2007].	64

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Factores de vulnerabilidade e respectivas modalidades (Censos 2001).....	13
Quadro 2 – Modalidades das variáveis Necessidade de Reparações e Estado de conservação.	14
Quadro 3 – Valores totais das existências dos elementos em risco no Arquipélago dos Açores.....	14
Quadro 4 – Percentagem de existências em edifícios construídos em data anterior à da entrada em vigor do primeiro regulamento de projecto sismo-resistente.....	18
Quadro 5 – Existências em edifícios de Betão armado construídos durante a vigência dos regulamentos de projecto sismo-resistente.	19
Quadro 6 – Distribuição de elementos em risco por número de pavimentos dos edifícios.	21
Quadro 7 – Tipos de estrutura predominante, em cada época de construção, dos edifícios do Arquipélago dos Açores.....	24
Quadro 8 - Quantitativos de edifícios por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos (Censos 2001).....	26
Quadro 9 – Relação entre os estados/graus de dano e as percentagens de valores de reposição ou factores de dano.....	45
Quadro 10 – Levantamento de danos de Ferreira [2008] para as ilhas do Faial e Pico.	55
Quadro 11 – Sistemas construtivos correntes nas ilhas do Faial e Pico [Neves et al., 2007].....	56
Quadro 12 – Número de mortos por freguesia (ilha do Faial) no sismo de 1998 [Gonçalves, 2008].....	56
Quadro 13 – Número de edifícios considerados inabitáveis em consequência do sismo de 1998, com base no levantamento de Ferreira [2008].....	57
Quadro 14 – Relação entre as tipologias Censos 2001 e os sistemas construtivos correntes.....	59
Quadro 15 – Número de edifícios no estado de dano Dano Total, número de vítimas mortais e perdas económicas no parque habitacional da ilha do Faial.....	60
Quadro 16 – Número de edifícios no estado de dano Dano Total, número de vítimas mortais e perdas económicas no parque habitacional da ilha do Pico.....	60

Quadro 17 – Correspondência entre os indicadores de dano do método mecanicista e dos métodos estatísticos.....	61
Quadro 18 – Correspondência entre os indicadores de dano do método mecanicista e dos métodos estatísticos.....	63

RELATÓRIO DE ACTIVIDADE DO PROJECTO USuET «ANÁLISE SISTÉMICA DO RISCO SÍSMICO: UMA VISÃO INTEGRADA. APLICAÇÃO A CENTROS URBANOS NOS AÇORES»

1 Introdução

1.1 O projecto USuET, objectivos e resumo da actividade desenvolvida

O projecto de investigação USuET¹ «Análise sistémica do risco sísmico: uma visão integrada. Aplicação a centros urbanos nos Açores», tinha por objectivo principal desenvolver o conhecimento sobre o comportamento sísmico de regiões urbanas e mitigar o risco decorrente de sismos no Arquipélago dos Açores. Pretendia-se assim analisar possíveis cenários de risco sísmico na região e ter uma percepção integrada do impacto económico e social de sismos neste Arquipélago.

Este projecto foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), (POCI/CTE-GIN/58095/2004) foi coordenado pelo Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção (ICIST) do Instituto Superior Técnico (IST), fazendo parte da equipa do projecto, para além do ICIST, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e a Universidade dos Açores (UA).

A participação do LNEC neste projecto de investigação visava a actualização do Simulador de Cenários Sísmicos deste Laboratório, para ser possível modelar em qualquer parcela do território Açoriano, e recorrendo a um Sistema de Informação Geográfico (SIG), os danos no edificado habitacional, as perdas humanas e as perdas económicas em consequência de um cenário sísmico de ocorrência especificado.

Para cumprir os objectivos atrás mencionados a equipa do LNEC realizou com êxito as seguintes tarefas:

- (i) Recolha da informação necessária para o desenvolvimento do projecto, envolvendo o levantamento exaustivo do parque habitacional e dos seus ocupantes no Arquipélago dos Açores. Para o efeito, foi formulado um pedido de acesso a dados do Instituto Nacional de Estatística (INE), via Observatório das Ciências e do Ensino Superior (OCES), mais concretamente foi formulado um pedido específico de apuramento do cruzamento das variáveis dos Censos 2001 que se

¹ USuET - Urban System under Earthquake Threat: an integrated global approach. Application to the Azores.

consideraram relevantes para a caracterização da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional do território Açoriano.

- (ii) Análise estatística da informação recolhida visando a identificar as principais características construtivas do parque habitacional do Arquipélago dos Açores para permitir caracterizar a sua vulnerabilidade face à acção dos sismos. Análise da distribuição geográfica das existências do parque habitacional e dos seus ocupantes.
- (iii) Alargamento do âmbito geográfico de aplicação do Simulador de Cenários Sísmicos ao Arquipélago dos Açores. Neste contexto, este Simulador foi actualizado no que concerne à exposição dos elementos em risco, com a informação mencionada no ponto (i), tendo também sido actualizado com informação relativa à sismicidade do Arquipélago.
- (iv) Actualização do Simulador em termos de modelos de simulação da acção sísmica e de rotinas do SIG.
- (v) Aferição dos modelos de danos e perdas do Simulador de Cenários Sísmicos a serem aplicados à região dos Açores, realizando comparações entre as simulações efectuadas e os danos ocorridos em sismos que no passado afectaram este Arquipélago. Para o efeito, recorreu-se ao levantamento de danos do sismo do Faial de 1998, efectuado pelos restantes parceiros do projecto, e simulou-se o impacto de um cenário semelhante a este sismo no parque habitacional da região, bem como nos seus ocupantes.
- (vi) Generalização do Simulador de Cenários Sísmicos para ambiente WebSIG.

1.2 Organização do relatório

O presente relatório final do projecto USuET integra o trabalho já apresentado no relatório de progresso de Sousa & Afonso [2007], nomeadamente no que toca aos capítulos 2, 3 e parte do capítulo 4 e, adicionalmente, descreve, em detalhe, as actividades desenvolvidas no projecto desde a data desse relatório (secção 4.2, e capítulos 5 e 6). A parte da investigação conducente à actualização do Simulador de Cenários Sísmicos para ambiente WebSIG, aplicado ao Arquipélago dos Açores, não se encontra descrita com o mesmo detalhe, neste relatório, pois enquadra-se na tese de mestrado em Sistemas de Informação Geográfica de Afonso [2007], submetida à Universidade Técnica de Lisboa. A versão definitiva desta tese, cuja discussão se prevê ainda em 2008, será enviada oportunamente.

Assim, este estudo encontra-se organizado em sete capítulos. Nesta *Introdução* apresenta-se o projecto de investigação USuET, os seus objectivos globais, bem como o

objectivo da contribuição do LNEC para o projecto. Resume-se ainda a actividade desenvolvida por este Laboratório e refere-se a estrutura do relatório.

No capítulo 2, *Metodologias de análise do risco sísmico* apresenta-se a abordagem teórica dos temas tratados e descreve-se a metodologia de análise do risco sísmico que será aplicada no presente projecto. Esta metodologia encontra-se apresentada com maior detalhe no trabalho de Sousa [2006] e já foi referida no relatório de progresso do LNEC [Sousa & Afonso, 2007].

No capítulo 3 procede-se ao *Inventário dos elementos em risco* do Arquipélago dos Açores em termos de quantitativos habitacionais e populacionais, adoptando-se a freguesia como unidade de análise elementar. Este levantamento foi efectuado com base na informação estatística dos Censos 2001 [INE, 2003] tendo em consideração a distribuição geográfica dos elementos expostos ao risco sísmico e os factores de vulnerabilidade sísmica possíveis de apurar nestes recenseamentos. É neste capítulo que se procede à análise estatística e da distribuição geográfica da exposição. Esta análise já foi apresentada no relatório de progresso do LNEC [Sousa & Afonso, 2007].

O capítulo 4 descreve o *Simulador de Cenários Sísmicos e as suas actualizações* efectuadas no âmbito do projecto USuET. Este capítulo inicia-se com a apresentação do Simulador, dos dados necessários à sua operação e com a especificação dos procedimentos disponibilizados por esta ferramenta. Esta apresentação já foi efectuada previamente no relatório de progresso [Sousa & Afonso, 2007] sendo agora actualizada. O capítulo termina com um resumo da actividade desenvolvida visando actualizar este Simulador de Cenários.

No capítulo 5 apresenta-se um resumo do trabalho desenvolvido para a *Actualização do Simulador de Cenários Sísmicos para ambiente WebSIG*.

No capítulo 6 descreve-se o trabalho conducente à aferição dos modelos de danos e perdas do Simulador de Cenários Sísmicos a serem aplicados à região dos Açores. Efectua-se a *Avaliação do impacto de sismos*, com a desagregação geográfica das freguesias, *no Arquipélago dos Açores*, para cenários sísmicos pré-definidos, realizando comparações entre as simulações efectuadas e os danos ocorridos em sismos que no passado afectaram este Arquipélago. Para o efeito, recorreu-se ao levantamento de danos do sismo do Faial de 1998, efectuado pelos restantes parceiros do projecto, e simulou-se o impacto de um cenário semelhante a este sismo no parque habitacional da região, bem como nos seus ocupantes.

Finalmente, no capítulo 7 apresentam-se as principais *Conclusões* resultantes da actividade desenvolvida e perspectivam-se algumas necessidades de *investigação futura* identificadas no presente projecto.

No CD-ROM anexo encontram-se cópia das publicações, ou de outras formas de divulgação, realizadas pela equipa do LNEC no âmbito do projecto e a seguir listadas:

Relatórios:

Sousa, M.L. & Afonso, A., 2007.

“Relatório de actividade do Projecto USuET «Análise sistémica do risco sísmico: uma visão integrada. Aplicação a Centros urbanos nos Açores»” Relatório 299/2007, DE/NESDE, 51 pp., 20 figuras, 9 quadros, Proc. 0305/14/15791, LNEC, Lisboa.

Sousa, M.L. & Afonso, A., 2008.

“Relatório final do Projecto USuET «Análise sistémica do risco sísmico: uma visão integrada. Aplicação a Centros urbanos nos Açores»” Relatório 2008, DE/NESDE, 80 pp., 25 figuras, 18 quadros, Proc. 0305/14/15791, LNEC, Lisboa.

Capítulo de Livro e comunicação em painel:

Sousa, M.L., Rodrigues, J., Coelho, E., Carvalho E.C, Salta, M., Eusébio, M.I. & Viegas J., 2008

“A intervenção do LNEC na sequência da crise sísmica dos Açores iniciada pelo sismo de 9 de Julho de 1998” em «Sismo de 1998 – Açores. Uma década depois», Edição C.S. Oliveira et al., Governo dos Açores/SPRHI, S.A.

Publicações em actas de congressos científicos internacionais e comunicações em painel:

Sousa, M.L. & Afonso, N., 2008

“Simulation of seismic scenarios in Azores islands” Azores 1998 - International Seminar on Seismic Risk and Rehabilitation of Stone Masonry Housing, Horta, Faial, 2008 (resumo extenso + comunicação em painel).

Sousa, M.L., Afonso, N. & Matos, J., 2008

“Simulation of Seismic Scenarios in a WebGIS Environment. Application to Azores Islands”. 14th World Conference on Earthquake Engineering, Pequim, China. (artigo + comunicação em painel)

Foi ainda submetida, não estando incluída no CD-ROM, a versão final de uma tese de mestrado (anterior a Bolonha) ao Instituto Superior Técnico, aguardando-se a sua discussão:

Afonso, N., 2008

“Simulador de Cenários Sísmicos em ambiente WebSIG”. Tese de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica pela Universidade Técnica de Lisboa, desenvolvida no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Novembro de 2008.

2 Metodologia de análise do risco sísmico

2.1 Terminologia e definição de conceitos

A definição de conceitos é essencial num estudo de risco sísmico de modo a tornar o texto mais conciso, explícito e matematicamente consistente. Efectivamente, apesar dos principais conceitos já se encontrarem definidos por convenções internacionais eles têm sido utilizados ao longo do tempo com diversos significados, quer em sentido lato quer em sentido estrito [McGuire, 2004], provavelmente devido à interdisciplinaridade da matéria, ao facto do tema ser relativamente recente e de, muitas vezes, os termos técnicos não chegarem a ser formalizados matematicamente.

Os conceitos principais utilizados em trabalhos de avaliação do risco sísmico são também comuns a outros tipos de catástrofes naturais. Os esforços para a harmonização destes conceitos culminaram em 1979, quando um grupo de trabalho patrocinado pelas Nações Unidas estabeleceu uma convenção que inclui um conjunto de definições básicas neste domínio [UNDRO, 1979, citado por Barbat e Pujades, 2004; Caicedo *et al.*, 1994; Coburn *et al.*, 1994 e Sandi, 1986].

Com base nas referências acima mencionadas, mas também em aplicações efectuadas em Portugal no domínio dos fenómenos sísmicos, apresentam-se as principais definições adoptadas neste trabalho aplicáveis ao tema da avaliação do risco de qualquer tipo de fenómeno natural, mas aqui particularizadas para a temática do risco sísmico [Sousa, 2006 e Sousa *et al.*, 2007].

Seguindo a proposta de Sandi [1986] o primeiro conceito que deve ser definido no âmbito de uma análise de risco sísmico é o de *ambiente ou sistema construído*. Este pode ser composto por estruturas individuais, como edifícios, ou englobar um sistema integrado de estruturas que incluam diversas componentes como as redes de água, energia, comunicações e transportes de uma região urbana. Neste caso, para além de se caracterizar os elementos constituintes do sistema é também necessário localizá-los e identificar a sua função e inter-relações.

Os *elementos em risco* ou *existências* são as entidades que poderão ser afectadas adversamente em caso de sismo, devido ao mau desempenho do sistema construído. Os habitantes de uma determinada região são exemplo de elementos em risco que podem ser afectados pelos danos nos edifícios construídos. Por outro lado, esses edifícios são exemplo de elementos em risco que se confundem com o próprio sistema construído. A definição dos elementos em risco condicionará a forma como é avaliado o risco e terá implicações nas variáveis que o quantificam. Num estudo de risco sísmico é necessário

quantificar a *exposição E* desses elementos, ou seja o seu valor. Para o efeito, procede-se a um inventário georeferenciado das existências e do seu valor, evidenciando-se factores capazes de caracterizar a vulnerabilidade dos elementos em risco face à acção sísmica.

A *vulnerabilidade, V*, e a *fragilidade sísmicas* reflectem a capacidade que um determinado elemento em risco tem para resistir, ou para ser afectado, pelo fenómeno natural, sendo condicionada pela acção de um sismo de dada severidade. Os *danos, D*, correspondem aos efeitos físicos adversos causados por um sismo de determinada intensidade sobre o elemento em risco e que podem ser directamente observados num levantamento após a ocorrência do evento [Sandi, 1986]. Importa desde já distinguir o conceito de fragilidade do conceito de vulnerabilidade; assim, uma curva de fragilidade sísmica fornece a probabilidade de um determinado nível de dano ou perda ser igualado ou excedido, condicionado por um dado nível de severidade da acção sísmica, enquanto que uma curva de vulnerabilidade sísmica é definida pelos valores esperados da variável dano ou perda em função da severidade da acção sísmica [Chen e Scawthorn, 2003]. As curvas de fragilidade e vulnerabilidade são normalmente específicas de uma determinada tipologia construtiva.

Tipologias são subconjuntos de sistemas construídos com características idênticas em termos da sua vulnerabilidade à acção sísmica. No caso do sistema construído ser um conjunto de edifícios, o critério empregue na classificação das tipologias de edifícios encontra-se explicado em Costa [1990], que sustenta a distinção das tipologias com base no seu desempenho sísmico, o qual é condicionado basicamente pelas respectivas soluções estruturais. Nesta perspectiva, as classes de edifícios serão também designadas de tipologias estruturais ou de tipologias construtivas.

As *perdas, L*, correspondem aos efeitos económicos e sociais adversos estimados a partir do conhecimento dos níveis da acção sísmica ou dos níveis de dano. Os indicadores de perdas medem a severidade das consequências adversas produzidas pela ocorrência de um sismo sobre os elementos em risco. São exemplos de indicadores de perdas, o número de mortos, feridos ou desalojados, o valor de reposição de danos em edifícios, os custos da interrupção de uma dada actividade económica, os custos da rotura do funcionamento de uma infra-estrutura, etc., números estes avaliados face a um determinado nível de severidade da acção sísmica.

A análise da *perigosidade sísmica, H*, consiste na estimativa, para um dado local e período de tempo de exposição, da probabilidade de excedência de um determinado nível da acção sísmica, traduzido geralmente por variáveis que medem o movimento do

solo (intensidade macrossísmica, aceleração máxima do solo, etc.), ou a resposta estrutural dos edifícios (espectro de resposta, etc.). Em muitas aplicações a perigosidade sísmica é quantificada, de forma aproximada, não pela probabilidade, mas pela frequência (ou número de eventos por unidade de tempo) com que se espera que valores seleccionados do movimento do solo sejam excedidos [McGuire, 2004].

Para clarificar os conceitos anteriormente apresentados, Barbat e Pujades [2004] referem-se à perigosidade, ou ameaça, como sendo um perigo potencial, ou um «factor de risco externo» aos elementos expostos, enquanto que a vulnerabilidade, consistindo na propensão intrínseca para os elementos em risco serem danificados, é entendida como um «factor de risco interno» ao sistema em análise.

Finalmente, o *risco sísmico específico*, \mathcal{R}_S , é definido como a probabilidade de se igualar ou exceder um determinado valor de perdas L , relativas, em consequência da ocorrência de sismos na região e período de exposição especificados, sendo uma função da perigosidade e da vulnerabilidade sísmicos.

Por outro lado o *risco sísmico* ou risco absoluto, \mathcal{R} , exprime a probabilidade de se igualar ou exceder um determinado valor de perdas (L) absolutas em consequência da ocorrência de sismos na região e num período de tempo de exposição especificado, sendo uma função da perigosidade, da vulnerabilidade e do valor dos elementos em risco (exposição).

Nesta situação, o que distingue a fragilidade sísmica do risco sísmico específico é que a primeira é avaliada pelo grau de dano ou perda resultante de um dado nível da acção sísmica, enquanto que o risco específico integra os danos ou perdas esperadas para todos os níveis da acção sísmica, tendo em consideração a respectiva probabilidade de ocorrência, ou seja, a perigosidade sísmica [Coburn *et al.*, 1994].

Os valores esperados das perdas económicas e humanas (mortos feridos e desalojados) para um intervalo de tempo de exposição e região sísmica são exemplos de indicadores de risco sísmico absoluto correntemente utilizados. Os indicadores de risco sísmico específico resultam da normalização dos indicadores de risco absoluto pelo valor global dos elementos em risco, ou seja, pela exposição.

De acordo com os conceitos atrás definidos a modelação probabilística do risco sísmico recorre à expressão seguinte [Sousa, 2007]:

$$P(L > l) = \int_D \int_H P(L > l / d) P(D > d / h) f_H(h) dh dd \quad (1)$$

Esta expressão é ilustrada graficamente na figura 1 para uma tipologia construtiva de vulnerabilidade v . Note-se que as cores da figura são consentâneas com as da expressão

anterior, em que, a perigosidade é identificada a verde, a vulnerabilidade e dano a azul e o risco a encarnado.

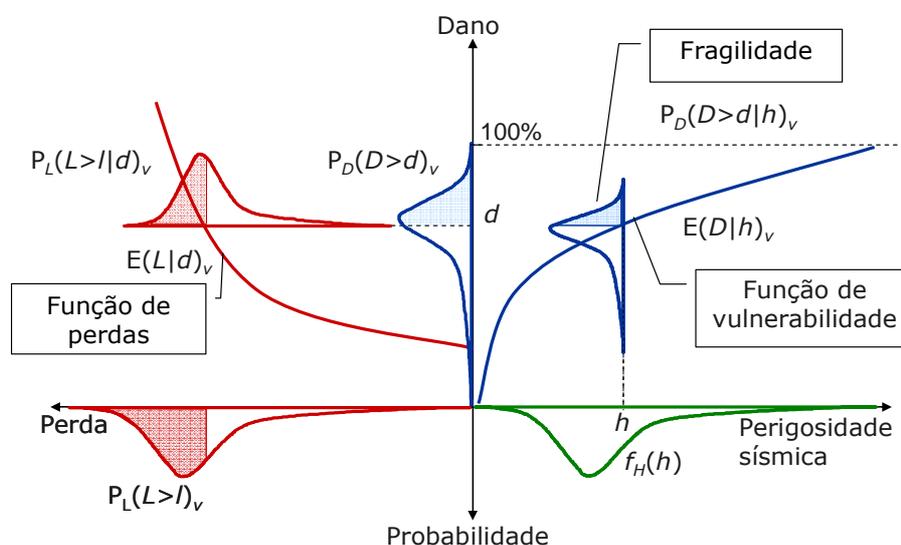


Figura 1 – Modelação probabilística do risco sísmico [Sousa 2007].

2.2 Modelação de perdas em consequência de sismos

Nesta secção apresentam-se dois procedimentos possíveis para modelar as perdas em consequência de sismos:

1. A *análise probabilística do risco sísmico*, em que se constrói um modelo probabilístico para avaliação de perdas, que trata muitas das variáveis envolvidas como aleatórias, englobando, nomeadamente, a análise probabilística da perigosidade sísmica e um modelo probabilístico da fragilidade sísmica, tal como se equacionou na secção anterior (expressão 1 e figura 1).
2. A *simulação de perdas a partir de cenários de ocorrência² seleccionados deterministicamente*, tais como: (i) eventos descritos por uma acção sísmica semelhante à de sismos ocorridos no passado, (ii) eventos simulados a partir das características da sismicidade da região, ou (iii) sismos ocorridos em tempo quase real. Em rigor, este procedimento não deveria ser apelidado de determinístico, pois apesar da acção sísmica assim o ser, no processo de avaliação das perdas são envolvidas variáveis aleatórias, estando-se perante uma análise probabilística condicionada pela ocorrência de um determinado evento [EERI, 2000].

Denominam-se cenários de ocorrência aqueles que caracterizam a acção sísmica num território, sendo assim designados para se distinguirem daqueles que descrevem o impacto dos sismos nesse território, ou seja, os que descrevem os efeitos da acção sísmica e as perdas subsequentes, aqui denominados de cenários de risco sísmico ou de perdas.

O recurso a esta segunda via de modelação de perdas ignora uma das principais vantagens da análise probabilística de perigosidade sísmica que é a de fornecer uma descrição compacta e envolvente de todas as possíveis contribuições da sismicidade para o local em análise. Com efeito, a análise probabilística da perigosidade sísmica integra os efeitos potenciais de todas as fontes sísmicas para estimar a taxa média de excedência de um determinado nível da acção sísmica no local em estudo [McGuire, 1995]. Porém, dada a natureza integradora desta análise, deixa de ser possível caracterizar, com base num único evento, a ameaça sísmica para o local [Bazzurro & Cornell, 1999; Chapman, 1995 e McGuire, 1995], existindo diversas áreas de actuação em que continua a ser imprescindível modelar a acção e as perdas a partir de cenários postulados à partida.

A modelação de perdas a partir de cenários de ocorrência determinísticos constitui uma via possível para contornar dificuldades que surgem, nomeadamente, na avaliação da distribuição de perdas acumuladas numa região, ou no dimensionamento de recursos a afectar a um sistema de gestão de emergência, etc., mas possui a desvantagem de não incluir um critério objectivo para a selecção do cenário.

Uma abordagem possível para a resolução do problema de selecção do cenário de ocorrência, passa pela sua identificação com base na desagregação da perigosidade sísmica [Sousa, 2006; Sousa & Carvalho, 2001 e Sousa et *al.*, 2001] passando os cenários de ocorrência assim identificados a serem apelidados de *cenários de perigosidade sísmica*. Este procedimento constitui um compromisso entre a opção por cenários de ocorrência seleccionados *a priori*, de forma determinística, e a opção pela caracterização da acção com base nos resultados da análise probabilística da perigosidade sísmica.

Neste projecto, e conforme previsto no plano de trabalhos, as perdas em consequência de sismos vão ser avaliadas para cenários de ocorrência criteriosamente escolhidos para o Arquipélago dos Açores. Mais concretamente, serão avaliados os danos no parque edificado habitacional, as perdas económicas e as perdas humanas condicionados pelo cenário de ocorrência seleccionado.

3 Inventário dos elementos em risco

3.1 Apuramentos efectuados nos Censos 2001

No primeiro trimestre de 2006 iniciou-se o processo de recolha de informação dos elementos expostos ao risco sísmico no Arquipélago dos Açores, tendo-se formulado um pedido de acesso a dados estatísticos do Instituto Nacional de Estatística, via Observatório das Ciências e do Ensino Superior, nos moldes que a seguir se descrevem.

O inventário dos elementos em risco baseou-se no XIV Recenseamento Geral da População e no IV Recenseamento Geral da Habitação (Censos 2001) realizados pelo Instituto Nacional de Estatística em 2001 [INE, 2002]. Com efeito, os Censos 2001 englobam o único recenseamento exaustivo efectuado sobre o parque habitacional de Portugal.

Neste levantamento adoptou-se a freguesia como unidade geográfica de análise, pois a recolha de informação estatística de um nível mais desagregado, e tendo em conta os cruzamentos solicitados, originaria problemas de confidencialidade estatística.

Pretendeu-se que a recolha efectuada sobre a informação estatística dos Censos 2001 cumprisse três objectivos principais: (i) apurar os quantitativos de edifícios habitacionais e da população residente no Arquipélago dos Açores, (ii) conhecer a distribuição geográfica destes elementos expostos ao risco sísmico e (iii) caracterizar a vulnerabilidade sísmica das tipologias construtivas mais representativas e frequentes do Arquipélago dos Açores.

As unidades estatísticas primárias *edifício*, *alojamento* e *indivíduo*, observadas nos Censos 2001, foram assim identificadas como os elementos em risco sobre os quais se pretendia recolher informação para concretizar os objectivos atrás mencionados.

No entanto, a avaliação da população presente nos diferentes dias da semana e/ou mês (sazonalidade, etc.) e para diferentes intervalos de tempo (padrões de mobilidade) saem fora do âmbito deste trabalho, pelo que os apuramentos solicitados da população residente têm o fito de fornecer estimativas de perdas humanas, que apenas serão válidas para um período nocturno, em que a maioria dos habitantes do Arquipélago dos Açores se encontram na sua residência.

Foram assim analisados os *Questionários de Edifício*, *Alojamento* e *Individual* dos Censos 2001 de forma a identificar as variáveis consideradas pertinentes para a caracterização da vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco, a que se chamarão *factores de vulnerabilidade*. Os três questionários referidos e as definições de conceitos

associados às unidades estatísticas e variáveis seleccionadas podem ser encontrados em INE [2002].

No quadro 1 reúnem-se as modalidades das variáveis seleccionadas do Questionário de Edifício dos Censos 2001 com o objectivo de se caracterizar a vulnerabilidade sísmica destes elementos em risco. Neste quadro as variáveis são identificadas pelo número respectivo da pergunta deste questionário. Para simplificar a análise, a variável número de pavimentos foi classificada em 7 classes também constantes do quadro 1. Por uma questão de simplificação de linguagem as variáveis *época de construção ou reconstrução do edifício e tipo de estrutura da construção do edifício* passarão a ser designadas simplesmente por *época de construção* ou *época* e por *tipo de estrutura*, respectivamente.

Além das variáveis especificadas no quadro 1, os Censos 2001 também contemplaram novas variáveis pertinentes para a caracterização da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional. Listam-se de seguida essas novas variáveis seguindo, mais uma vez, a numeração constante do Questionário de Edifício dos Censos 2001:

8. *Configuração do R/C.*
9. *O edifício é isolado ou é cinco vezes mais alto que os edifícios adjacentes?*
10. *O edifício é de gaveto ou de extremo de banda?*
11. *O edifício é mais alto (mais do que dois pavimentos) do que qualquer dos edifícios adjacentes?*
17. *Necessidade de Reparações:*
 - 17.1. *Na estrutura;*
 - 17.2. *Na cobertura;*
 - 17.3 *Nas paredes e caixilharias exteriores.*

Quadro 1 – Factores de vulnerabilidade e respectivas modalidades (Censos 2001).

6. Número de pavimentos ³	13. Época de construção ou reconstrução dos edifícios ⁴	14. Tipo de estrutura da construção do edifício ⁵
1	Antes de 1919	Estrutura de Betão armado (BA)
2	1919 a 1945	Paredes de alvenaria argamassada, com placa (ACP)
3	1946 a 1960	Paredes de alvenaria argamassada, sem placa (ASP)
4	1961 a 1970	Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta (ATAPS)
5 a 7	1971 a 1980	Outros (madeira, metálica, etc.)
8 a 15	1981 a 1985	
+ de 15	1986 a 1990	
	1991 a 1995	
	1996 a 2001	

A estas novas variáveis primárias adicionou-se ainda uma nova variável, derivada (também solicitada ao INE), que traduz o *Estado de conservação* global do edifício, cujas modalidades, apresentadas no quadro 2, são obtidas através da ponderação das respostas da variável Necessidade de Reparações.

É sobejamente conhecido que os factores de vulnerabilidade atrás mencionados condicionam a resposta sísmica das estruturas. Refiram-se por exemplo os trabalhos de Carvalho & Oliveira [1999], Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004], Oliveira [1989

³ *Pavimento* - cada um dos planos habitáveis ou utilizáveis do edifício, qualquer que seja a sua relação com o nível do terreno. São considerados como *pavimento* o rés-do-chão, assim como as caves e águas furtadas habitáveis ou utilizáveis com funções complementares à habitação [INE, 2003].

⁴ *Época de construção* - período de construção do edifício propriamente dito, ou o período de construção da parte principal do edifício, isto é, aquela que corresponde à estrutura, quando diferentes partes de um edifício correspondem a épocas distintas, ou o período de reconstrução, para os edifícios que sofreram uma transformação completa [INE, 2003].

⁵ *Tipo de estrutura da construção do edifício* - identifica os elementos utilizados na construção ou reconstrução dos edifícios, no que respeita à estrutura que os suporta. Assim, deverão ser identificados os elementos resistentes do edifício, ou seja, os materiais que servem de estrutura à própria construção e que servem de suporte aos pavimentos, independentemente dos materiais empregues nas paredes exteriores [INE, 2003].

a e b] e Tiedemann [1992] que mencionam diversos factores estruturais de agravamento do comportamento sísmico estrutural assimiláveis às novas variáveis dos Censos 2001.

Quadro 2 – Modalidades das variáveis Necessidade de Reparações e Estado de conservação.

Necessidade de Reparações	Estado de conservação
Nenhumas	Sem necessidade de reparação
Pequenas	A necessitar de pequenas reparações
Médias	A necessitar de médias reparações
Grandes	A necessitar de grandes reparações
Muito Grandes	Muito degradado

Porém, para o território dos Açores apenas foram obtidas do INE (Censos 2001) as variáveis constantes do quadro 1 e a variável *Necessidade de Reparações Na estrutura*.

3.2 3.2 Estatísticas dos elementos em risco

Na presente secção apresentam-se algumas estatísticas sobre os elementos em risco no território estudado, bem como os cruzamentos das variáveis seleccionadas nos Censos 2001 para caracterizar a sua vulnerabilidade sísmica.

No quadro 3 sintetizam-se as contagens das existências apuradas nos Censos 2001 para o Arquipélago do Açores.

Quadro 3 – Valores totais das existências dos elementos em risco no Arquipélago dos Açores.

Elementos em risco	Arquipélago dos Açores
Edifícios	87 585
Alojamentos familiares clássicos + alojamentos colectivos ⁶	92 867
Ocupantes	240 309

Nas figuras 2 a 4 apresentam-se, por época de construção, as existências dos elementos em risco, quantificadas em termos absolutos e relativos.

⁶ Ao longo do presente trabalho a soma dos alojamentos familiares clássicos com os alojamentos colectivos será chamada simplesmente de *alojamentos*.

Nos histogramas imediatos, a escala vertical mede os quantitativos absolutos de edifícios, alojamentos e ocupantes e a escala horizontal é uma escala ordinal em que essas existências foram classificadas por época.

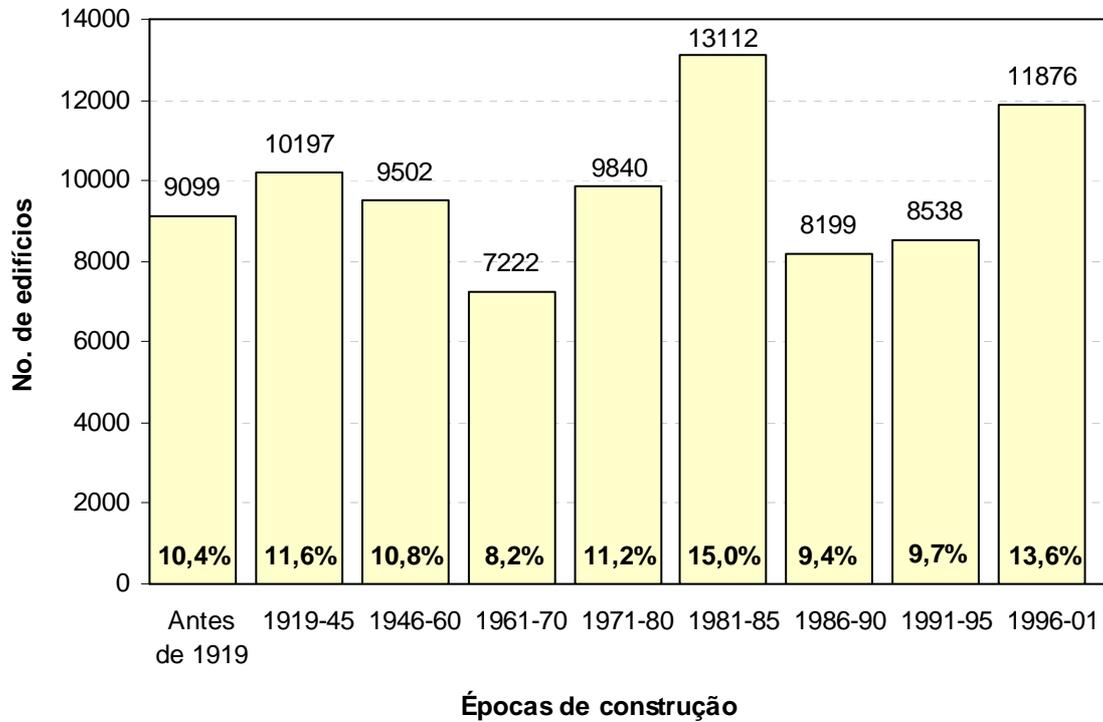


Figura 2 – Número de edifícios por época de construção.

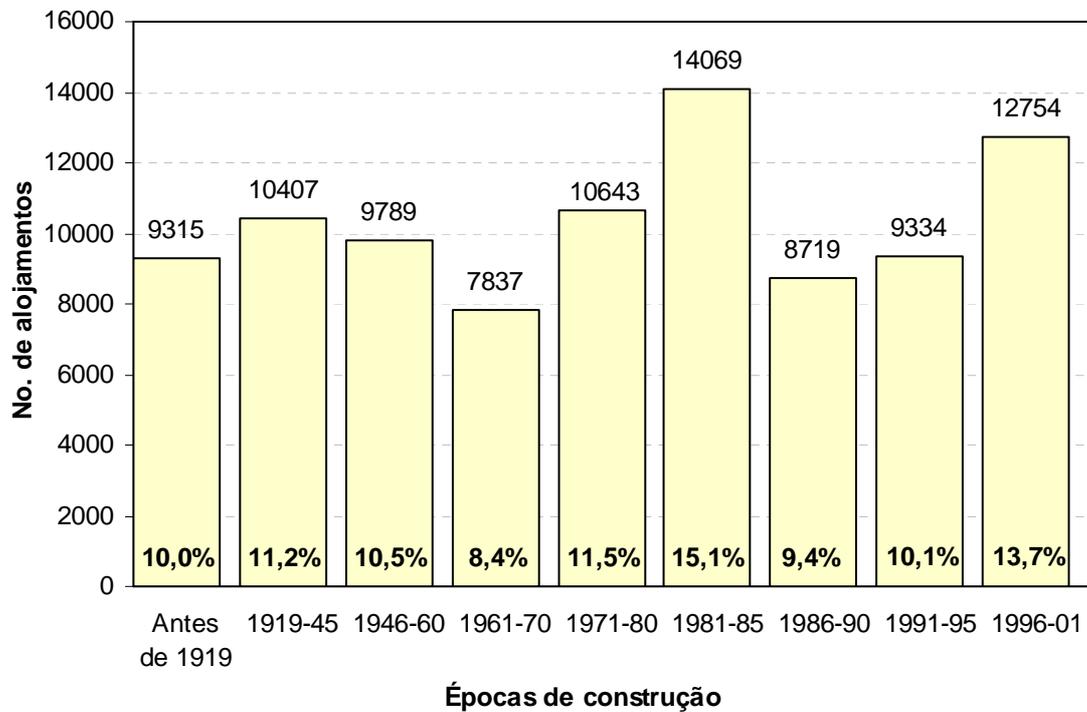


Figura 3 – Número de alojamentos por época de construção.

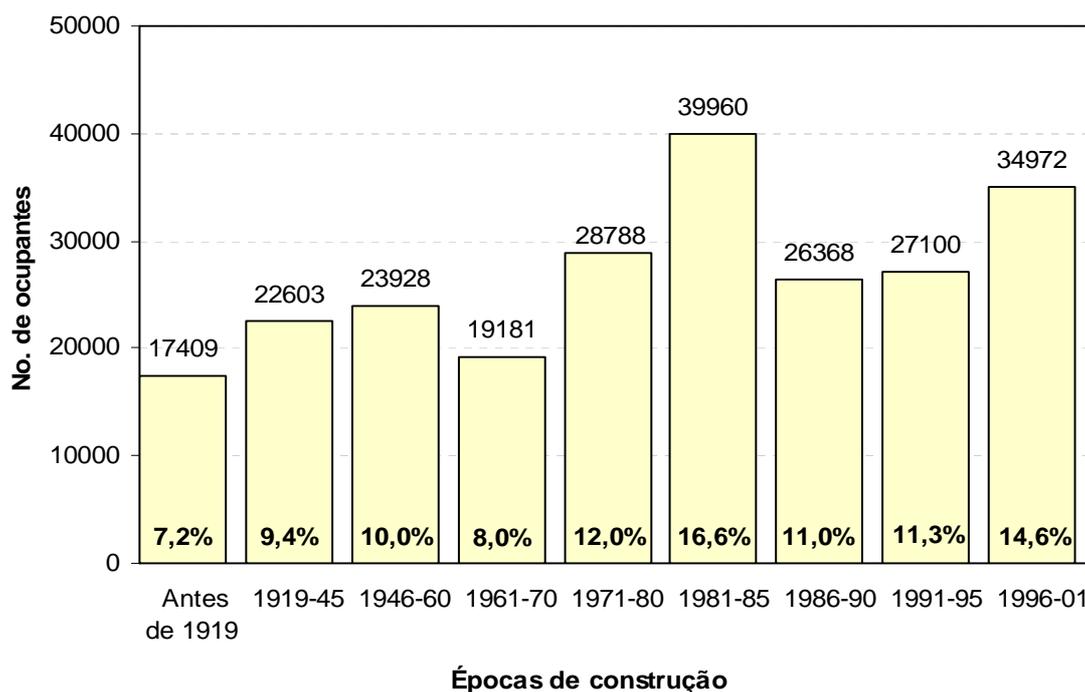


Figura 4 – Número de ocupantes por época de construção.

A figura 5 ilustra, por época de construção, a razão entre o número de alojamentos e o número de edifícios indicando-se do lado direito (em itálico e negrito) a razão dos respectivos valores totais.

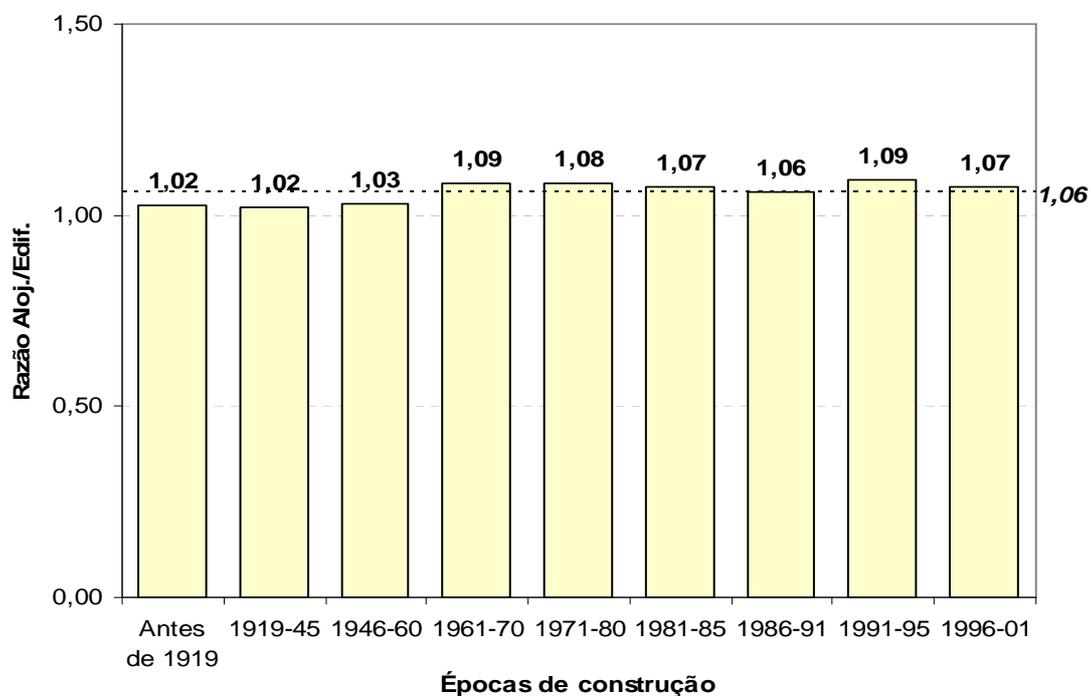


Figura 5 – Razão entre o número de alojamentos e o número de edifícios, por época de construção.

Na figura 6 ilustra-se, igualmente por época de construção, a razão entre o número de ocupantes e o número de alojamentos, indicando-se do lado direito (em itálico e negrito) o indicador de ocupação global para o Arquipélago dos Açores.

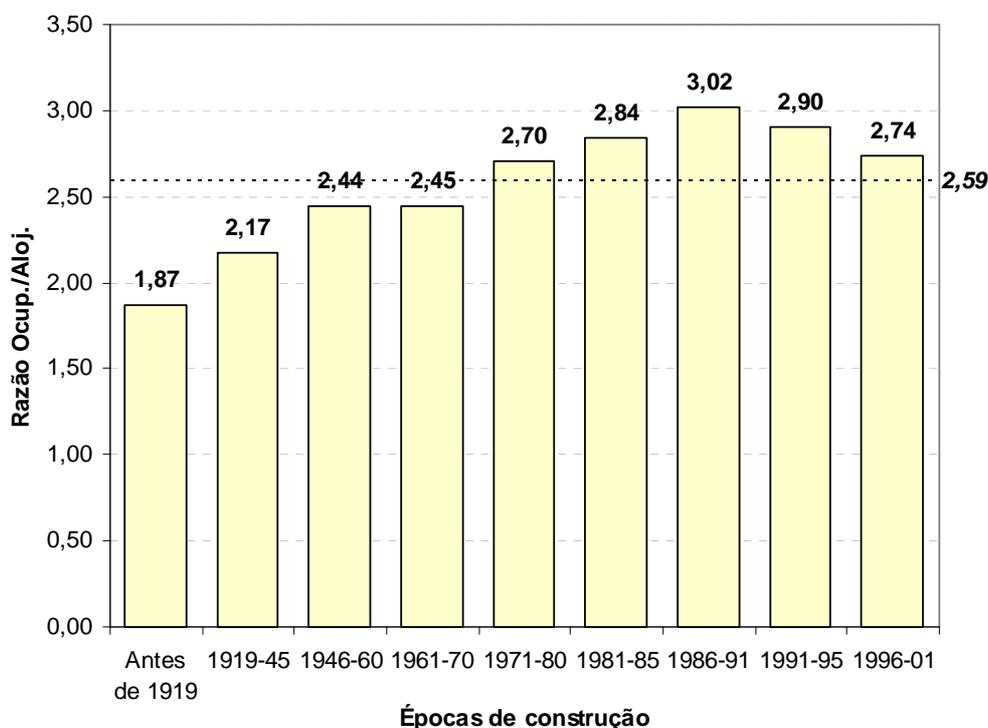


Figura 6 – Razão entre o número de ocupantes e o número de alojamentos, por época de construção.

Analisa-se, de seguida, a relação entre os quantitativos de elementos em risco e as datas de entrada em vigor dos regulamentos de projecto sísmo-resistente Portugueses, de forma a se apresentar um primeiro indicador de vulnerabilidade do parque habitacional do Arquipélago dos Açores.

O primeiro, o Regulamento de Segurança das Construções contra os Sismos, data de 1958 [RSCCS, 1958], tendo sido parcialmente revogado em 1961 pelo Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes [RSEP, 1961]; o regulamento actualmente em vigor, denominado de Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, data de 1983 [RSA, 1983].

Para o efeito de contabilização de existências e respectiva vulnerabilidade atendeu-se às datas de entrada em vigor dos regulamentos e aos períodos de transição da sua aplicação, assumindo-se que (i) nas épocas de construção anteriores a 1960 os edifícios não sofreram dimensionamento sísmo-resistente, (ii) entre 1961 e 1985 os edifícios não

dispensados de dimensionamento para as acções sísmicas terão sido projectados segundo as disposições do RSCCS e RSEP e (iii) nas épocas posteriores a 1985 terão sido projectados de acordo com o disposto no RSA. O pressuposto assumido no último parágrafo constitui uma das hipóteses simplificadoras adoptadas nesta classificação, pois não existem garantias sobre a aplicação efectiva das regulamentações sísmo-resistentes.

No quadro 4 apresentam-se as percentagens de edifícios construídos em data anterior à entrada em vigor do primeiro regulamento, assim como as percentagens de alojamentos e ocupantes residentes nesses edifícios à data dos Censos 2001. Comparam-se os quantitativos apurados para o Arquipélago dos Açores com os valores apurados em estudos anteriores para Portugal Continental [Sousa, 2006].

Quadro 4 – Percentagem de existências em edifícios construídos em data anterior à da entrada em vigor do primeiro regulamento de projecto sísmo-resistente.

Elementos em risco (<= 1960)	Arquipélago dos Açores	Portugal Continental
Edifícios [%]	32,9	30,2
Alojamentos [%]	31,8	24,2
Ocupantes [%]	26,6	19,6

No quadro 5 reúnem-se as existências em edifícios de Betão armado construídos durante a vigência dos regulamentos de projecto sísmo-resistente. Na quarta coluna desse quadro, reúnem-se, para efeitos comparativos, os quantitativos dos elementos em risco existentes em Portugal Continental. Os valores percentuais constantes da terceira e da quarta coluna deste quadro encontram-se normalizados pelos quantitativos totais de cada elemento em risco no Arquipélago dos Açores e no Continente, respectivamente

As restantes figuras desta secção incidem fundamentalmente sobre a unidade estatística edifício, de forma a ser possível analisar estatisticamente os respectivos factores de vulnerabilidade que condicionarão o risco sísmico dos restantes elementos expostos, ou seja, os alojamentos e os ocupantes existentes no território Açoriano.

Na figura 7 ilustra-se a distribuição do número de edifícios por tipo de estrutura. Na figura 8 apresenta-se a distribuição do número de edifícios por tipo de estrutura e por época de construção. A frequência relativa do número de edifícios, por tipo de estrutura, condicionada pela época de construção é ilustrada na figura 9.

Quadro 5 – Existências em edifícios de Betão armado construídos durante a vigência dos regulamentos de projecto sismo-resistente.

Época de construção	Elementos em risco	Arquipélago dos Açores	Portugal Continental
1961-85 (RSCCS, 1958 RSEP, 1961)	Edifícios	10 410 (11,9%)	451 875 (15,1%)
	Alojamentos	12 119 (13,1%)	1 104 766 (22,8%)
	Ocupantes	34 574 (14,4%)	2 397 584 (24,5%)
1986-2001 RSA, 1983	Edifícios	14 298 (16,3%)	377 062 (12,6%)
	Alojamentos	16 015 (17,2%)	1 019 653 (21,0%)
	Ocupantes	46 416 (19,3%)	2 079 699 (21,2%)

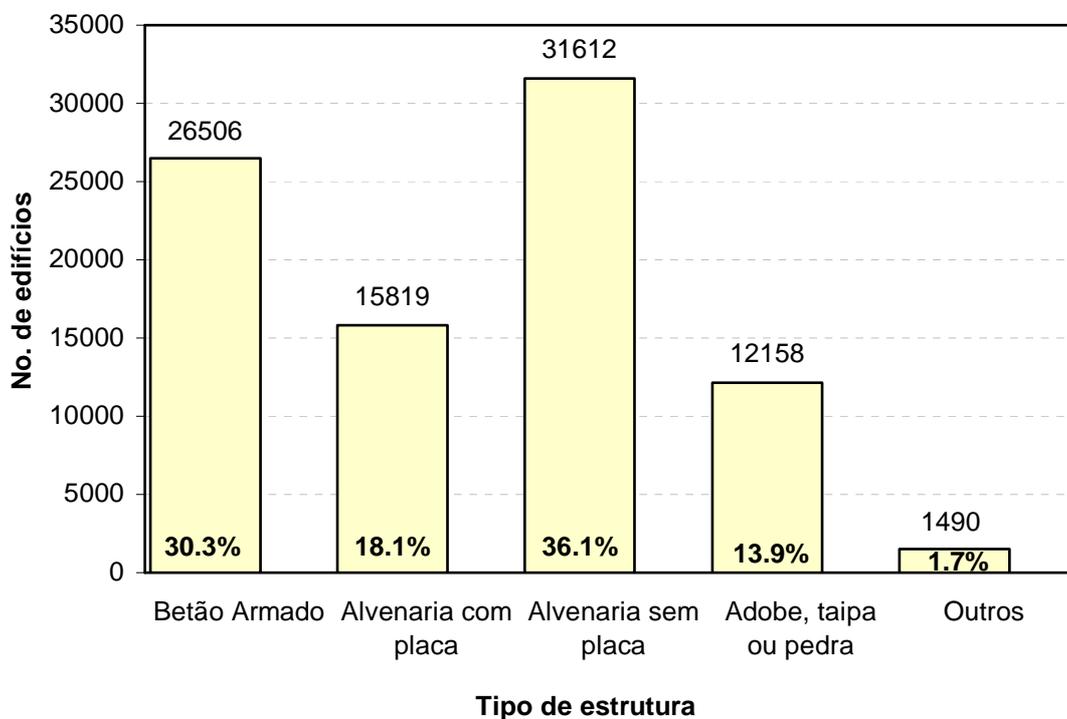


Figura 7 – Número de edifícios por tipo de estrutura.

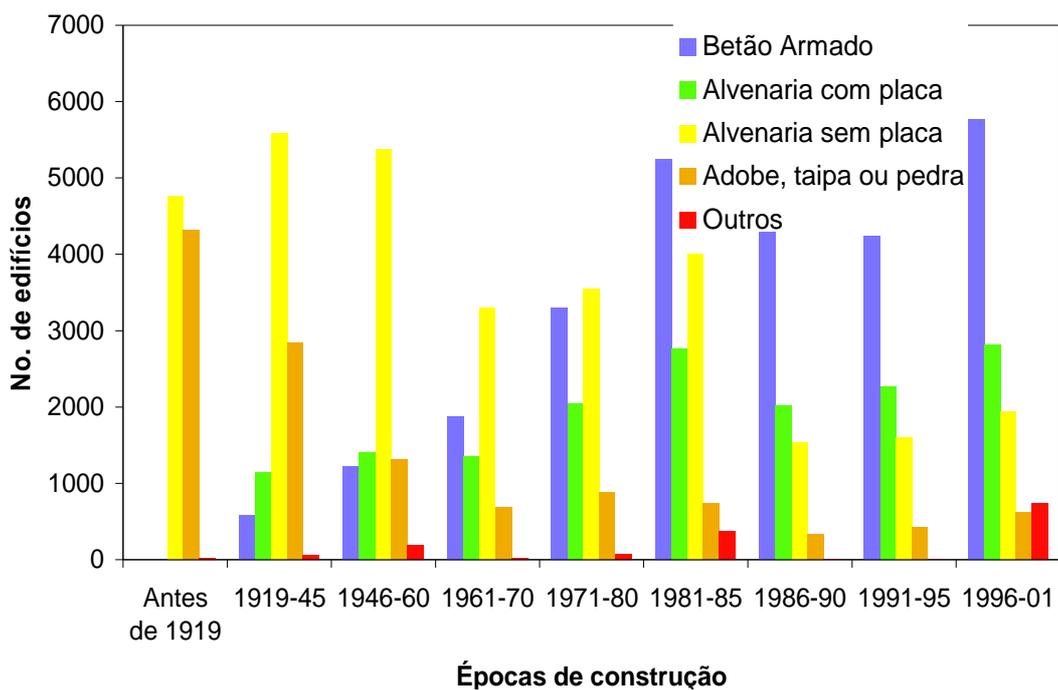


Figura 8 – Número de edifícios por época de construção e tipo de estrutura.

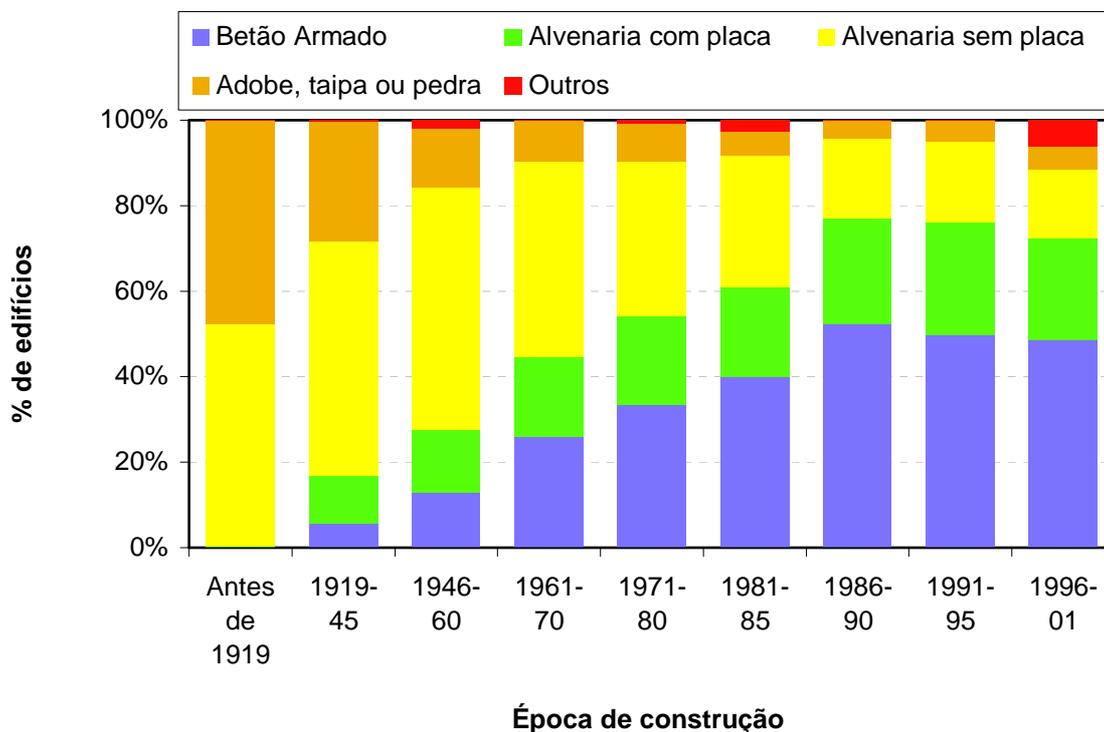


Figura 9 – Percentagem de edifícios por tipo de estrutura dada a época de construção.

No quadro 6 apresenta-se a distribuição dos elementos em risco por número de pavimentos dos edifícios, sendo a distribuição respeitante aos edifícios ilustrada na figura 10.

Quadro 6 – Distribuição de elementos em risco por número de pavimentos dos edifícios.

Pavimentos	Edifícios		Alojamentos		Ocupantes	
	[#]	[%]	[#]	[%]	[#]	[%]
1	38 798	44,3	39 117	42,1	92 541	38,5
2	43 501	49,7	45 456	48,9	125 657	52,3
3	4 882	5,6	6 181	6,7	17 770	7,4
4	312	0,4	1 180	1,3	2 713	1,1
5-7	77	0,1	546	0,6	1 011	0,4
8-15	12	0,0	261	0,3	495	0,2
+ de 15	3	0,0	126	0,1	122	0,1
Total	87 585	100	92 867	100	240 309	100

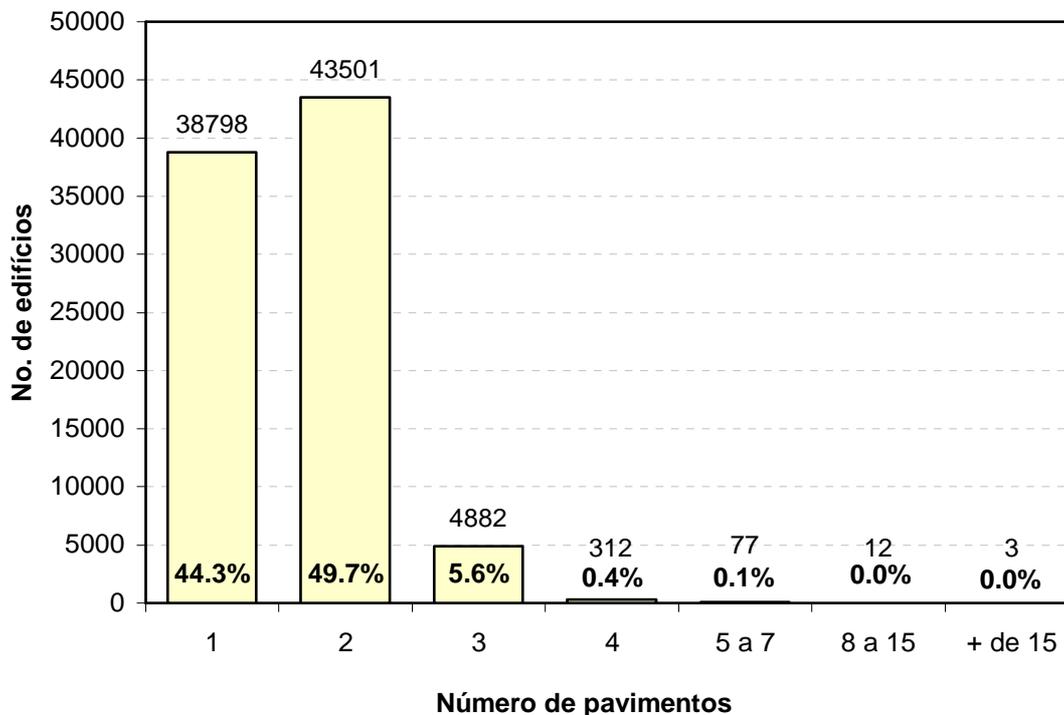


Figura 10 – Número de edifícios por número de pavimentos.

Nas figuras 11 e 12 ilustram-se os apuramentos relativos aos cruzamentos das variáveis número de pavimentos e época de construção dos edifícios.

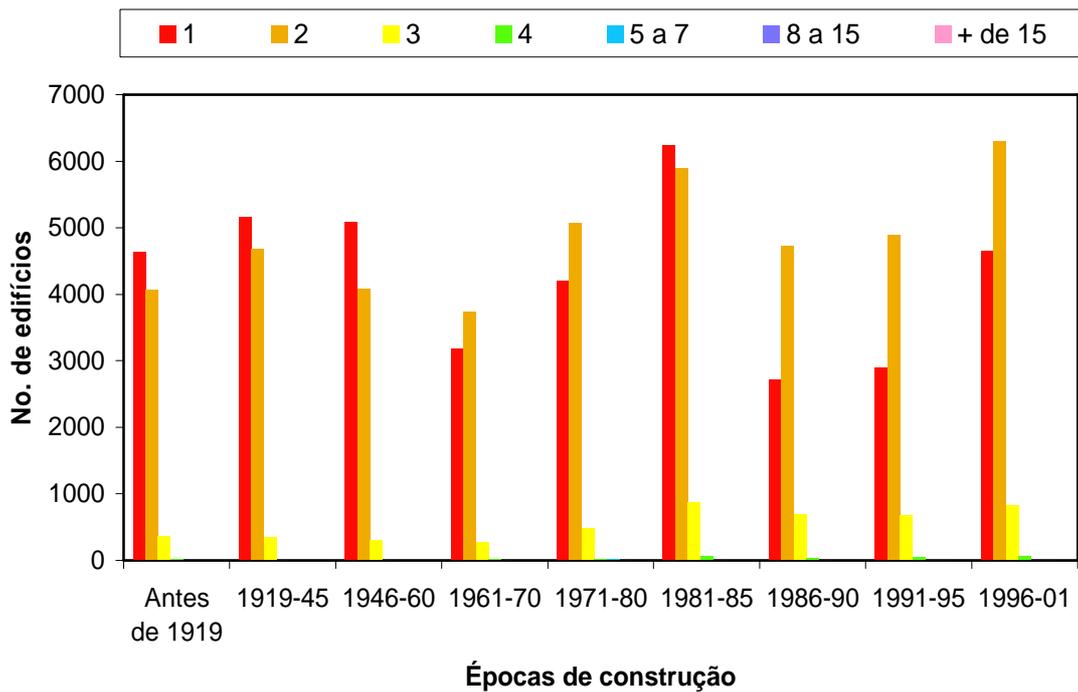


Figura 11 – Número de edifícios por época de construção e número de pavimentos

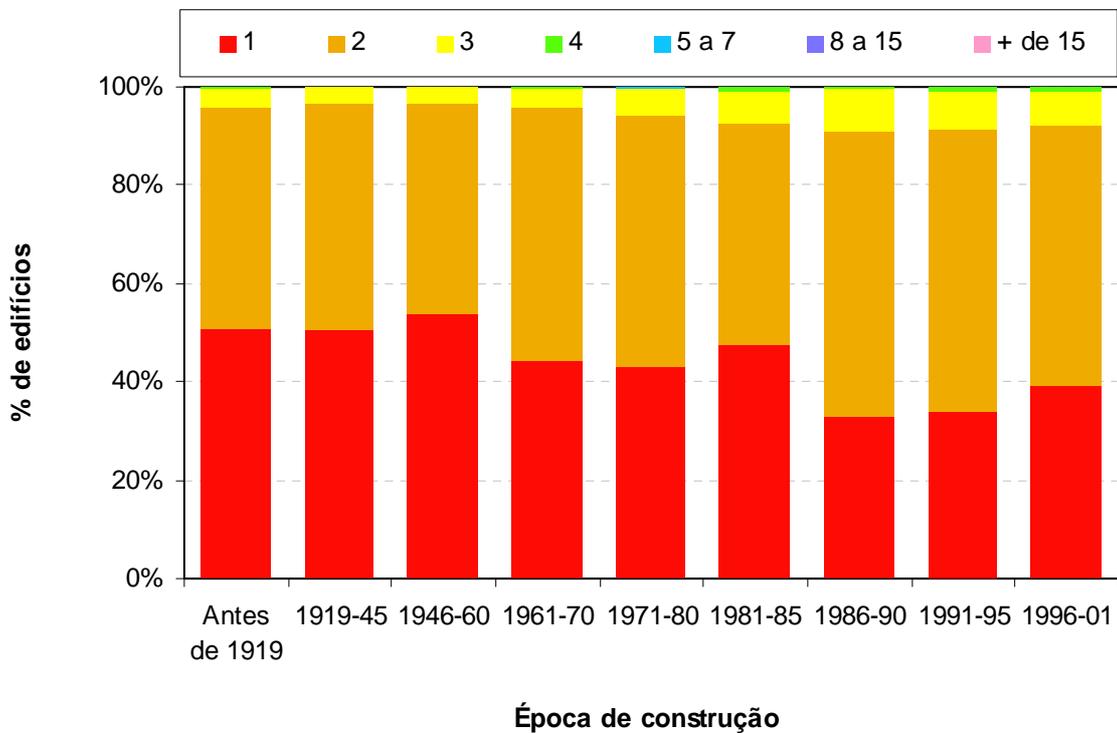


Figura 12 – Percentagem de edifícios por número de pavimentos dada a época de construção.

Os cruzamentos das variáveis número de pavimentos e tipo de estrutura permitiram obter as distribuições ilustradas nas figuras 13 e 14.

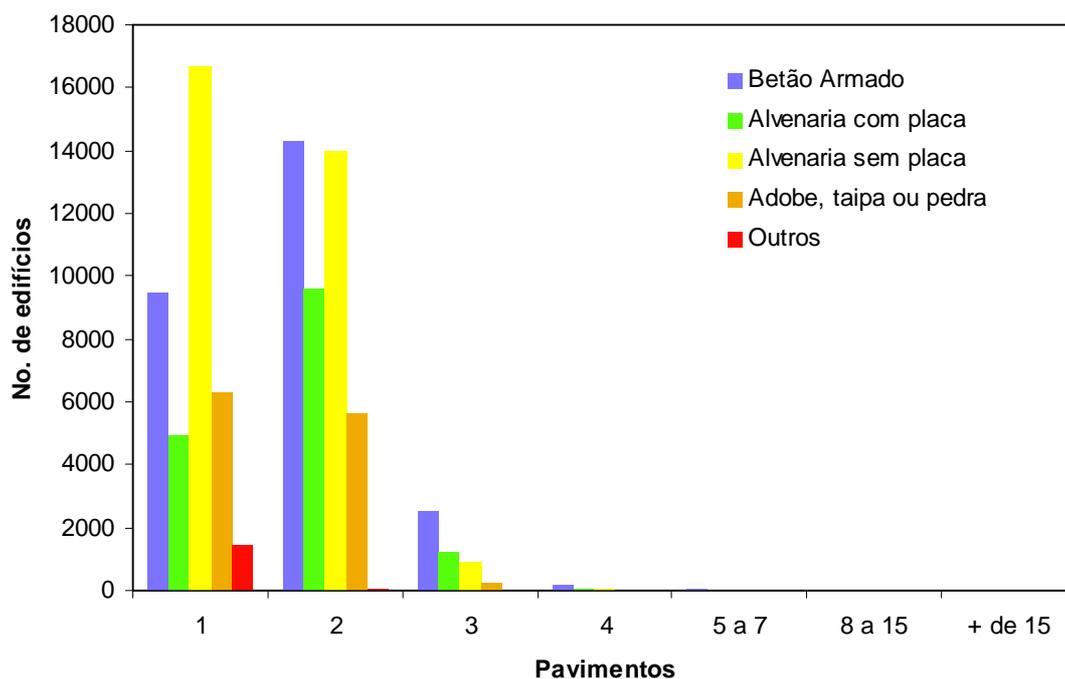


Figura 13 – Número de edifícios por número de pavimentos e tipo de estrutura.

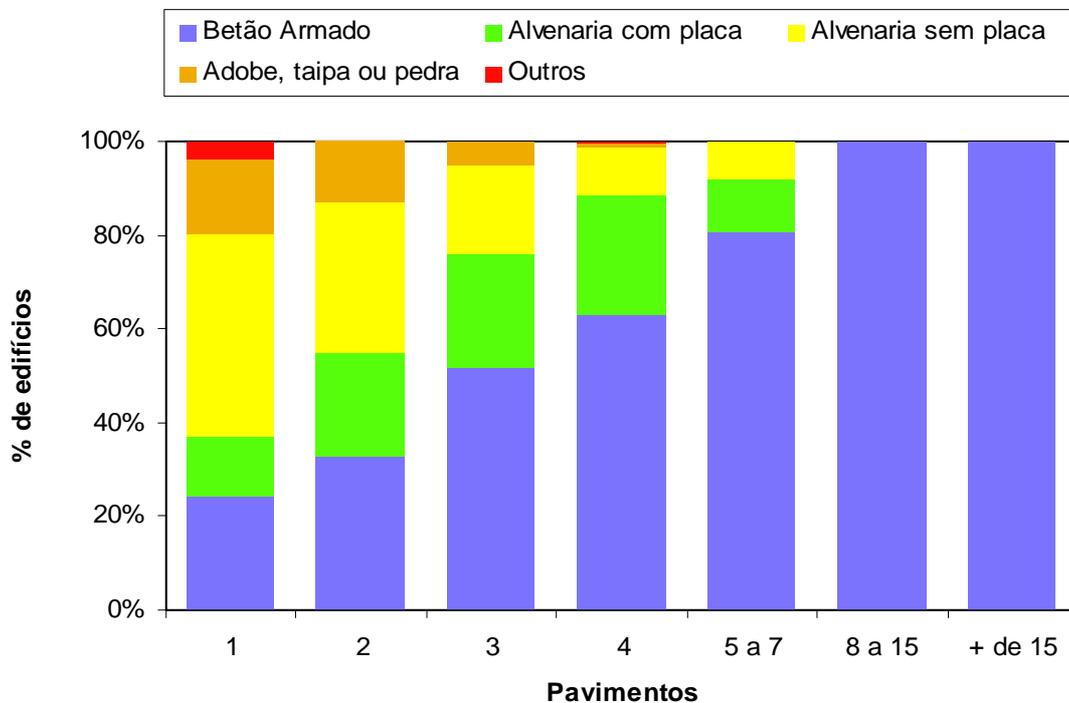


Figura 14 – Percentagem de edifícios por tipo de estrutura dado o número de pavimentos.

No quadro 7 são identificados os dois tipos de estrutura mais representativos de cada época de construção, em que as percentagens apresentadas são normalizadas pelas existências globais de edifícios no território analisado.

Quadro 7 – Tipos de estrutura predominante, em cada época de construção, dos edifícios do Arquipélago dos Açores.

Época de construção	Tipo mais frequente		2º Tipo mais frequente	
	Tipo de estrutura	Edifícios [%]	Tipo de estrutura	Edifícios [%]
Antes de 1919	ASP	5,4	ATAPS	4,9
1919 a 1945	ASP	6,4	ATAPS	3,2
1946 a 1960	ASP	6,1	ACP	1,6
1961 a 1970	ASP	3,8	BA	2,1
1971 a 1980	ASP	4,0	BA	3,8
1981 a 1985	BA	5,9	ASP	4,6
1986 a 1990	BA	4,9	ACP	2,3
1991 a 1995	BA	4,8	ACP	2,6
1996 a 2001	BA	6,6	ACP	3,2

Na figura 15 apresentam-se o número de edifícios em função da variável Necessidades de Reparações Na estrutura, cujas modalidades foram agrupadas em duas grandes classes. A primeira classe agrupa as duas primeiras modalidades desta variável (ou seja, *Sem necessidade de reparação* e *A necessitar de pequenas reparações*, ver quadro 2) e a segunda classe agrupa as restantes modalidades dessa variável. Na figura 16 ilustra-se o número de edifícios em função da variável Necessidades de Reparação Na estrutura, por época de construção.

Por fim, no quadro 8 condensa-se toda a informação, resultante dos apuramentos efectuados nos Censos 2001, evidenciando os quantitativos de edifícios obtidos dos cruzamentos dos factores de vulnerabilidade analisados. Como já foi referido, foram contempladas 9 modalidades da variável, *épocas de construção*, por 7 classes da variável de *número de pavimentos* e por 5 modalidades da variável *tipo de estrutura*.

De acordo com estes cruzamentos ($9 \times 7 \times 5$) deveriam ter sido apurados os quantitativos de edifícios pertencentes a 315 tipologias construtivas, e que se denominam neste trabalho de tipologias Censos 2001. Porém, algumas destas tipologias não possuem existências no parque habitacional do Arquipélago dos Açores, sendo

assinaladas pelo fundo cinzento das respectivas células, tendo como consequência a redução do número de tipologias representadas nos Censos 2001 de 315 para 178.

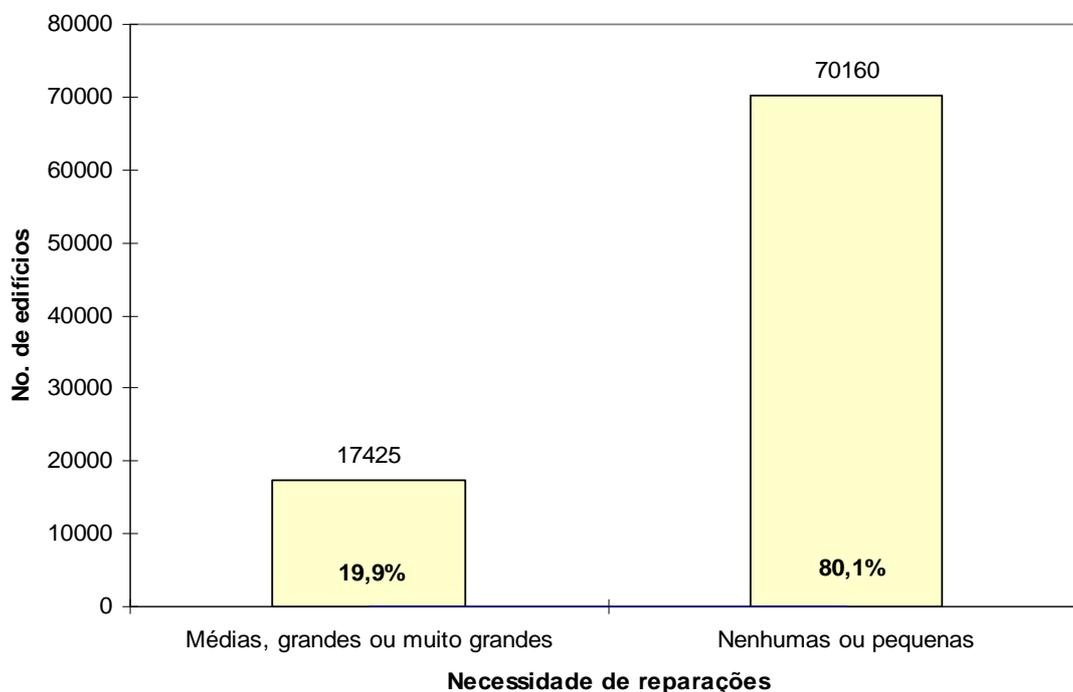


Figura 15 – Número de edifícios por Necessidade de Reparações Na estrutura.

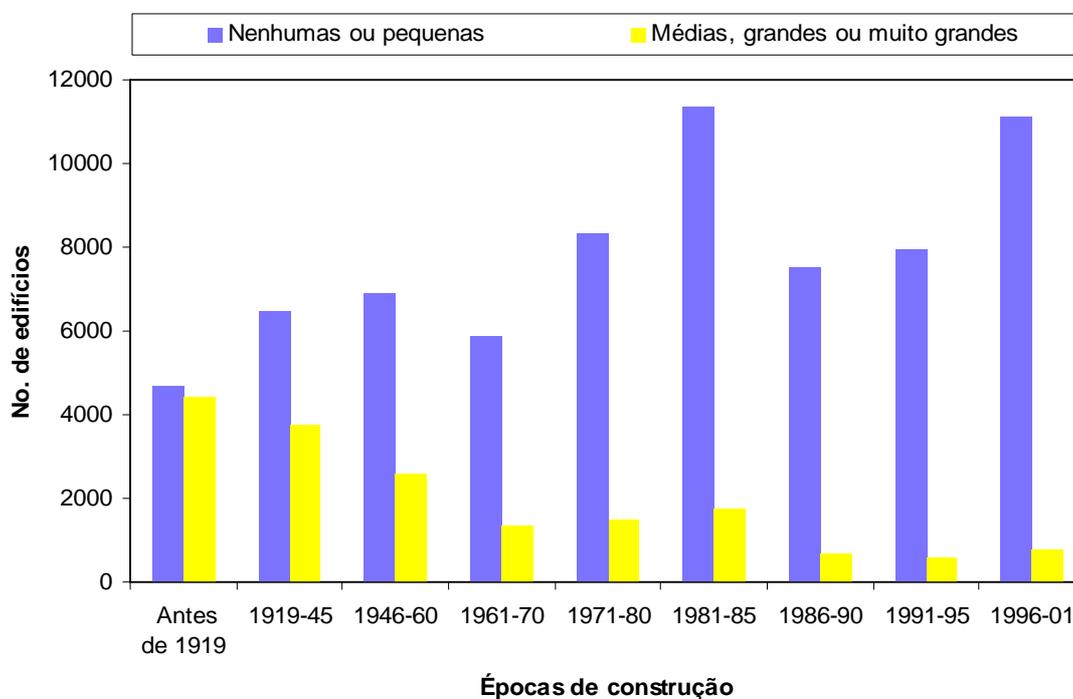


Figura 16 – Número de edifícios por Necessidade de Reparações Na estrutura, dada a época de construção.

Quadro 8 - Quantitativos de edifícios por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos (Censos 2001).

Época	Nº pavimentos	Betão	ACP	ASP	ATAPS	Outros
Antes de 1919	1	0	0	2352	2281	9
	2	0	0	2149	1912	9
	3	0	0	240	125	1
	4	0	10	9	0	0
	5 a 7	0	0	2	0	0
	8 a 15	0	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
	Total = 9099	0	10	4752	4318	19
1919 a 1945	1	250	498	2700	1676	31
	2	270	586	2685	1127	18
	3	52	57	190	39	4
	4	3	2	8	0	1
	5 a 7	0	0	0	0	0
	8 a 15	0	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
	Total = 10197	575	1143	5583	2842	54
1946 a 1960	1	688	542	2983	700	178
	2	477	755	2254	596	9
	3	54	101	133	21	2
	4	3	3	2	0	0
	5 a 7	31	0	0	0	0
	8 a 15	0	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
	Total = 9502	1223	1401	5372	1317	189
1961 a 1970	1	786	379	1666	333	18
	2	958	867	1560	347	3
	3	98	99	67	6	0
	4	18	4	1	2	0
	5 a 7	9	1	0	0	0
	8 a 15	0	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
	Total = 7222	1869	1350	3294	688	21
1971 a 1980	1	1263	649	1839	393	68
	2	1723	1251	1627	474	4
	3	271	135	69	19	0
	4	19	8	4	0	0
	5 a 7	14	2	2	0	0
	8 a 15	4	0	0	0	0
	+ de 15	2	0	0	0	0
	Total = 9840	3296	2045	3541	886	72
1981 a 1985	1	2099	973	2451	357	363
	2	2558	1532	1444	365	2
	3	522	240	108	12	0
	4	52	14	3	1	0
	5 a 7	12	1	1	0	0
	8 a 15	1	0	0	0	0
	+ de 15	1	0	0	0	0
	Total = 13112	5245	2760	4007	735	365
1986 a 1990	1	1301	514	769	127	13
	2	2467	1329	729	201	1
	3	492	173	32	4	1
	4	30	7	1	0	0
	5 a 7	5	2	0	0	0
	8 a 15	1	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
	Total = 8199	4296	2025	1531	332	15
1991 a 1995	1	1293	570	830	191	11
	2	2425	1514	734	227	1
	3	477	171	33	6	0
	4	33	9	1	0	0
	5 a 7	8	1	0	0	0
	8 a 15	3	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
	Total = 8538	4239	2265	1598	424	12
1996 a 2001	1	1784	805	1096	236	733
	2	3374	1771	787	370	9
	3	550	220	47	10	1
	4	39	22	3	0	0
	5 a 7	13	2	1	0	0
	8 a 15	3	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
	Total = 11876	5763	2820	1934	616	743
Totais	Tipo de estrutura	26506	15819	31612	12158	1490
1 pavimento	2 pavimentos	3 pavimentos	4 pavimentos	5 a 7 pavimentos	8 a 15 pavimentos	+ de 15 pavimentos
38798	43501	4882	312	77	12	3

3.3 Distribuição geográfica dos elementos em risco

Para analisar a forma como os elementos em risco se distribuem geograficamente, foram elaborados mapas de densidades de edifícios, alojamentos e ocupantes, por unidade geográfica da freguesia do Arquipélago dos Açores.

Com o objectivo de se apresentar uma visão de maior pormenor da distribuição geográfica das densidades anteriormente mencionadas, os mapas são apresentados para os grupos Ocidental, Central e Oriental do Arquipélago dos Açores (figuras 17 a 19).

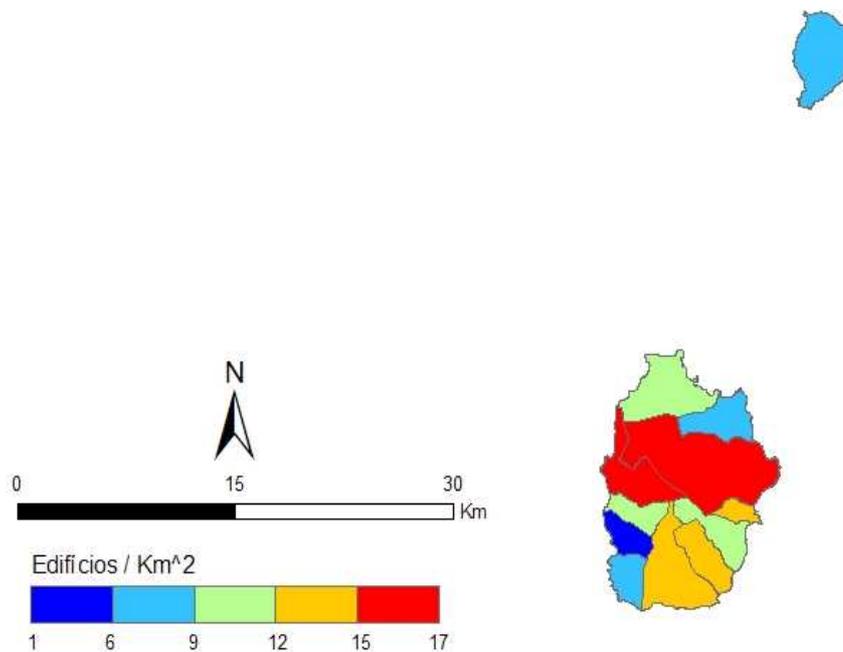


Figura 17 – Densidade de edifícios no grupo Ocidental do Arquipélago dos Açores.

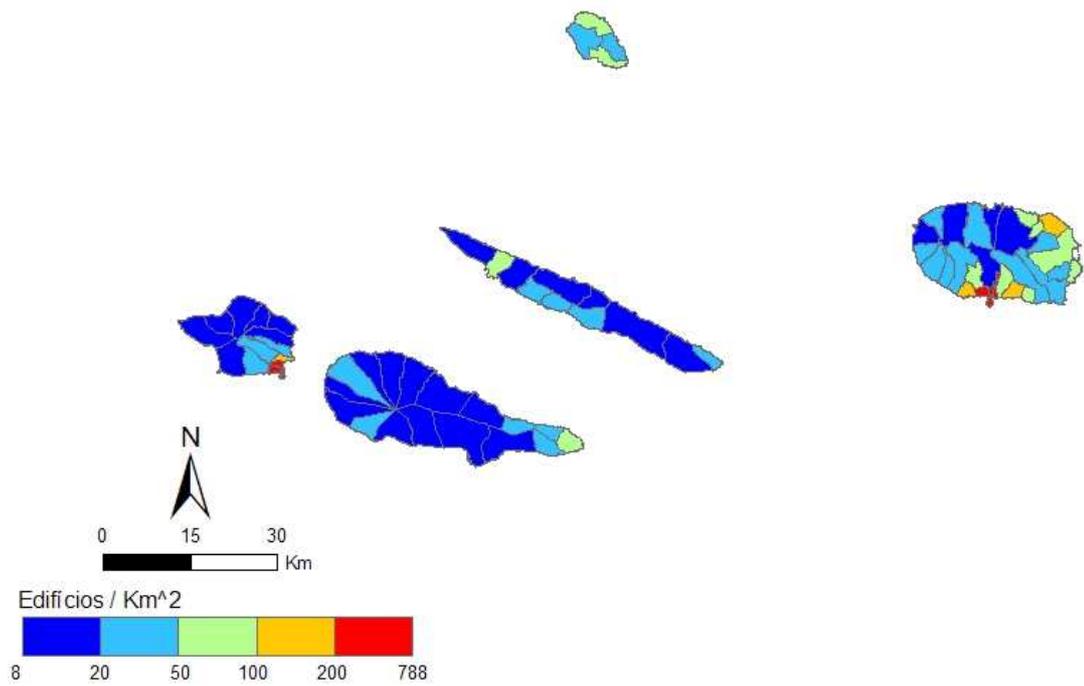


Figura 18 – Densidade de edifícios no grupo Central do Arquipélago dos Açores.

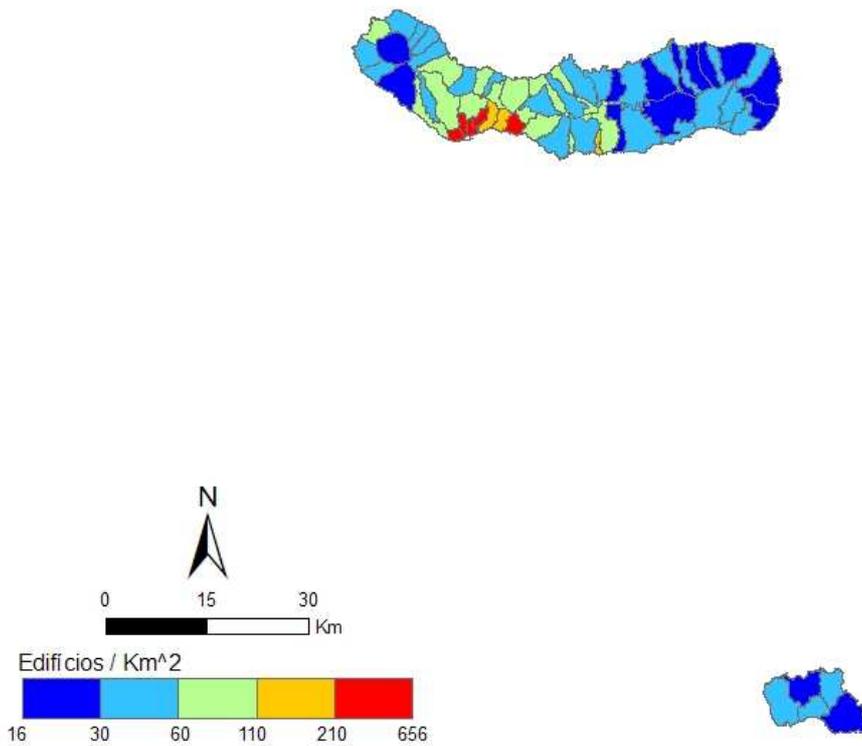


Figura 19 – Densidade de edifícios no grupo Oriental do Arquipélago dos Açores.

3.4 Análise do inventário dos elementos em risco

3.4.1 Análise das estatísticas dos elementos em risco

Da análise das figuras e quadros da secção 3.2 é possível tecer as seguintes considerações sobre o parque habitacional do Arquipélago dos Açores e dos seus ocupantes, tendo como base os registos dos Censos 2001:

1. Os valores globais dos elementos expostos analisados situam-se em 87 585 de edifícios de habitação, contendo 92 867 alojamentos (familiares clássicos e colectivos) e albergando 240 309 habitantes (quadro 3), o que representa, respectivamente, 3%, 2% e 2% de edifícios, alojamentos e ocupantes do parque habitacional de Portugal.
2. Nas figuras 2 a 4 é possível verificar que as existências com mais de quarenta anos à data dos Censos 2001, ou seja, anteriores à época de 1961-1970, representam 33% dos edifícios, 32% dos alojamentos (familiares clássicos e colectivos) e albergam 27% da população. Verifica-se ainda que, no parque habitacional recenseado em 2001, a percentagem de edifícios construídos nas duas últimas décadas do século XX é muito superior à dos períodos anteriores. Assim, 24% do parque habitacional de 2001 foi construído na década de 80 e 23% na de 90, contrastando com os restantes 53% do parque que foi construído antes da década de 1980.
3. O número médio de alojamentos por edifício (figura 5) manteve-se próximo da unidade para os edifícios construídos até à década de 60, verificando-se um crescimento para valores próximos de 1,1 alojamentos por edifício no caso de edifícios construídos em data posterior. Globalmente, o valor médio da razão alojamento/edifício situa-se próximo de 1,06, notando-se que nos edifícios construídos depois da década de 60 essa razão é ligeiramente superior à média. Tal facto indica uma tendência para a construção de edifícios de maior porte em épocas mais recentes o que é consentâneo com o aumento, com a época de construção, do número de edifícios com 2 e mais pavimentos (ver figuras 11 e 12). No que diz respeito à razão ocupantes / alojamento, o seu valor médio global situa-se próximo de 2,59 (figura 6), notando-se que esta razão apresenta uma tendência de crescimento com a época de construção do edifício, exceptuando no que toca aos edifícios construídos na década de 90 em que essa tendência se inverte.
4. O quadro 4 permite constatar que as existências de edifícios construídos em data anterior à da entrada em vigor do primeiro regulamento de projecto sísmo-resistente representavam 33% do parque habitacional Açoriano. Repara-se

também que as percentagens de alojamentos e ocupantes residentes nestes edifícios são ligeiramente inferiores, atingindo os valores de 32% e 27%, respectivamente. Comparativamente com o Continente, os Açores têm uma percentagem superior de edifícios construídos em data anterior da entrada em vigor do primeiro regulamento (30% no Continente 33% nos Açores). No quadro 5 observa-se que a percentagem de edifícios com estrutura de Betão armado construídos durante a vigência dos dois regulamentos é próxima, com uma diferença de quatro pontos percentuais a favor das épocas mais recentes. Note-se porém, que o primeiro regulamento cobre um período de cerca de 25 anos, enquanto que o regulamento actualmente em vigor cobre um período de apenas 15 anos.

5. Relativamente à distribuição do número de edifícios por tipo de estrutura da construção (figura 7), verifica-se que os edifícios com o tipo de estrutura de Paredes de alvenaria argamassada, sem placa, são os que têm maior peso no parque habitacional do Arquipélago dos Açores, representando 36% deste parque, sendo seguidos pelos edifícios com estrutura de Betão armado e com Paredes de alvenaria argamassada, com placa, representando cerca de 30% e 18% do parque habitacional, respectivamente. Os restantes edifícios, ou seja, os com estrutura do tipo Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta e Outros representam cerca de 16% do parque habitacional.

No parque habitacional do Arquipélago dos Açores a percentagem de edifícios de Betão armado é semelhante à do parque habitacional de Portugal Continental (30%) [Sousa, 2006], enquanto que a classe modal da estrutura de edifícios neste território é, como foi referido, o tipo de Paredes de alvenaria argamassada sem placa que contrasta com uma incidência consideravelmente mais reduzida no Continente (17% face aos 36% do Arquipélago dos Açores). Também a percentagem de edifícios com estrutura do tipo Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta é superior nos Açores (14%) à existente no território do Continente (11%).

6. As figuras 8 e 9 permitem concluir que os edifícios com tipo de estrutura de Paredes de alvenaria argamassada, com placa e Betão armado têm, progressivamente, um maior peso nas existências de edifícios construídos em épocas de construção mais recentes. No que diz respeito aos edifícios com estrutura do tipo Paredes de alvenaria argamassada, sem placa e Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta verifica-se o inverso, embora estes edifícios estejam sempre representados em todas as épocas de construção. No Continente este padrão é diferente na medida em que os edifícios de alvenaria

com placa têm uma representatividade muito superior nas épocas de construção mais recentes [Sousa, 2006].

7. Os edifícios com um pavimento (quadro 6 e figura 10) representam cerca de 44% do parque habitacional Açoriano, enquanto que a representação dos edifícios com dois pavimentos é da ordem dos 50%. Apenas 6% dos edifícios do parque habitacional do Arquipélago dos Açores apresentam mais de dois pavimentos, valor bastante inferior aos 15% do Continente [Sousa, 2006]. No quadro 6 verifica-se que a percentagem de edifícios com um e dois pavimentos (94%) é superior às percentagens de alojamentos e de ocupantes em edifícios de um e dois pavimentos (91%). Verifica-se ainda (figuras 11 e 12) que em épocas de construção mais recentes ocorre um decréscimo da percentagem de edifícios com um pavimento, passando de uma incidência de 52% nas épocas mais antigas para 38% na época de 1996 a 2001.
8. Nas figuras 13 e 14 observa-se que as Paredes de alvenaria argamassada, sem placa é o tipo de estrutura maioritária nos edifícios com 1 pavimento. Nos edifícios com 2 pavimentos o tipo de estrutura anterior tem igual incidência ao de Betão armado. De notar que o Betão armado assume um papel preponderante na estrutura dos edifícios com 4 ou mais pavimentos, sendo o único tipo de estrutura observada em edifícios com 8 ou mais pavimentos.
9. Tendo em conta o quadro 7, verifica-se que, à data dos Censos 2001, as Paredes de alvenaria argamassada, sem placa eram o tipo de estrutura predominante nos edifícios construídos em épocas anteriores a 1980. Nos edifícios construídos em data posterior a 1980, a estrutura de Betão armado passou a ser a mais frequente. Por outro lado, as Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta são o segundo tipo de estrutura mais frequente nos edifícios construídos até 1945. Nas épocas posteriores o segundo tipo de estrutura mais frequente alternou entre as Paredes de alvenaria argamassada, com placa (1946 a 1960 e 1986 a 2001), o Betão armado (1961 a 1980) e as Paredes de alvenaria argamassada, sem placa (1981 a 1985).
10. Sobre os novos factores de vulnerabilidade apurados no Questionário de Edifício dos Censos 2001, e no que diz respeito às Necessidades de Reparações Na estrutura verifica-se, na figura 15, que cerca de 20% dos edifícios do parque habitacional necessitam de obras de reparação na estrutura, o que contrasta com os 80% de edifícios que não necessitam de reparações, ou necessitam de pequenas reparações na estrutura. Verifica-se que este panorama é muito semelhante ao que ocorre, à data dos Censos 2001, no parque habitacional de Portugal Continental. Na figura 16 constata-se que estas Necessidades de

Reparações se correlacionam com a idade dos edifícios, sendo os edifícios mais antigos os que, naturalmente, necessitam de maiores reparações.

3.4.2 Análise da distribuição geográfica dos elementos em risco

Da análise dos mapas constantes da secção 3.3 é possível efectuar as seguintes observações sobre o parque habitacional do Arquipélago dos Açores e seus ocupantes, à data dos Censos 2001:

1. As freguesias com maior densidade de edifícios de habitação, alojamentos e ocupantes situam-se nos principais centros urbanos dos grupos Central e Oriental do Arquipélago dos Açores. No grupo Central destacam-se as freguesias da cidade da Horta (ilha do Faial) e da cidade de Angra do Heroísmo (ilha Terceira). No grupo Oriental destacam-se as freguesias da cidade de Ponta Delgada (ilha de S. Miguel). Verifica-se também que as freguesias litorais são as que apresentam a maior densidade de elementos em risco. É sabido que, regra geral, no Arquipélago dos Açores, e reportando às freguesias não urbanas, as maiores densidades dos elementos em risco se concentram numa faixa litoral dessas freguesias, embora a análise agora efectuada com a desagregação geográfica da freguesia não permita chegar a esta conclusão.
2. O grupo Ocidental é aquele que apresenta uma menor densidade de edifícios, de alojamentos e de ocupantes de todo o Arquipélago. Nos restantes grupos, é a ilha de Santa Maria no grupo Oriental e as ilhas de S. Jorge, Graciosa e Pico no grupo Central que apresentam uma menor densidade dos referidos elementos em risco.

3.5 Conclusões

Nesta secção reúnem-se as principais conclusões a retirar da caracterização do parque habitacional do Arquipélago dos Açores e dos seus ocupantes. Essa caracterização baseou-se na análise do recenseamento exaustivo desse parque efectuada nos Censos 2001. Da informação destes Censos seleccionaram-se as unidades estatísticas e as variáveis pertinentes para quantificar e caracterizar geograficamente diversos elementos em risco, em função dos factores de vulnerabilidade sísmica identificados. Foi ainda possível apontar as tipologias construtivas mais frequentes do Arquipélago dos Açores.

Para se visualizar de forma sintética as características do parque habitacional do Arquipélago dos Açores considerem-se os seguintes números:

1. Os valores globais dos elementos expostos analisados situam-se perto de 88 000 de edifícios de habitação, contendo cerca de 93 000 alojamentos (familiares

clássicos e colectivos) e albergando perto de 240 000 habitantes, representando, respectivamente, 3%, 2% e 2% de edifícios, alojamentos e ocupantes do parque habitacional de Portugal.

2. O parque habitacional recenseado no Arquipélago dos Açores é composto, por edifícios construídos, maioritariamente (67%), em data posterior à da entrada em vigor da primeira regulamentação Portuguesa sismo-resistente [RSCCS, 1958]. A grande maioria dos edifícios possuem 1 e 2 pavimentos (94%), com estrutura do tipo Paredes de alvenaria argamassada, sem placa (36%), seguida da estrutura de Betão armado (30%). Nas épocas de construção mais recentes os tipos de estruturas de Paredes de alvenaria argamassada, com placa e de Betão armado foram tendo progressivamente um maior peso nas existências dos edifícios do Arquipélago dos Açores, verificando-se o inverso no que toca aos edifícios com Paredes de alvenaria argamassada, sem placa e com Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta. É de esperar que alguns tipos de estruturas sofram alterações nos seus processos construtivos e elementos resistentes, quer entre regiões diferentes do Arquipélago, quer ao longo do tempo, ou seja, os tipos de estruturas referidos não serão homogéneos, nem temporal, nem geograficamente [Sousa, 2006].
3. A maioria dos alojamentos situa-se em edifícios com estrutura do tipo Paredes de alvenaria argamassada, sem placa (35%) ou em edifícios de Betão armado (32%). No que diz respeito aos ocupantes a maioria reside em edifícios de Betão armado (36%) ou em edifícios com estrutura do tipo Paredes de alvenaria argamassada, sem placa (32%).
4. As freguesias com maior densidade de edifícios de habitação, alojamentos e ocupantes situam-se nas principais cidades dos grupos Central e Oriental do Arquipélago dos Açores. No grupo Central destacam-se as freguesias da cidade da Horta (ilha do Faial) e da cidade de Angra do Heroísmo (ilha Terceira). No grupo Oriental destacam-se as freguesias da cidade de Ponta Delgada (ilha de S. Miguel).
5. Sobre os novos factores de vulnerabilidade apurados no Questionário de Edifício dos Censos 2001, ressalta que cerca de 20% dos edifícios do parque habitacional necessitam de obras de reparação na estrutura, contrastando com os 80% de edifícios que estruturalmente se encontram em bom estado de conservação.

Comparando a análise agora efectuada com trabalhos anteriores [Sousa, 2006] em que o parque habitacional do território Continental foi caracterizado de uma forma semelhante, conclui-se que:

1. O parque Açoriano possui uma menor percentagem de edifícios construídos após a introdução da primeira regulamentação Portuguesa sismo-resistente do que o Continental (67% nos Açores vs 70% em Portugal Continental).
2. As Paredes de alvenaria argamassada, sem placa são o tipo de estrutura de construção maioritário nos Açores (36%), enquanto que no Continente são as Paredes de alvenaria argamassada, com placa (40%).
3. A incidência do tipo de estrutura de Betão armado é semelhante nos Açores e no Continente (30%).
4. Um dos tipo de estrutura mais vulnerável do parque, as Paredes de adobe, taipa e alvenaria de pedra solta, têm menor representatividade no Continente (11%) do que nos Açores (14%).
5. Globalmente, o parque habitacional Açoriano é constituído por edifícios de menor porte que o Continental. Com efeito, apenas 6% dos edifícios do parque habitacional do Arquipélago dos Açores apresentam mais de dois pavimentos, valor bastante inferior aos 15% do Continente.

Estes elementos permitem efectuar a comparação entre as características do parque habitacional Açoriano e o Continental, sendo indicadores genéricos que sugerem que o Açoriano é sismicamente mais vulnerável que o Continental.

Para terminar refira-se que, tal como no território Continental [Sousa, 2006], as percentagens elevadas de elementos em risco em edifícios construídos em data posterior à da entrada em vigor do primeiro regulamento não implicam necessariamente um quadro positivo para a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional dos Açores, pois não existem garantias sobre a aplicação sistemática das regulamentações sismo-resistentes, quer ao nível do projecto estrutural quer na execução das obras, principalmente em edifícios com tipo de estrutura diferente do Betão armado.

4 Simulador de Cenários Sísmicos e suas actualizações

4.1 O Simulador de Cenários Sísmicos LNECloss

4.1.1 Apresentação

O programa de simulação de cenários sísmicos desenvolvido no LNEC [Sousa, 2006, Sousa *et al.*, 2006, LESSLOSS, 2007] encontra-se integrado num Sistema de Informação Geográfica (SIG), constituindo uma ferramenta privilegiada para modelar, numa qualquer parcela do território Português, a acção sísmica, os danos no edificado, as perdas humanas e as perdas económicas em consequência de um cenário sísmico de ocorrência especificado. O programa de simulação de cenários sísmicos será aqui designado de *Simulador de Cenários Sísmicos*, *Simulador LNECloss*, ou simplesmente de *Simulador*.

O Simulador teve a sua génese num projecto de investigação patrocinado pelo então designado Serviço Nacional de Bombeiros e Protecção Civil (SNBPC), actual Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC), que tinha como principais objectivos caracterizar a vulnerabilidade e estabelecer os danos para o planeamento de emergência sobre o risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos concelhos limítrofes de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vinhos e Torres Vedras [Campos Costa *et al.*, 2004; Carvalho *et al.*, 2002 e Sousa *et al.*, 2004]. Desde essa data o Simulador tem vindo a ser actualizado sucessivamente nas suas diversas vertentes [Sousa, 2006, Sousa *et al.*, 2006, LESSLOSS, 2007] Em particular, no âmbito do projecto USuET foi necessário, ou oportuno, actualizar o Simulador em termos de (i) dados, (ii) âmbito geográfico, (iii) rotinas internas do SIG, (iv) algoritmos de modelação, (v) aferição dos resultados e (vi) ambiente de operação. Estas actualizações serão detalhadas na secção 4.2.

O Simulador de Cenários Sísmicos é constituído assim por um pacote de rotinas, desenvolvidas na linguagem de programação FORTRAN 90 e integrado num Sistema de Informação Geográfica (SIG), que permite estimar a acção sísmica no substracto rochoso e à superfície, os danos estruturais no edificado, as perdas humanas e as perdas económicas para um cenário sísmico de ocorrência pré-definido, ou fornecido pelo utilizador.

Optou por se desenvolver as rotinas de cálculo científico em FORTRAN 90 devido à complexidade de algumas delas, à possibilidade de utilização de rotinas do compilador e à rapidez da sua execução. A rotina principal, que invoca cerca de 60 subrotinas, foi compilada como *Dynamic Link Library* (DLL) o que permite a sua invocação dinâmica por qualquer aplicação desenvolvida para plataformas WINDOWS, no presente caso o

ArcView GIS 3.2 comercializado pela ESRI. A integração da aplicação externa (DLL) no SIG exigiu o desenvolvimento de rotinas adicionais codificadas em Avenue, que constitui a linguagem de programação orientada por objectos incluída no ArcView 3.2.

O Simulador possui uma grande versatilidade em termos de metodologias e dados, devido à sua estrutura modular, facilidade de actualização e integração num SIG. O Simulador beneficia de um vasto leque de potencialidades disponibilizadas pelo SIG, nomeadamente a possibilidade de agregar informação georeferenciada a bases de dados de informação alfanumérica e imagens, e a capacidade de utilização de várias ferramentas de visualização e análise espacial.

Os elementos em risco, que constituem dados de entrada para o Simulador, encontram-se armazenados em bases de dados que incluem a informação apurada nos Censos 91 e 2001 sobre o edificado residencial e seus ocupantes. A informação está organizada em função das variáveis relevantes para a caracterização da vulnerabilidade dos elementos em risco e referenciada geograficamente.

A figura 20 representa o diagrama de fluxo do Simulador em que se evidencia a sua estrutura organizada em cinco módulos principais, os dados necessários à sua operação, os modelos e os resultados que fornece. Estes cinco módulos funcionam de forma estanque e sequencial, no sentido em que: (i) os dados e os modelos subjacentes a cada módulo podem ser actualizados independentemente e (ii) os resultados de um determinado módulo alimentam o módulo seguinte, podendo, em algumas situações, ser armazenados, obviando serem recalculados.

4.1.2 Dados

O Simulador utiliza duas categorias de dados de entrada, os fornecidos pelo utilizador e os dados internos à aplicação.

O utilizador necessita apenas de fornecer a magnitude e o epicentro do cenário sísmico de ocorrência que pretende modelar. Alternativamente, não desejando simular a acção sísmica deverá fornecer a magnitude, o hipocentro do cenário de ocorrência e a descrição do movimento sísmico nas freguesias da região em análise, quer numa forma macrossísmica, quer numa forma espectral. O utilizador deverá ainda responder a diversas questões sobre os dados e as opções a utilizar nos diferentes módulos do Simulador.

Descriminam-se de seguida os dados internos ao Simulador de Cenários Sísmicos necessários à execução de cada módulo.

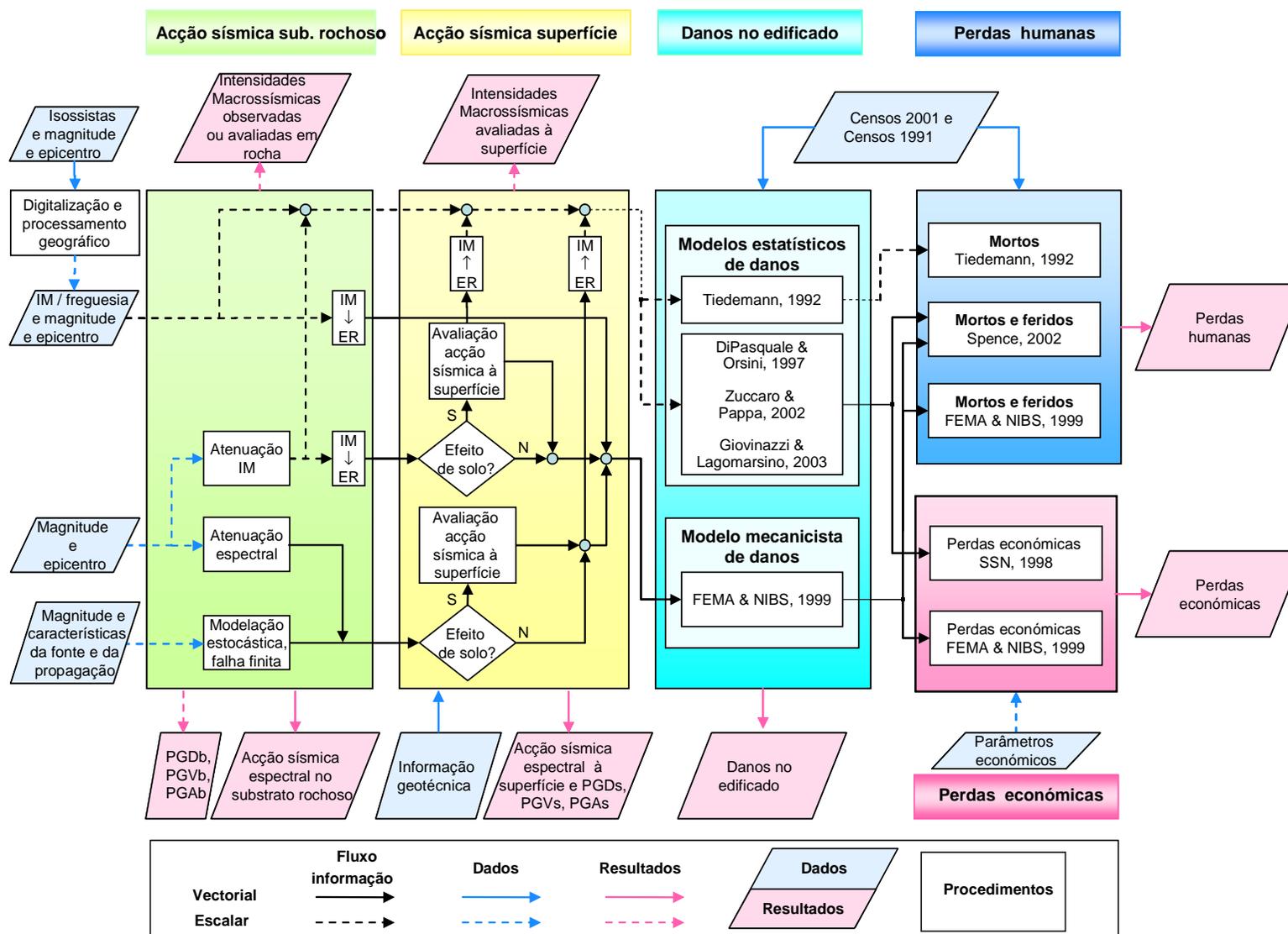


Figura 20 – Fluxograma do Simulador (IM = Intensidade Macrossísmica; ER = Espectro de Resposta [modificado de Sousa, 2006].

Módulo da acção sísmica no substracto rochoso

São dados internos ao Simulador os parâmetros de cenários sísmicos de ocorrência predefinidos (cenário de 1531, 1755, 1858, 1909 e 1969 do Continente e 1980 e 1998 do Arquipélago dos Açores), tais como a magnitude, o hipocentro e o instante de ocorrência. O Simulador também inclui as zonas de geração sísmica delineadas por Sousa [1996] para Portugal Continental e a profundidade média dos hipocentros em cada zona de geração.

Módulo da acção sísmica à superfície

Este módulo inclui duas bases de dados:

1. Uma base de dados de intensidades macrossísmicas relativa a diversos «eventos» sísmicos armazenando a acção sísmica estimada para cada uma das freguesias de Portugal Continental e do Arquipélago dos Açores. A construção desta base de dados exigiu um pré-processamento de informação exterior ao Simulador, tendo-se estabelecido um procedimento automático que aproveita as capacidades de análise de imagem e de análise espacial disponibilizadas pelo *ArcView SIG*. Para o efeito, as intensidades macrossísmicas por freguesia foram estimadas a partir das isossistas de sismos do passado, de cartas de perigosidade sísmica e de intensidades avaliadas em localidades em que esses eventos se fizeram sentir [Choffat & Bensaúde, 1913; Moreira, 1984; Nunes *et al.*, 1999; Oliveira, 1992; Paula, 1996; Pereira de Sousa, 1919-1932 e Sousa & Oliveira, 1991]. Foram ainda adicionados «eventos» com intensidade macrossísmica constante em todas as freguesias de Portugal para permitir estudar a vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco de qualquer região deste território.
2. Uma base de dados que armazena o conjunto de parâmetros de natureza geotécnica necessários à caracterização de perfis geotécnicos encontrando-se disponível no Simulador apenas para 277 freguesias da Área Metropolitana de Lisboa e concelhos limítrofes. Estes perfis são utilizados para simular as alterações na acção sísmica à superfície induzidas pela presença de formações superficiais recentes do ponto de vista geológico [Carvalho *et al.*, 2002]. Esta informação geotécnica foi recolhida e processada pelo Departamento de Geotecnia do LNEC [Vozzone *et al.*, 2002], no contexto do referido projecto do SNBPC. A possibilidade de simular o efeito dinâmico dos solos não se encontra ainda disponível no Simulador de Cenários Sísmicos aplicado ao Arquipélago dos Açores. No entanto, essa simulação é essencial para uma correcta caracterização da acção sísmica à superfície, sendo este um dos domínios em aberto em que é possível identificar necessidades de investigação futura.

Módulo dos danos no edificado

Este módulo recorre a uma base de dados com os quantitativos habitacionais (edifícios, alojamentos familiares e colectivos) apurados nos Censos 91 e 2001 para todas as freguesias de Portugal Continental e do Arquipélago dos Açores, descritos pelos factores de vulnerabilidade identificados nos Censos 2001 (ver capítulo 3). O utilizador poderá ainda optar por simular os danos no edificado escolhendo duas alternativas: (i) os quantitativos habitacionais apurados nos Censos 2001, ou (ii) os mesmos quantitativos habitacionais, mas assumindo a hipótese de que todos pertencem a uma tipologia única por ele seleccionada. Esta última opção foi construída para permitir a aferição do Simulador para cenários históricos, possibilitando a escolha da tipologia mais vulnerável do parque de 2001 [Sousa, 2006].

Módulo das perdas humanas

Este módulo utiliza uma base de dados com os quantitativos populacionais apurados nos Censos 91 e 2001, para todas as freguesias de Portugal Continental e do Arquipélago dos Açores, descritos pelos factores de vulnerabilidade dos edifícios em que residem os indivíduos em risco.

Módulo das perdas económicas

São dados internos do Simulador os parâmetros necessários ao funcionamento das rotinas de avaliação de perdas económicas, nomeadamente a superfície média dos alojamentos e o seu valor de reposição para efeitos de monetização das perdas. A superfície média dos pavimentos dos alojamentos em risco foi recolhida com um nível de análise geográfica das NUTS II [INE, 2001]. Para valores de reposição tomaram-se os preços indicativos da construção estabelecidos pela Portaria nº 1062-C/2000 de 31 de Outubro que assume os valores de 461,4, 509,3 e 582,6 Euros/m² para o ano de 2001. Estes valores distintos correspondem a três zonas do País que agrupam determinados concelhos, de acordo com o referido no nº 2 do artigo 7º do Decreto-Lei nº13/86 de 23 de Janeiro. Os concelhos com o preço de construção mais elevado correspondem às sedes de distrito e a alguns concelhos das Áreas Metropolitanas de Lisboa e Porto.

4.1.3 Procedimentos

Módulo da acção sísmica no substrato rochoso

Este módulo contempla três opções de modelação:

1. Os modelos de atenuação de intensidade macrossísmica desenvolvidos por Sousa [1996] a partir da informação macrossísmica de sismos históricos severos e de sismos instrumentais que afectaram o Continente Português.

2. A caracterização espectral da acção sísmica, recorrendo a diversos modelos de atenuação empíricos, ou semi-empíricos. São quatro os modelos de atenuação incluídos no Simulador para avaliar a acção sísmica sob a forma espectral:
 - a) Os modelos semi-empíricos de atenuação espectrais propostos por Carvalho [2007], baseados numa modelação estocástica da acção sísmica (ver ponto 3 deste módulo da acção sísmica) e cujo domínio de aplicação se circunscreve, actualmente, ao Continente Português.
 - b) O modelo empírico de atenuação espectral, proposto por Bommer *et al.* [1998] e Bommer & Elnashai [1999], baseado em dados instrumentais Europeus de movimentos sísmicos intensos, considerados representativos dos processos de atenuação no nosso território, no caso de cenários sísmicos de ocorrência próximos e de magnitude baixa a moderada.
 - c) A actualização do modelo anterior apresentada num trabalho mais recente [Akkar & Bommer, 2007] que, tal como o anterior, prevê o espectro de resposta elástico em função da magnitude e da distância mais curta à falha.
 - d) A acção sísmica modelada em intensidades macrossísmicas [Sousa, 1996] convertidas posteriormente em espectros de resposta pela formulação proposta por Trifunac & Lee [1989]. Importa sublinhar que esta deverá ser a opção escolhida para modelar a acção de sismos afastados de magnitude elevada, que ocorrem no território Continental, uma vez que o modelo de Bommer *et al.* [1998] e Bommer & Elnashai [1999] não reproduz correctamente o movimento deste tipo de desastres naturais.
3. A terceira opção envolve a modelação estocástica da acção sísmica que tem em conta um modelo de falha finita que considera as características de uma fonte extensa (geometria, localização, inclinação) e a caracterização da propagação da energia no meio que atravessa, nomeadamente a atenuação geométrica, a atenuação inelástica e outros efeitos da propagação [Carvalho, 2007]. Esta opção apenas se encontra disponível para aplicação ao Continente Português, no entanto, tal como se descreve na secção 4.2, enquanto essa opção não for aplicável à região dos Açores, o Simulador pode utilizar resultados da modelação estocástica da acção sísmica obtidos por outros autores.

Note-se que a segunda e a terceira opções de modelação constituem as alternativas necessárias para o caso do utilizador pretender modelar o efeito dinâmico dos solos sobre a acção sísmica, ou seja, no caso de se pretender executar o módulo da acção sísmica à superfície descrito de seguida. Quando se escolhe uma destas duas opções de modelação os resultados do presente módulo englobam as estimativas dos espectros de potência de acelerações, dos espectros de resposta e dos valores de pico do movimento sísmico em deslocamento, velocidade e aceleração, obtidas ao nível do substrato rochoso de cada freguesia.

No entanto, refira-se que tanto o modelo de atenuação macrossísmico, como os modelos empíricos de atenuação espectral também simulam o efeito dos solos, embora de uma forma empírica e simplificada, caracterizando as condições geológicas locais em três classes dependentes da velocidade de propagação das ondas de corte.

Módulo da acção sísmica à superfície

Se o efeito dos solos for tomado em consideração, a unidade elementar de análise dos resultados deixa de ser a freguesia, passando a ser uma unidade geológico-geotécnica em que se subdividem algumas freguesias.

Neste módulo determina-se, para as unidades geológicas-geotécnicas, os espectros de potência e de resposta de aceleração à superfície. Para o efeito tem-se em consideração os espectros de potência no substrato rochoso e as características das formações superficiais que induzem alterações no movimento sísmico. Na realidade, para aligeirar o esforço computacional envolvido na modelação do comportamento não linear dos solos, e também dos edifícios, o Simulador, representa internamente o movimento sísmico por um processo estocástico estacionário equivalente. Detalhes sobre a modelação do efeito dos solos, sobre o processo iterativo de conversão de espectros de resposta numa função de densidade espectral de potência, e vice-versa, podem ser encontrados em Carvalho *et al.* [2002].

Outros resultados da execução deste módulo são os valores de pico do movimento sísmico, em deslocamento, velocidade e aceleração, à superfície.

Caso se pretenda utilizar modelos de danos estatísticos (ver módulo apresentado de seguida), os valores de pico do movimento deverão ser convertidos em intensidades macrossísmicas, estando implementados computacionalmente diversos modelos de conversão, nomeadamente os propostos por:

1. Gutenberg & Richter [1942], que converte a aceleração de pico (PGA) em intensidades macrossísmicas;
2. Newmark & Rosenblueth [1971], que converte velocidade de pico (PGV) em intensidades macrossísmicas;
3. Trifunac & Brady [1975] que converte a aceleração de pico (PGA) em intensidades macrossísmicas;
4. Wald *et al.* [1999] que converte velocidade e aceleração de pico (PGV e PGA, respectivamente) em intensidades macrossísmicas;
5. Atkinson & Kaka [2007], que converte velocidade de pico (PGV) em intensidades macrossísmicas.

Estas alternativas são internas ao Simulador não sendo disponibilizadas ao utilizador através de janelas de diálogo.

Quando a acção sísmica é avaliada directamente à superfície, nomeadamente pela utilização das intensidades macrossísmicas observadas num sismo, é omitida a modelação dinâmica do efeito dos solos. Na eventualidade de se pretender modelar os danos pela metodologia FEMA & NIBS é necessário, mais uma vez, converter as intensidades macrossísmicas em espectros de resposta [Trifunac & Lee, 1989] e fornecer a magnitude do cenário de ocorrência e a sua distância em relação ao local em análise.

Módulo dos danos no edificado

O módulo dos danos no edificado contempla duas vias de modelação, a primeira baseada em modelos estatísticos originários de levantamentos de danos de sismos Europeus e mundiais e a segunda baseada num modelo mecanicista [FEMA & NIBS, 1999]. Estão assim disponíveis cinco opções, identificadas no fluxograma da figura 20, para modelar os danos no edificado:

1. A opção Tiedemann [Tiedemann, 1992] que independentemente do modelo de danos escolhido, e devido à sua simplicidade, é sempre executada para estimar os danos no edificado. Esta opção tem como resultados a estimativa da razão de danos médios (*MDR*) por unidade geográfica e por tipologia, o valor esperado da razão de danos médios para a região analisada e os valores máximo e mínimo de *MDR* para a região analisada.
2. Ainda dentro dos modelos estatísticos de danos as opções Di Pasquale & Orsini [1997], Zuccaro & Papa [2002] e Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004] têm como resultados o número e percentagem de edifícios que se encontram nos estados de dano da escala macrossísmica EMS-98 (D0 a D5), por unidade geográfica e tipologia, e o número total de edifícios, por estado de dano, para a região analisada. No caso da opção Giovinazzi & Lagomarsino o estado de conservação dos edifícios recenseados em 2001 é um factor de vulnerabilidade adicional que também é considerado na simulação. Nesta opção é ainda possível optar por simulações em que se assume a hipótese de todo o parque habitacional se encontrar num estado de conservação Bom ou Mau, para se estudar o efeito deste factor de vulnerabilidade.
3. A opção de modelação mecanicista [FEMA & NIBS, 1999], que se baseia no método do espectro de capacidade, em que a previsão da resposta sísmica máxima dos edifícios é efectuada com base na intersecção da curva de capacidade do edifício com o espectro de resposta que caracteriza a acção sísmica no local. No Simulador foi implementado um procedimento estocástico iterativo [Carvalho *et al.*, 2002] em que são estimados sucessivos espectros de solicitação, de

amortecimento crescente, traduzindo os processos de degradação que ocorrem durante a resposta cíclica dinâmica da estrutura. Sobre os espectros de solicitação reduzidos determinam-se os pontos da resposta até se atingir a convergência com a curva de capacidade mediana, obtendo-se assim a resposta máxima da estrutura na eminência do colapso, sendo, neste caso, a estrutura idealizada por um oscilador com um grau de liberdade. O ponto de desempenho do edifício assim encontrado, tem como abcissa o deslocamento espectral máximo antes do colapso, sendo este o valor da acção sísmica que condiciona as curvas de fragilidade. Estas curvas de fragilidade são efectivamente distribuições de probabilidade condicionais que repartem um conjunto de edifícios pertencentes a uma dada tipologia construtiva por cinco estados de dano, conhecida a severidade da acção sísmica [Kircher et al., 1996]. Em estudos de risco sísmico é usual interpretar a probabilidade de dada tipologia se encontrar num determinado estado de dano como a percentagem de edifícios, dessa tipologia, que se encontra nesse estado de dano, quando sujeitos a um determinado nível da acção sísmica. Conhecidos os quantitativos dos elementos em risco na região em análise é possível estimar o número de edifícios, em cada estado de dano, condicionados pela severidade da acção sísmica especificada. Desta forma, a modelação mecanicista dos danos permite obter estimativas do número e percentagem de edifícios nos estados de dano Ausência de Dano, Dano Ligeiro, Moderado, Severo e Total, por unidade geográfica e tipologia. As estimativas dos resultados globais para a região em análise são também sintetizados numa tabela.

Módulo das perdas humanas

São contempladas três opções de modelação:

1. A opção Tiedemann [1990 e 1992] que é sempre executada para estimar as perdas humanas, tendo como resultados a taxa e o número de mortos por unidade geográfica e os totais contabilizados para a região analisada. A metodologia Tiedemann cinge-se ao estabelecimento de correlações entre vítimas mortais e a intensidade macrossísmica, para várias tipologias do edificado, parametrizadas pelo coeficiente sísmico no caso destas tipologias possuírem estrutura de betão armado [Sousa, 2006].
2. A opção Coburn & Spence que também é sempre executada independentemente do modelo de danos escolhido. A metodologia Coburn & Spence especifica uma série de factores inovadores que, na prática, se tem confirmado que afectam a mortalidade no caso de um sismo. Por exemplo, esta metodologia indica uma taxa de aprisionamento no colapso em função da intensidade do movimento do solo, do tipo de estrutura dos edifícios (betão armado ou alvenaria), da eficácia das operações de socorro, etc. Porém, a quantificação destes factores é empírica e os

resultados do modelo de perdas humanas revelaram-se bastante sensíveis aos valores que lhes são atribuídos [Sousa, 2006].

3. A opção FEMA & NIBS [1999] que apenas é executada se na modelação dos danos se optar pela via mecanicista. A metodologia fundamenta-se no princípio de que o número de pessoas afectadas e a gravidade dos seus ferimentos estão correlacionados com os danos no edificado (estruturais e não estruturais). No núcleo do módulo das perdas sociais directas da metodologia FEMA & NIBS são especificados os valores de defeito das taxas de perdas humanas em edifícios, de uma dada tipologia construtiva, que se encontram nos estados de dano, Dano Ligeiro, Moderado, Severo ou Total. O facto destas taxas serem explícitas na metodologia FEMA & NIBS, facilita a calibração deste modelo de perdas humanas.

Quando se escolhe uma das duas últimas opções o Simulador produz o mesmo tipo de resultados, estimando o número e as percentagens de vítimas classificadas em diversos níveis de gravidade de ferimentos. A opção FEMA & NIBS [1999] contempla 1+4 níveis de gravidade de ferimentos (Ausência de Ferimentos, Feridos Ligeiros, Feridos que exigem Cuidados Hospitalares, Feridos Graves e os Mortos) enquanto que a opção Coburn & Spence contempla 1+5 níveis de gravidade de ferimentos (Ausência de Ferimentos, Feridos Ligeiros, Feridos Moderados, Feridos Graves, Feridos em Estado Crítico e os Mortos). Estes resultados são obtidos por unidade geográfica e os totais são compilados para a região analisada.

Módulo das perdas económicas

São estimadas as perdas económicas directas, em consequência dos danos no edificado habitacional, medidas em termos da área habitável perdida para o cenário sísmico de ocorrência considerado.

Os resultados são fornecidos em termos absolutos e percentuais, em cada freguesia ou unidade geológica-geotécnica, e agregados para toda a região analisada. As perdas globais são convertidas em percentagem do PIB de 2001 para facilitar a percepção dos valores envolvidos.

Os modelos subjacentes a estas estimativas são condicionados pela escolha do modelo de danos no edificado (ver quadro 9 e figura 20). Nesse sentido, no caso dos modelos de danos estatísticos aplicou-se o modelo de perdas económicas utilizado pela Protecção Civil Italiana [Lucantoni *et al.*, 2002 e SSN, 1998], enquanto que para o modelo de danos mecanicista utilizou-se o modelo de perdas económicas FEMA & NIBS, embora com algumas simplificações ao nível dos dados utilizados (quadro 9 e figura 20).

Quadro 9 – Relação entre os estados/graus de dano e as percentagens de valores de reposição ou factores de dano.

Estados de dano estrutural	Factor de dano [%] FEMA & NIBS [1999]	Graus de dano (escalas MSK e EM-98)	Factor de dano [%] [SSN, 1998]
Dano Ligeiro	2	1	1
Dano Moderado	10	2	10
Dano Severo	50	3	35
Dano Total	100	4	75
		5	100

Na prática, a tradução dos estados e graus de dano em percentagens de valores de reposição, conduz à obtenção de um índice de perdas que não é mais do que um valor médio das perdas, condicionado por um nível de perigosidade sísmica, $E(L | h)$, obtido pela ponderação, através da grandeza factor de dano DF_d , dos quantitativos de edifícios que se encontram num dado estado de dano d e que pertencem a uma determinada classe de vulnerabilidade v , conforme a seguir se equaciona [Sousa 2006 e 2007]:

$$E(L | h) = Ne_T \cdot \sum_d \sum_v A_v \cdot DF_d \cdot P_D(D=d | h) \cdot P_V(V=v) \quad (2)$$

em que,

Ne_T é o número total de edifícios na região em análise;

A_v representa a superfície média dos edifícios pertencentes à tipologia de vulnerabilidade v na região em análise;

$P_D(D=d | h)$ representa a matriz de probabilidade de dano, interpretada como a percentagem de edifícios que pertencem a uma determinada tipologia construtiva de vulnerabilidade $V=v$ que se encontra no estado de dano d , quando sujeitos a uma acção sísmica de severidade h ;

$P_V(V=v)$ é a probabilidade dos edifícios da região em análise pertencerem à tipologia com vulnerabilidade $V=v$, assumida igual à frequência dessa tipologia na região.

DF_d é o *factor de dano* atrás referido sendo uma grandeza adimensional definida como a razão entre o custo de reparação de um edifício, num determinado estado de dano, e o valor global de reposição do edifício [ATC, 1985].

A introdução na expressão 2 da superfície média dos edifícios pertencentes à tipologia construtiva de vulnerabilidade v resulta na avaliação da exposição E em termos da área total habitada da região em análise [Sousa 2006 e 2007]:

$$E = Ne_T \times \sum_v A_v \quad (3)$$

Neste caso, as perdas económicas esperadas são avaliadas através da área perdida equivalente, condicionada por um dado nível de perigosidade sísmica. Se forem introduzidos preços indicativos para a construção (ver módulo das perdas económicas na secção 4.1.2), então a exposição E passa a ser avaliada, monetariamente, em termos do *valor de reposição do parque habitacional* da região em análise, *VRPH*.

Sistema de Informação Geográfico

Ao nível do SIG o Simulador compreende três rotinas em *Avenue* que operam sobre os dados, sobre o programa (DLL) e sobre os resultados, e que permitem tirar partido de algumas potencialidades de manuseamento de informação espacial do *ArcView*, nomeadamente as suas capacidades de produção de mapas:

1. A primeira permite ao utilizador introduzir os dados e especificar as opções necessárias à operação do Simulador. Viabiliza-se deste modo uma interacção simples entre o Simulador e o utilizador, em que este transmite ao sistema, através de caixas de diálogo sequenciais, os dados que pretende utilizar e as opções de modelação adoptadas. O SIG encontra-se protegido contra a escolha de alternativas muito demoradas, que deverão ser reconfirmadas, ou contra opções incompatíveis. São exemplo de opções incompatíveis a modelação do efeito dos solos e a escolha da acção sísmica definida por intensidades macrossísmicas observadas à superfície; nesse caso o sistema emite uma mensagem de alerta permitindo ao utilizador interromper a simulação, ou escolher outras alternativas.
2. A segunda, evocada automaticamente pela primeira, tem a finalidade de integrar a aplicação externa (DLL) no ambiente do SIG e de a executar.
3. A terceira tem por objectivo automatizar a síntese dos resultados e a produção de mapas. Sobre os resultados da execução da DLL esta rotina constrói automaticamente seis *vistas* no projecto de *ArcView*, uma por cada módulo do Simulador, com excepção do módulo de danos no edificado. Para este módulo são geradas duas *vistas*, uma relativa aos danos absolutos e outra relativa aos danos percentuais. Em cada uma destas *vistas* são construídos vários *temas*; a cada *tema* corresponde a produção automática de um mapa, gerando-se um máximo de 24 mapas por cada execução do Simulador de Cenários Sísmicos, dependendo das opções seleccionadas.

Estas rotinas são disponibilizadas ao utilizador por intermédio de dois *botões* adicionados à interface do *ArcView GIS*:

1. O botão *SCS*  que executa sequencialmente as três rotinas mencionadas.
2. O botão *MAPAS*  que executa a terceira rotina sobre resultados da DLL já existentes no sistema.

4.2 Actualização do Simulador de Cenários Sísmicos

No âmbito do projecto USuET, o Simulador tem vindo a ser actualizado continuamente em termos de (i) dados, (ii) âmbito geográfico, (iii) rotinas internas do SIG, (iv) algoritmos de modelação, (v) aferição dos resultados e (vi) ambiente de operação. Em resumo, as actualizações efectuadas consistiram em:

- i. a) Adicionar bases de dados apuradas nos Censos 2001 com informação sobre a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional do Arquipélago dos Açores bem como dos seus ocupantes, sendo as freguesias deste território as unidades elementares de análise. A análise estatística do inventário destes elementos em risco, bem como da sua distribuição geográfica, foi atrás descrita no capítulo 3.
b) Adicionar uma base de dados de intensidades macrossísmicas contendo a acção sísmica relativa a alguns sismos importantes que afectaram o Arquipélago dos Açores, discriminada também pelas freguesias desse território.
- ii. e iii Generalizar a aplicação do Simulador a qualquer região específica do Arquipélago dos Açores, tendo-se estabelecido um procedimento expedito para predefinir uma região para análise. Este procedimento envolveu a actualização das rotinas de *FORTRAN 90* e a utilização das capacidades de produção de mapas do *ArcView GIS*. Relativamente ao território Continental o Simulador compreendia 7 regiões predefinidas onde era possível simular automaticamente cenários sísmicos de ocorrência e de perdas. No âmbito do projecto USuET, foram adicionadas ao Simulador sete regiões predefinidas e que concernem o Arquipélago dos Açores: a) a ilha do Faial, b) a ilha do Pico, c) a ilha Terceira, d) o grupo Ocidental, e) o grupo Central f) o grupo Oriental e g) o Arquipélago globalmente. A individualização de algumas regiões deste Arquipélago decorre do processo de aferição do Simulador, tendo sido efectuada para operacionalizar a comparação a seguir apresentada entre um cenários sísmico simulado e um cenário real.
- iv. Adicionar ao Simulador um novo modelo empírico de atenuação da acção sísmica que prevê o espectro de resposta elástico em função da magnitude e da distância mais curta a uma fonte falha [Akkar & Bommer, 2007]. Neste contexto, foi incluído no Simulador uma rotina que calcula a distância mais curta entre o ponto em análise e a falha. Com efeito, até à data, a distância contemplada no Simulador para os modelos de atenuação empíricos era a distância epicentral ou hipocentral,

o que, efectivamente, constituía uma aproximação que se poderia tornar grosseira no caso de sismos próximos. Paralelamente, o Simulador foi actualizado de forma a poder utilizar os resultados das simulações estocásticas do movimento sísmico executadas pelo programa EXSIM [Zonno *et al.*, 2008]. Este programa recorre ao modelo de falha finita para simular um espectro de resposta elástico em aceleração, com um amortecimento de 5%, na local em análise. Incluiu-se também no Simulador dois modelos adicionais para a conversão de valores de pico do movimento do terreno (PGV e PGA) em intensidades macrossísmicas [Wald *et al.*, 1999 e Atkinson & Kaka, 2007].

- v. Comparar os cenários sísmicos modelados no Simulador com os quantitativos de danos e perdas resultantes de sismos que no passado afectaram o território Açoriano. Neste processo de comparação deu-se maior ênfase ao sismo de 9 de Julho de 1998, pois este é o evento mais bem estudado neste Arquipélago em termos de levantamentos de danos e perdas. Desta forma, pretende identificar-se quais os modelos que melhor reproduzem este cenário de forma a validar a sua aplicação ao Arquipélago dos Açores.
- vi. Disponibilizar o Simulador através da *Internet*, com um carácter autónomo, ou seja, que não necessite de alguma plataforma de informação geográfica, tendo no entanto as capacidades de um SIG no que respeita ao mapeamento e à síntese gráfica e tabular dos efeitos de um cenário sísmico.

5 Simulador de Cenários Sísmicos na Web

5.1 Enquadramento

A adaptação do Simulador de Cenários Sísmicos (LNECloss) a um ambiente WebSIG, tem por objectivo principal proporcionar a potenciais utilizadores (Serviços de Protecção Civil, autarquias, entre outros) uma aplicação, *on-line*, que simule os efeitos de um cenário sísmico que ocorra em qualquer freguesia de Portugal Continental e do Arquipélago dos Açores. Pretende-se que esta aplicação seja de fácil utilização e que possua um carácter autónomo, isto é, que o utilizador não necessite dispor de um sistema de informação geográfico para a sua utilização, tendo, no entanto, algumas das capacidades de um SIG (WebSIG) no que respeita às várias ferramentas de visualização e análise espacial dos resultados.

Neste contexto, o Simulador de Cenários Sísmicos na Web deverá permitir a visualização e mapeamento dos resultados da modelação dos cenários sísmicos numa região, e o utilizador apenas necessitará de fornecer as características do cenário sísmico de ocorrência e as opções de modelação dos seus efeitos. Deste modo, as entidades interessadas, através de um acesso rápido, poderão consultar este tipo de informação utilizando operações genéricas de interacção e visualização, sem incorrerem nos custos inerentes à utilização de uma plataforma de ambiente SIG.

Neste capítulo pretende-se fundamentalmente descrever os diversos procedimentos, que foram levados a cabo para a implementação do serviço de visualização do Simulador de Cenários Sísmicos (LNECloss) na Web.

5.2 Arquitectura do Simulador LNECloss em ambiente WebSIG

A aplicação, LNECloss em ambiente WebSIG foi concebida e desenvolvida, sobre uma plataforma *Linux (Red Hat Enterprise v. 5.0)*, com recurso à linguagem de programação, *Java*. A opção por esta plataforma deveu-se ao facto de o *Linux* ser um sistema operativo estável, e por se terem reunido as melhores condições para a sua concretização. No que diz respeito à linguagem de programação, a opção de utilização da tecnologia *Java* tem a vantagem de ser uma linguagem independente do sistema operativo e portanto permitir a portabilidade da aplicação, nomeadamente a sua transposição entre diferentes sistemas operativos. A utilização desta tecnologia possui um grande interesse pelos imensos mecanismos que possui ao nível da implementação de um aplicação na Web, como por exemplo, a autenticação de utilizadores, o acesso a bases de dados, entre outros.

A disponibilização de ferramentas SIG através da Internet possui uma arquitectura muito própria. A arquitectura global da aplicação LNECloss na Web, obedece, de um

modo geral, ao modelo de arquitectura baseado em Cliente/Servidor, *three-tier*, tendo-se adoptado, para implementação do ambiente WebSIG, pela componente baseada num Servidor Web (*Server-Side*).

Este tipo de componente permite que os Clientes (utilizadores) elaborem os seus pedidos de análise ou de dados a um Servidor Web. O mesmo Servidor processa o pedido de informação e devolve os resultados para o Cliente, que os visualizará num motor de busca (*browser*) Web.

Como já referido anteriormente, implementou-se a arquitectura *three-tier* (3 camadas), na adaptação do Simulador de Cenários Sísmicos a um ambiente WebSIG. Este tipo de arquitectura é constituído por três componentes principais: *Cliente*, *Servidor Lógico* (Servidor Web e Servidor de aplicações SIG) e *Servidor de Gestão de Dados*. A sequência das componentes SIG em Web é ilustrada na figura 21, sendo as mesmas descritas posteriormente em maior detalhe.

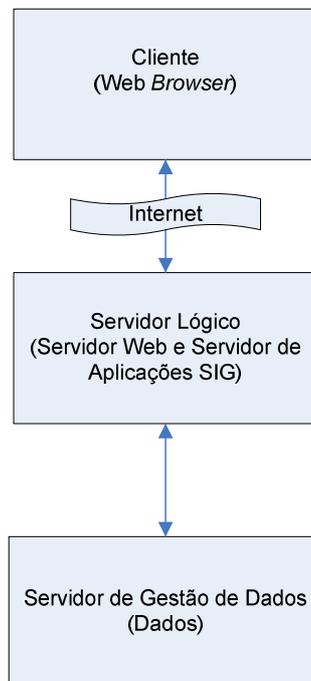


Figura 21 – Arquitectura três camadas (*three-tier*) aplicada aos SIG na Web [Afonso, 2007].

Em relação à primeira componente, esta funciona como uma interface para os diversos utilizadores, possibilitando a sua interacção com um conjunto de dados geográficos e permitindo a comunicação com o Servidor Web de modo a ilustrar os resultados das operações efectuadas. A segunda componente abrange o Servidor Web e o Servidor de Aplicações SIG. A principal função do Servidor Web é estabelecer uma comunicação com o utilizador (componente *Cliente*), ou seja uma relação do tipo pedido e resposta, em que são processados os pedidos efectuados pelo mesmo. Um Servidor de Aplicações

SIG consiste fundamentalmente num programa que se conecta com o Servidor Web e com o Servidor de mapas, ou seja, comporta-se como um tradutor entre o Servidor Web e o Servidor de mapas. A terceira e última componente, ou seja, o *Servidor de Gestão de Dados*, permite disponibilizar informação (essencialmente alfanumérica) de forma a gerir os acessos e permitir receber, processar e devolver os pedidos do *Servidor Lógico*.

De seguida descrevem-se as mesmas componentes, deste tipo de estrutura, para o caso concreto da implementação do Simulador LNECloss em ambiente WebSIG.

Em relação à componente Cliente, foram criadas diversas interfaces que têm por objectivo a introdução das características do cenário de ocorrência e as opções de modelação dos seus efeitos, que são necessários à execução do Simulador e que condicionam a posterior visualização dos resultados dessa execução. As mesmas são estruturadas a partir de um conjunto de menus e formulários adaptados a cada um dos módulos do Simulador e disponibilizadas através de um conjunto de hiperligações com diferentes funcionalidades. As interfaces foram implementadas utilizando as tecnologias HTML (*Hyper Text Markup Language*), JSP (*Java Server Pages*) e rotinas em *Javascript*.

No que diz respeito à componente do Servidor Lógico, recorreu-se a um Servidor Web, o Apache Tomcat (desenvolvido sob o *Jakarta Project* na *Apache Software Foundation*), que é um Servidor de código aberto que utiliza tecnologia *Java*. No que toca ao Servidor de Informação Geográfica para a Web, recorreu-se à tecnologia ArcIMS (desenvolvida e comercializada pela ESRI), que constitui uma plataforma de serviço de mapas que interpreta dados geográficos, permitindo a sua disponibilização na Internet.

Finalmente, no que diz respeito à componente de Servidor de Gestão de Dados, em alternativa a um Sistema de Gestão de Base de Dados, optou-se por um Sistema de Gestão de Ficheiros (SGF). A ligação entre o SGF e o Servidor é efectuada a partir de um protocolo JDBC⁷ que permite consultas SQL e outro tipo de operações, tendo-se desta forma criado uma “base de dados” de ficheiros de texto.

A razão pela qual se optou por um SGF em detrimento de um SGBD, decorre de, no caso concreto do presente problema, os dados alfanuméricos não serem conhecidos à priori, resultando os mesmos da execução do Simulador após o Cliente ter efectuado um pedido ao Servidor Web. Dado que não existe a necessidade dos dados gerados serem armazenados num SGBD, manteve-se um SGF, em que o Servidor efectua operações

⁷ *Java Database Connectivity* ou JDBC é um conjunto de classes e interfaces escritas em *Java* que efectua o envio de instruções SQL para uma determinada base de dados relacional.

sobre as tabelas e reencaminha o resultado para o Servidor de Aplicações SIG, que disponibilizará os mapas respectivos.

Em resumo a arquitectura da aplicação está organizada da seguinte forma:

O Cliente, através de um *browser* Web, acede à aplicação e a diversas interfaces (JSP e HTML) que correspondem aos serviços de apresentação. Desta forma é efectuado um pedido ao Servidor. Integrados na camada de serviços de aplicações existem o Servidor de aplicações Web e SIG. O Servidor Web (Apache Tomcat) recebe o pedido do Cliente, executa as rotinas do Simulador (implementadas em FORTRAN 90), efectua as manipulações sobre os resultados obtidos e encaminha esse pedido ao Servidor de Aplicações SIG (ArcIMS – Servidor de mapas da ESRI). O mesmo interpreta o pedido, solicita o conjunto de dados geográficos necessários e gera um mapa como resposta. O Servidor Web acede ao mapa gerado e devolve-o como resposta ao Cliente.

Na figura 22 exemplifica-se uma das possíveis interfaces que permitem a comunicação entre o utilizador e o Servidor Web.

REGIÃO A ANALISAR E MODELAÇÃO DA ACÇÃO SÍSMICA

REGIÃO EM ANÁLISE

SELECIONAR:

CONCELHO DA HORTA

MODELO DE ACÇÃO SÍSMICA

SELECIONAR:

BOOMER ET AL., 1998

CONSIDERAR SOLOS?

NÃO

CONTINUAR CANCELAR

Figura 22 – Interface de opções de modelação (região e acção sísmica) [Afonso, 2007].

6 Avaliação do impacto de sismos no Arquipélago dos Açores

6.1 Acção sísmica para o cenário de 9 de Julho de 1998

Para avaliar o impacto de sismos no Arquipélago dos Açores simulou-se a acção de um evento semelhante ao ocorrido no dia 9 de Julho de 1998 e que afectou, maioritariamente, as ilhas do Faial e do Pico pertencentes ao Grupo Central deste Arquipélago.

Considerou-se que o epicentro deste cenário se localizou num ponto de coordenadas 38.64°N e 28.59°W, de acordo com a proposta de Madeira *et al.* [1998].

A acção sísmica nas ilhas afectadas foi avaliada por duas vias:

1. A primeira envolveu a simulação estocástica do movimento sísmico realizada por Zonno *et al.* [2008] usando o modelo de falha finita executado pelo programa EXSIM. Com este programa Zonno *et al.* [2008] simularam um espectro de resposta elástico em aceleração, com um amortecimento de 5%, para as freguesias das ilhas do Faial e Pico. O espectro seleccionado foi aquele que correspondeu à série temporal que possui o maior valor de PGA em cada freguesia, entre 30 séries simuladas pelo programa EXSIM para o cenário atrás mencionado. Esta simulação estocástica baseou-se no pressuposto de que o sismo de 1998 teria ocorrido numa falha com as seguintes características geométricas [Zonno *et al.*, 2008]: orientação = 165°, inclinação = 85°, profundidade do topo = 1.1km, comprimento = 16.5 km e largura = 9.4 km.

2. A segunda via envolveu a utilização de leis de atenuação empíricas que prevêm um espectro de resposta elástico em função da magnitude e da distância mais curta à falha [Bommer *et al.*, 1998 e Akkar & Bommer, 2007]. A geometria da falha do sismo de 1998 preconizada por Zonno *et al.* [2008] foi também aplicada neste caso para se estimar a distância mais curta entre o local analisado e a falha.

Em suma, recorrendo a um modelo estocástico e a dois modelos empíricos foram utilizadas três formas possíveis de caracterizar a acção sísmica, sob a forma espectral, nas freguesias das ilhas do Faial e Pico.

Na figura 23 apresenta-se o mapa de isossistas observadas no sismo de 1998 na ilha do Faial, traçadas por Ferreira [2008] e as simulações da acção sísmica efectuadas para este cenário. Note-se que, para efeitos comparativos, os valores de pico do movimento (PGA e PGV) foram convertidos, recorrendo-se a modelos empíricos, na grandeza intensidade macrossísmica. No caso da simulação que recorreu à modelação estocástica da acção sísmica os valores de pico de aceleração (PGA), em cada freguesia, foram convertidos em IMM recorrendo ao modelo de Wald *et al.*, [1999]; no caso da modelação empírica da atenuação recorreu-se aos máximos da velocidade do terreno (PGV), para cada

freguesia, avaliados a partir da representação, interna ao Simulador, do movimento sísmico por um processo estocástico estacionário (ver secção 4.1.3). Estes valores de PGV foram convertidos em IMM utilizando-se o modelo de Atkinson & Kaka [2007].

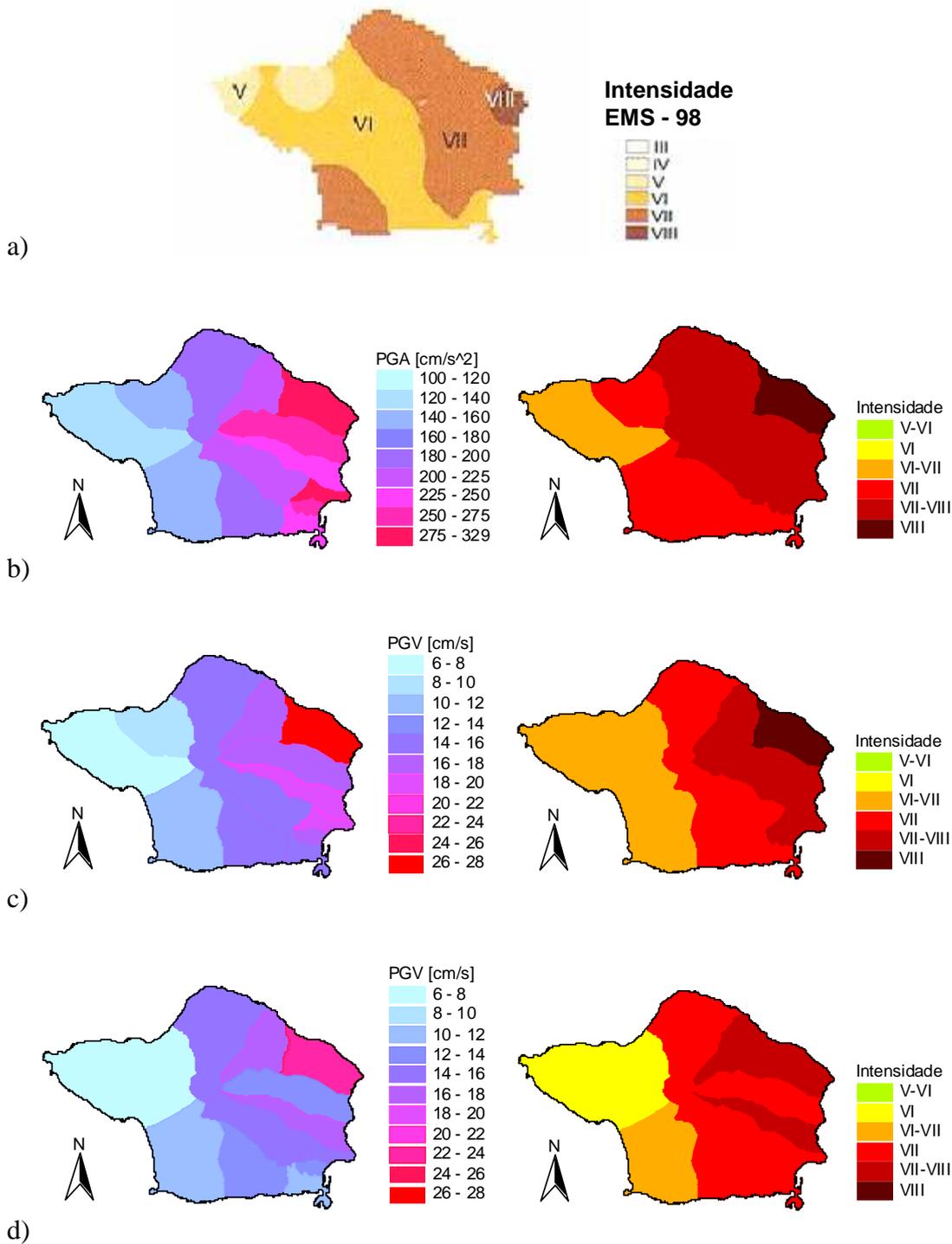


Figura 23 – a) Isossistas do sismo de 1998 na ilha do Faial [Ferreira, 2008]; simulação da acção sísmica de acordo com b) o programa EXSIM [Zonno et al., 2008], c) Boomer et al. [1998] e d) Akkar & Bommer [2007].

Note-se que as intensidades macrossísmicas que resultaram das simulações são representadas com a desagregação geográfica da freguesia, enquanto que as

intensidades observadas são representadas por isossistas. Tal facto pode justificar a diferença revelada entre o padrão das simulações e o das intensidades observadas, existindo, no entanto, uma concordância razoável entre os valores previstos e os observados, exceptuando-se as intensidades mais baixas observadas na parte Ocidental da ilha, em que a diferença entre as simulações e as observações chega a ser superior a I grau de intensidade macrossísmica. Contudo, o processo de conversão das grandezas instrumentais do movimento (PGV e PGA) em intensidades macrossísmicas vem sempre afectado de grande incerteza e os modelos foram escolhidos para que as intensidades simuladas se aproximassem o mais possível das observadas.

6.2 Danos e perdas observadas no sismo de 9 de Julho de 1998

Nesta secção reúnem-se os valores dos danos e perdas observadas no sismo de 9 de Julho de 1998, obtidos por outros autores, e que são utilizados neste trabalho para aferir os resultados do Simulador.

Ferreira [2008] procedeu a um levantamento dos danos verificados no sismo de 1998, tendo por base as fotografias de edifícios constantes dos «Autos de Vistoria» realizados no terreno após o sismo de 1998 e a informação sobre danos e custos constante de bases de dados construídas nos anos que se seguiram ao sismo. Com base nestes elementos a autora classificou 2 030 edifícios da ilha do Faial e 885 edifícios da ilha do Pico, nos graus de dano da escala de intensidades macrossísmica EMS-98.

No âmbito do projecto USuET, a equipa do IST/ICIST disponibilizou ao LNEC o levantamento de danos de Ferreira [2008], com a desagregação geográfica da freguesia, para serem utilizados no presente trabalho e que se resumem no quadro 10.

Quadro 10 – Levantamento de danos de Ferreira [2008] para as ilhas do Faial e Pico.

Grau de dano SEM-98	Nº de edifícios no Faial	Nº de edifícios no Pico
D0	235	302
D1	411	210
D2	520	157
D3	415	130
D4	360	79
D5	89	7
Total	2030	885

No levantamento de Ferreira [2008] os edifícios foram também classificados em tipologias adequadas aos sistemas construtivos mais correntes da região e que se especificam no quadro 11.

Quadro 11 – Sistemas construtivos correntes nas ilhas do Faial e Pico [Neves et al., 2007].

Sistema Construtivo	Elementos resistentes verticais	Pavimento	Estrutura da Cobertura
CT – Construção Tradicional	Alvenaria de pedra	Madeira	Madeira
CTA – Construção Tradicional Alterada	Alvenaria de pedra	Parte da construção é em laje de BA (cozinha e/ou casa de banho)	Madeira
CM1 – Construção Mista 1	Alvenaria de pedra	Laje de betão armado	Madeira
CM2 – Construção Mista 2 (CT+CC)	Alvenaria de Pedra + Pilares e vigas de betão armado	Madeira e laje de betão armado na ampliação	Madeira
CM3 – Construção Mista 3	Pilares e vigas de betão armado	Laje de betão armado	Madeira ou betão armado
CC – Construção Corrente	Resistente em betão armado	Laje de betão armado	Betão armado ou Madeira

No quadro 12 apresenta-se o número de vítimas mortais que ocorreram no Arquipélago dos Açores em consequência do sismo de 9 de Julho de 1998.

Quadro 12 – Número de mortos por freguesia (ilha do Faial) no sismo de 1998 [Gonçalves, 2008].

Freguesia	Nº de vítimas mortais
Ribeirinha	5
Pedro Miguel	2
Salão	1

Finalmente, apresenta-se alguma informação de extrema utilidade para a calibração do módulo de perdas económicas do Simulador. Assim, Oliveira & Ferreira [1998] estimaram os custos globais directos do sismo em cerca de 300 M€, especificando que 160 M€ reportam às perdas no parque habitacional da ilha do Faial e 60 M€ referem-se

às perdas ocorridas no parque habitacional da ilha do Pico. Os mesmos autores apresentam um valor de 538 € para os custos médios, por m², da reconstrução.

6.3 Reavaliação do inventário considerando o sismo de 9 de Julho de 1998

Nas ilhas do Faial e Pico o IV Recenseamento Geral da Habitação realizado pelo Instituto Nacional de Estatística em 2001 [INE, 2002] não teve em consideração os edifícios que ficaram inabitáveis em consequência dos danos ocorridos no sismo de 9 de Julho de 1998.

Naturalmente, se a avaliação das perdas e danos fosse aplicada directamente ao parque habitacional recenseado nos Censos 2001 seria irrealista esperar que se conseguisse reproduzir os danos mais severos ocorridos no sismo de 1998, uma vez que os edifícios que foram mais severamente danificados neste evento não se encontravam contabilizados entre os elementos expostos.

Desta forma, foi simulado um novo inventário para as ilhas do Pico e do Faial [Sousa & Afonso, 2008 e Sousa *et al.*, 2008] que resultou de se adicionar aos apuramentos efectuados a partir dos Censos 2001 os edifícios considerados não habitáveis em consequência dos efeitos do sismo de 1998.

A partir da informação disponibilizada por Ferreira [2008] foram considerados inabitáveis todos os edifícios classificados nos graus de dano D4 e D5 da EMS-98, bem como 30% dos edifícios classificados no grau de dano D3 (ver quadro 13).

Quadro 13 – Número de edifícios considerados inabitáveis em consequência do sismo de 1998, com base no levantamento de Ferreira [2008].

Grau de dano EMS-98	Nº de edifícios no Faial	Nº de edifícios no Pico
30% D3	125	39
D4	359	79
D5	90	7
Total edif. inabitáveis	574	125

Assim, o inventário de edifícios apurados nos Censos 2001 foi actualizado da seguinte forma:

1. O número de edifícios considerados não habitáveis foi adicionado aos quantitativos de edifícios existentes em tipologias semelhantes dos apuramentos efectuados nos Censos 2001;

2. Paralelamente, foi subtraído esse número de edifícios àqueles que se localizavam nas mesmas freguesias e que se encontravam classificados em:

- a) tipologias mais recentes, com estrutura de BA ou ACP e com data de construção entre 1995 e 2001;
- b) tipologia Outros, que se verificou ter um grande acréscimo em termos de número de edifícios na época 1995-2001 (ver quadro 8), pois foi nesta tipologia que se classificaram as habitações temporárias onde residiram, por um largo período de tempo, os indivíduos que ficaram desalojados em consequência do sismo de 1998.

Procedimento idêntico foi adoptado para o número de habitantes efectuando-se, por um lado, acréscimos de indivíduos entre os residentes em tipologias idênticas às dos edifícios inabitáveis e, por outro, decréscimos de indivíduos entre os residentes em tipologias com estrutura de BA e ACP, das épocas mais recentes, e circunscrevendo estas variações às freguesias de origem dos edifícios inabitáveis.

6.4 Caracterização da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional

Para realçar a correlação entre as estimativas de danos e as tipologias de edifícios agruparam-se as 315 tipologias designadas de Censos 2001 em 7 classes tipológicas caracterizadas pela época de construção e tipo de estrutura construtiva: (i) Edifícios de Adobe + alvenaria de pedra solta + Outros, (ii) Edifícios com estrutura de alvenaria construídos antes de 1960, (iii) Edifícios com estrutura de alvenaria construídos entre 1961 e 1985, (iv) Edifícios com estrutura de alvenaria construídos ente 1986 e 2001, (v) Edifícios com estrutura de Betão armado construídos antes de 1960, (vi) Edifícios com estrutura de Betão armado construídos entre 1961 e 1985 e (vii) Edifícios com estrutura de Betão armado construídos entre 1986 e 2001. Cada uma das classes tipológicas identificadas foi subdividida posteriormente em 7 classes correspondentes ao número de pisos, contabilizando-se um total de 49 tipologias.

Para se caracterizar a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional dos Açores de acordo com os procedimentos do modelo de danos FEMA & NIBS [1999] é necessário especificar, para cada uma das 49 tipologias identificadas, uma curva de capacidade e 4 curvas de fragilidade (uma por cada estado de dano). Para o efeito, utilizaram-se as curvas de capacidade e fragilidade especificadas no projecto LESSLOSS [2007].

No quadro 14 apresenta-se a relação entre as tipologias Censos 2001 e os sistemas construtivos correntes nos quais se enquadraram os edifícios classificados no levantamento de danos de Ferreira [2008].

Quadro 14 – Relação entre as tipologias Censos 2001 e os sistemas construtivos correntes.

Tipologias Censos 2001		Tipologias usadas no levantamento Ferreira [2008]	
Tipo de estrutura	Data de construção	Sistemas construtivos correntes	Data de construção
ATAPS	<1919	CT	Até1919
ASP	1919-45	CTA	1919-45
ACP	1945-60	CM1	1946-60
ACP	1961-70	CM2	1961-70
Betão	1971-80	CM3	1971-80
Betão	>1981	CC	1991-95

6.5 Danos e perdas simulados para o cenário sísmico de 9 de Julho de 1998

Nos quadros 15 e 16 reúnem-se os resultados das simulações dos danos e perdas obtidas para as ilhas do Faial e Pico para um cenário de acção sísmica semelhante à do evento de 9 de Julho de 1998. Utilizaram-se os três modelos apresentados na secção 6.1 para simular as acções sísmicas deste cenário.

Para se comparar os resultados das simulações com os levantamentos de danos de Ferreira [2008] é necessário ter em consideração as diferenças entre os indicadores de dano utilizados e tentar estabelecer uma possível correspondência entre eles. Por exemplo, os graus de dano da escala EM-98 utilizada pelos modelos de dano estatísticos contemplam danos não estruturais (grau 1), ao contrário da aplicação efectuada com o método mecanicista FEMA & NIBS que apenas teve em consideração os danos estruturais. Assim, fez-se corresponder o estado Ausência de Dano desta metodologia aos graus de dano 0 e 1 da escala de intensidades macrossísmicas. Acresce que a restante correspondência de graus de dano não é directa, pois a metodologia FEMA & NIBS utiliza 4+1 estados de dano, enquanto que as metodologias estatísticas fazem referência a 5+1 graus de dano.

Quadro 15 – Número de edifícios no estado de dano Dano Total, número de vítimas mortais e perdas económicas no parque habitacional da ilha do Faial.

Modelação da acção sísmica	EXSIM Açores	Bommer <i>et al.</i> [1998]	Akkar & Bommer [2007]
Nº de Edifícios estado de dano D. Total	131	314	144
Mortos [#] Coburn & Spence, [2002]	17	37	14
Mortos [#] FEMA & NIBS [1999]	3	8	4
Área edificada habitacional perdida [m ²]	114432 (11,8%)	195608 (20,1%)	120886 (12,4%)
Perda económica [€× 10 ⁶]	61,6	105,2	65,1

Quadro 16 – Número de edifícios no estado de dano Dano Total, número de vítimas mortais e perdas económicas no parque habitacional da ilha do Pico.

Modelação da acção sísmica	EXSIM Açores	Bommer <i>et al.</i> [1998]	Akkar & Bommer [2007]
Nº de Edifícios estado de dano D. Total	20	61	22
Mortos [#] Coburn & Spence, [2002]	0	1	0
Mortos [#] FEMA & NIBS [1999]	0	1	0
Área edificada habitacional perdida [m ²]	37756 (2,6%)	76214 (5,2%)	41480 (2,9%)
Perda económica [€× 10 ⁶]	20,3	41,0	22,3

No quadro 17 apresenta-se a correspondência preconizada por Sousa [2006] entre os estados de dano da metodologia FEMA & NIBS e os graus de dano da escala EMS-98.

Ressalve-se a existência de alguma subjectividade nesta correspondência e a possibilidade de existirem outras soluções.

Quadro 17 – Correspondência entre os indicadores de dano do método mecanicista e dos métodos estatísticos.

Estados de dano. FEMA & NIBS	Graus de dano da escala EM-98
Ausência de Dano	Grau 0 – ausência de dano
	Grau 1 – dano desprezível ou ligeiro (ausência de danos estruturais, danos não estruturais ligeiros)
Dano Ligeiro	Grau 2 – dano médio (danos estruturais ligeiros, danos não estruturais médios)
Dano Moderado + Severo	Grau 3 – dano substancial ou grave (danos estruturais médios, danos não estruturais graves)
Dano Total	Grau 4 – dano muito grave (danos estruturais graves, danos não estruturais muito graves) + Grau 5 – destruição (danos estruturais muito severos)

Tendo em conta a correspondência entre os graus de dano apresentada, pode agora comparar-se os resultados das simulações resumidos nos quadros 15 e 16 com os levantamentos de danos de Ferreira [2008], reunidos no quadro 10. Desta comparação conclui-se que, tanto na ilha do Faial como na ilha do Pico, os quantitativos de danos são subavaliados para as três simulações de acção sísmica utilizadas, sendo o modelo de Bommer *et al.* [1998] aquele que mais e aproxima das observações.

Adianta-se como possível explicação para esta subavaliação dos danos o facto de não se ter tido em conta o efeito dinâmico dos solos para avaliar o movimento sísmico à superfície. Note-se que esta subavaliação de danos não seria de esperar, uma vez que se verificou uma sobreavaliação das intensidades macrossísmicas simuladas relativamente às observadas (figura 23). Ressalve-se porém a grande incerteza existente na conversão de grandezas instrumentais em grandezas macrossísmicas e vice-versa.

Na figura 24 apresenta-se a distribuição dos edifícios que se encontram no estado de dano Dano Total pelas freguesias da ilha do Faial tendo por base as simulações da acção

atrás mencionadas. Verifica-se que a distribuição geográfica dos danos na ilha do Faial (figura 24) é consentânea com o mapa de isossistas apresentado na figura 23a.

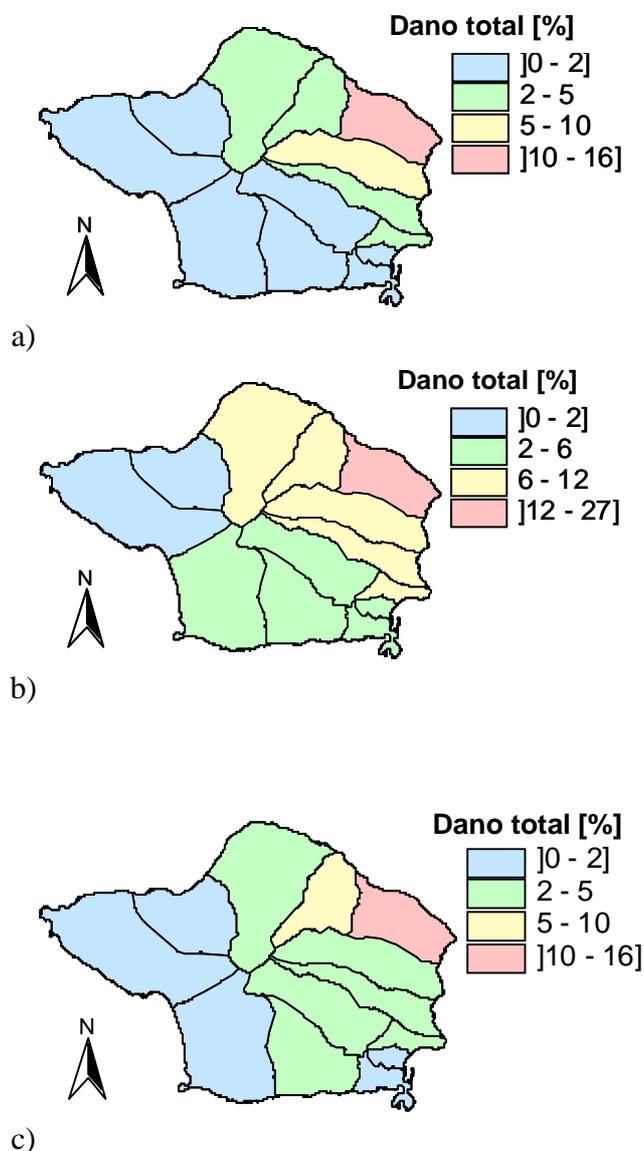


Figura 24 – Distribuição geográfica dos edifícios no estado de dano Dano Total na ilha do Faial em consequência do cenário sísmico de 1998; a) simulação estocástica do movimento sísmico pelo programa EXSIM [Zonno et al., 2008]; b) modelação da acção sísmica segundo Bommer et al. [1998]; c) modelação da acção sísmica segundo Akkar & Bommer [2007].

Relativamente ao número total de vítimas mortais verifica-se que o modelo de avaliação de perdas humanas FEMA & NIBS apresenta uma óptima concordância com as observações (ver quadro 12), independentemente da modelação da acção sísmica efectuada. De realçar que numa das simulações efectuadas para a ilha do Faial se conseguiu reproduzir o número exacto de vítimas mortais. Para isso recorreu-se à acção sísmica avaliada pelo modelo empírico de Bommer *et al.* [1998], conjugada com o

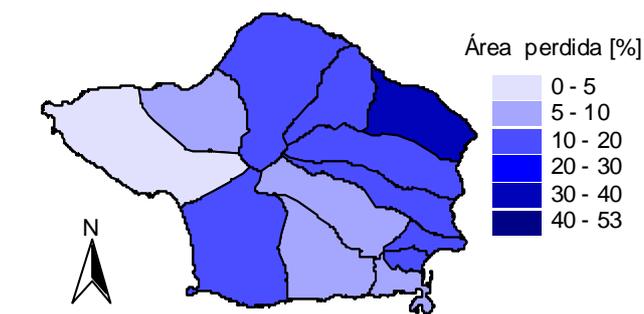
modelo de avaliação de perdas humanas FEMA & NIBS. Verifica-se ainda que o modelo de avaliação de perdas Coburn & Spence sobrestima, para todas as acções sísmicas ensaiadas, o número de mortos simulados na ilha do Faial. Em contrapartida, nas simulações efectuadas para a ilha do Pico verificou-se que a inexistência de vítimas mortais é bem reproduzida por ambos os modelos, sendo também independente do tipo de modelação da acção sísmica realizada.

Sobre os indicadores de perdas económicas globais ocorridas no parque habitacional das ilhas do Faial e Pico importa sublinhar que para se obter os resultados apresentados nas últimas duas linhas dos quadros 15 e 16 foram necessárias várias iterações, em particular alterando a grandeza factor de dano constante do quadro 9. Com efeito, quando se utiliza o modelo FEMA & NIBS [1999] presente no quadro 9 e um valor constante de 538 € para os custos, por m², da reconstrução, tal como foi preconizado por Oliveira & Ferreira [2008], os montantes de 160 M€ e de 60 M€ para as perdas no parque habitacional das ilhas do Faial e do Pico, respectivamente, estão longe de serem atingidas. Desta forma, optou por se aumentar os valores atribuídos à grandeza factor de dano (ver quadro 18) até que a proporção existente entre as perdas económicas simuladas e as observadas fosse semelhante à proporção entre o número de edifícios simulados no estado de dano Dano Total e o número de edifícios observados nos graus de dano D4 e D5. Pretende assim justificar-se a subavaliação das perdas pelo facto de previamente os danos terem sido subavaliados, pese embora a dificuldade de fazer corresponder os indicadores de dano do modelos mecanicista aos graus de dano da escala EM-98.

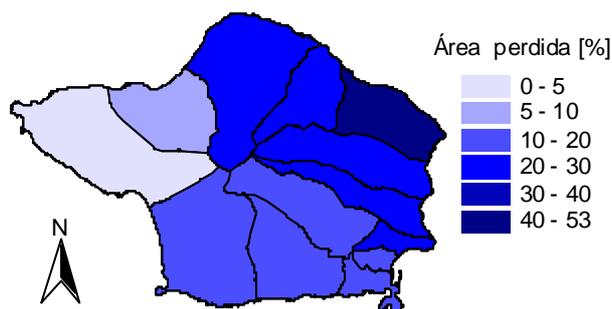
Quadro 18 – Correspondência entre os indicadores de dano do método mecanicista e dos métodos estatísticos.

Estados de dano estrutural	Factor de dano [%]
Dano Ligeiro	5
Dano Moderado	20
Dano Severo	80
Dano Total	100

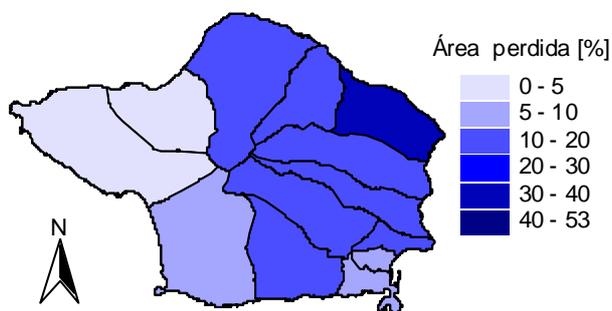
Finalmente, na figura 25 apresenta-se a distribuição geográfica da percentagem de área habitacional perdida, por freguesia, na ilha do Faial em consequência do cenário sísmico de 1998.



a)



b)



c)

Figura 25 – Percentagem de área habitacional perdida, por freguesia; a) simulação estocástica do movimento sísmico pelo programa EXSIM [Zonno et al., 2008]; b) modelação da acção sísmica segundo Bommer et al. [1998]; c) modelação da acção sísmica segundo Akkar & Bommer [2007].

7 Conclusões e trabalho futuro

O presente relatório apresenta, em detalhe, o trabalho desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil no âmbito do projecto USuET «Análise sistémica do risco sísmico: uma visão integrada. Aplicação a centros urbanos nos Açores».

Neste trabalho descreveu-se a metodologia de análise do risco sísmico aplicada e procedeu-se ao inventário dos elementos em risco do Arquipélago dos Açores em termos de quantitativos habitacionais e populacionais, com base na informação estatística recolhida nos Censos 2001 [INE, 2003].

Procedeu-se também à análise das estatísticas dos elementos expostos, bem como da sua distribuição geográfica, tendo em conta os factores de vulnerabilidade sísmica possíveis de apurar nos recenseamentos analisados. Foi assim possível identificar as tipologias construtivas mais representativas do parque habitacional do Arquipélago dos Açores.

Os elementos analisados permitiram efectuar a comparação entre as características do parque habitacional Açoriano e Continental e identificar indicadores genéricos que sugerem que o parque Açoriano é sísmicamente mais vulnerável que o Continental. Refira-se que, tal como no território Continental [Sousa, 2006], as percentagens elevadas de edifícios construídos em data posterior à da entrada em vigor do primeiro regulamento não implicam, necessariamente, um quadro positivo para a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional dos Açores, pois não existem garantias que o nível de resistência das estruturas projectadas e construídas durante a vigência de um dado regulamento sísmo-resistente português seja consentâneo com as disposições preconizadas nesses regulamentos.

Relativamente ao trabalho desenvolvido ao nível do Simulador de Cenários Sísmicos, importa dizer que o projecto USuET constituiu um importante contributo para a sua actualização, em termos de (i) dados, (ii) âmbito geográfico, (iii) rotinas internas do SIG, (iv) algoritmos de modelação, (v) aferição dos resultados e (vi) ambiente de operação. Assim, os progressos conseguidos na actualização do Simulador consistiram em:

- (i) incluir bases de dados apuradas nos Censos 2001 com informação sobre a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional do Arquipélago dos Açores, bem como dos seus ocupantes, e bases de dados de intensidades macrossísmicas contendo a acção sísmica relativa a alguns sismos importantes que afectaram a região;
- (ii) generalizar a aplicação do Simulador a qualquer freguesia específica do Arquipélago dos Açores;

- (iii) automatizar a capacidade de produção de mapas do SIG para a região;
- (iv) adicionar um novo modelo empírico de atenuação espectral da acção sísmica, passando a considerar-se, nestes modelos empíricos, a distância mais curta entre a falha e o lugar em análise; adicionaram-se também dois modelos para a conversão de valores de pico do movimento do terreno (PGV e PGA) em intensidades macrossísmicas;
- (v) comparar os cenários sísmicos modelados pelo Simulador com os quantitativos de danos e perdas resultantes de sismos que no passado afectaram o território Açoriano, em particular o sismo de 9 de Julho de 1998 e
- (vi) generalizar o Simulador para ambiente WebSIG.

Como caso de aplicação do Simulador LNECloss ao Arquipélago dos Açores efectuou-se então a modelação de um cenário sísmico semelhante ao do evento de 1998 que afectou as ilhas do Faial e do Pico do grupo Central deste Arquipélago.

Para o efeito, tentou reproduzir-se o parque habitacional existente no Arquipélago à data do sismo tendo por base o inventário dos elementos em risco apurado em 2001 e os levantamentos de dano realizados.

No que toca a este caso de aplicação pode concluir-se que:

- (i) os parâmetros do modelo mecanicista de danos [FEMA & NIBS, 1999] podem ser devidamente calibrados de acordo com as características do parque habitacional existente. Desta forma, o modelo mecanicista não é constringido por classes de vulnerabilidade pré-definidas, como é o caso dos modelos estatísticos de avaliação de danos. Por isso, o modelo mecanicista apresenta alguma flexibilidade para ser aferido a diferentes regiões sísmicas, favorecendo a concordância entre as simulações e as observações. Os resultados agora obtidos indicam que as curvas de capacidade e vulnerabilidade do projecto LESSLOSS [2007] deveriam ser alteradas para modelar um parque habitacional mais vulnerável como o existente no Arquipélago dos Açores. Esta conclusão decorre da subavaliação de danos face às observações do sismo de 1998, pese embora, negativamente, a dificuldade em encontrar uma correspondência objectiva entre os estados de dano do modelo mecanicista e os graus de dano da escala de intensidades macrossísmicas.
- (ii) O modelo de perdas humanas FEMA & NIBS [1999] conduziu a simulações com excelentes resultados no caso do cenário sísmico ensaiado, enquanto que o modelo de Coburn & Spence [2002] conduziu a uma sobreavaliação das perdas para a ilha do Faial. Não obstante, a concordância entre as perdas humanas

simuladas e as observadas foi conseguida à custa de uma subavaliação dos danos.

Apreciando de uma forma global o trabalho desenvolvido, pode concluir-se que este cumpriu o seu principal objectivo que visava a actualização do Simulador de Cenários Sísmicos, integrado num Sistema de Informação Geográfica, para o território Açoriano.

Acresce que a disponibilização do Simulador LNECloss na Web poderá revelar alguma utilidade para entidades responsáveis pelo planeamento e pela gestão de emergência. Efectivamente, uma correcta gestão da informação constitui um factor crítico de sucesso na gestão da emergência, evidenciando-se o papel dos simuladores de cenários como ferramentas de apoio à decisão neste tipo de situações. A montante das situações de emergência, existem outros intervenientes que também poderão beneficiar desta aplicação, nomeadamente os interessados em definir as melhores estratégias de mitigação do risco sísmico, que terão a possibilidade de estudar cenários alternativos, em termos de ocorrência, área geográfica de incidência, ou o tipo de construção sobre a qual intervir para reduzir a vulnerabilidade sísmica de um parque edificado. Um Simulador WebSIG poderá ser utilizado pela entidades mencionadas sem que elas necessitem de desenvolver competências ao nível do SIG e/ou de possuírem pacotes de *software* da área dos Sistemas de Informação Geográfica.

Em termos de perspectivas futuras reconhece-se a importância de integrar no Simulador uma caracterização geotécnica fina das ilhas do Arquipélago do Açores, para ser possível simular efeitos de sítio, devidos à amplificação dinâmica dos solos, e caracterizar a acção sísmica à superfície de uma forma mais realista.

Complementarmente, reconhece-se também a importância de utilizar modelos de dano estatísticos, cujos graus de dano são concordantes com os levantamentos de danos efectuados.

Ao nível do Servidor de Aplicações SIG, perspectiva-se a actualização do Servidor de mapas para uma tecnologia mais recente, com seja o ambiente *ArcGIS Server*, permitindo, dessa forma, melhorias de funcionalidades da interface de visualização da informação espacial e uma melhor gestão de toda a aplicação. Desta forma, esta actualização, poderá vir a ser acompanhada de uma possível migração do Simulador LNECloss em ambiente *desktop*, para outro ambiente de SIG como o *ArcGIS*.

Preconiza-se ainda que, no futuro, os simuladores de cenários sísmicos sofram outros desenvolvimentos relevantes, nomeadamente a actualização em tempo real face à ocorrência, envolvendo a reavaliação dos resultados das simulações. Perspectivam-se duas hipóteses de actualização da informação:

- (i) incluir, de uma forma automática, informação instrumental sobre a acção sísmica, proveniente, por exemplo, acelerómetros ligados ao sistema [Campos Costa & Sousa, 2004];
- (ii) englobar informação fornecida pelas equipas de reconhecimento e avaliação no terreno no que concerne aos danos e perdas observados.

8 Referências

Afonso, N., 2007.

Simulador de Cenários Sísmicos em ambiente WebSIG. Tese de mestrado (documento provisório). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal.

Akkar, S. & Bommer, J.J., 2007.

Prediction of elastic response spectra in Europe and the Middle East. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36,1275-1301.

ATC, 1985.

Earthquake damage evaluation data for California. Applied Technology Council, ATC 13. Redwood City, Califórnia.

Atkinson, G.M. & Kaka, S.I., 2007.

Relationships between Felt Intensity and Instrumental Ground Motion in the Central United States and California. *BSSA*, 97 (2): 497–510.

Barbat, A.H. & Pujades, L., 2004.

Evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a Barcelona. *6ESES*. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães. pp. 229-252.

Bazzurro, P. & Cornell, C.A., 1999.

Disaggregation of seismic hazard. *BSSA*, 89: 501-520.

Bommer, J.J., Elnashai, A.S., Chlimintzas, G.O. & Lee, D., 1998.

Review and development of response spectra for displacement - based seismic design. ESEE Research Report, nº 98-3, March 1998. Civil Engineering Department, Imperial College. Londres.

Bommer, J.J. & Elnashai, A.S., 1999.

Displacement spectra for seismic design. *Journal of Earthquake Engineering*, 3, nº1, Imperial College Press. Londres.

Caicedo, C., Barbat, A.H., Canas, J.A. & Aguiar, R., 1994.

Vulnerabilidad sísmica de edificios. Monografía CIMNE IS-6. Barcelona.

Campos Costa, A. & Sousa, M. L.; 2004.

Simulador de Cenários Sísmicos. Apresentação e discussão dos resultados Workshop Planeamento de Emergência. O Risco Sísmico na AML, organizado pelo Serviço Nacional de Protecção Civil, Oeiras.

Campos Costa, A., Sousa, M. L., Carvalho, A., Bilé Serra, J., Martins, A. & Carvalho, E., 2004.

Simulador de Cenários Sísmicos integrado num Sistema de Informação Geográfica”. 7º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica, pp. 455 - 464, Guimarães.

- Carvalho, A., 2007.
Modelação estocástica da acção sísmica em Portugal Continental. Tese de doutoramento em Ciências da Engenharia. Universidade Técnica de Lisboa.
- Carvalho, E.C., Campos Costa, A., Sousa, M.L., Martins, A., Serra, J.B., Caldeira, L. & Coelho, A.G., 2002.
Caracterização, vulnerabilidade e estabelecimento de danos para o planeamento de emergência sobre o risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos municípios de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vinhos e Torres Vedras. Relatório final. Relatório 280/02 – G3ES. LNEC, Lisboa.
- Carvalho, E.C. & Oliveira, C.S., 1999.
Construção anti-sísmica. Edifícios de pequeno porte. ICT. Informação Técnica. Estruturas. DIT 13. LNEC, Lisboa.
- Chapman, M.C., 1995.
A probabilistic approach to ground-motion selection for engineering design. *BSSA*, **85**: 937-942.
- Chen, W.F. & Scawthorn, C., 2003.
Earthquake Engineering Handbook. CRC Press.
- Choffat, P. & Bensaúde, A., 1913.
Estudos sobre o sismo do Ribatejo de 23 de Abril de 1909. Comissão do Serviço Geológico de Portugal. Imprensa Nacional. Lisboa.
- Coburn, A.W. & Spence, R., 2002.
Earthquake protection. John Wiley & Sons, LTD. Reino Unido.
- Coburn, A.W., Spence, R. & Pomonis, A., 1994.
Vulnerability and risk assesment. 2ª Ed. Disaster Management Training Programme (DMTP). Department of Humanitarian Affairs (DHA). United Nations Development Programme (UNDP). Cambridge.
- Costa, A., 1990.
Análise sísmica de estruturas irregulares. Informação Científica. Estruturas. INCES 8. LNEC, Lisboa.
- Di Pasquale, G. & Orsini, G., 1997.
Poposta per la valutazione di scenari di danno conseguenti as un evento sismico a partire dai dati ISTAT. 8 *Convegno Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia.* Palermo.
- EERI, 2000.
Financial management of earthquake risk. EERI Endowment Subcommittee on Financial Risk Management.

- FEMA & NIBS, 1999.
Earthquake loss estimation methodology – HAZUS 99. Federal Emergency Management Agency and National Institute of Buildings Sciences, Washington DC.
- Ferreira, M.A., 2008.
Classificação dos danos no edificado com base na EMS-98. «Sismo de 1998 - Açores. Uma década depois». Ed.C.S. Oliveira et al., Governo dos Açores/SPRHI, S.A. Azores. Portugal.
- Giovinazzi, S. & Lagomarsino, S., 2003.
Seismic risk analysis: a method for the vulnerability assessment of built-up areas. *European Safety and Reliability Conference.* Maastricht.
- Giovinazzi, S. & Lagomarsino, S., 2004.
A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings. *13WCEE.* Vancouver. Artigo nº 896.
- Gonçalves, J., 2008.
O atendimento hospitalar no sismo de 1998. «Sismo de 1998 - Açores. Uma década depois». Ed.C.S. Oliveira et al., Governo dos Açores/SPRHI, S.A. Azores. Portugal.
- Gutenberg, B. & Richter, C.F., 1942.
Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *BSSA*, **3**: 163-191.
- INE, 2001.
Estatísticas da construção de edifícios. Instituto Nacional de Estatística. Lisboa.
- INE, 2002.
Recenseamento da População e da Habitação (Portugal) - Censos 2001. Instituto Nacional de Estatística. Lisboa.
- INE, 2003.
Censos 2001. Programa Global. Instituto Nacional de Estatística. Lisboa.
<http://www.ine.pt/censos2001/censos.asp>.
- Kircher, C.A., Nassar, A. A., Kustu, O. & Holmes, W.T., 1996.
Development of building damage functions for earthquake loss estimation. *Earthquake Spectra*, Vol. 13, **4**: 663-682.
- LESSLOSS, 2007.
Earthquake Disaster Scenario Prediction and Loss Modelling for Urban Areas. Editor Robin Spence, IUSS Press, Pavia, Itália.
- Lucantoni, A., Brammerini, F. & Sabetta, F., 2002.
Last achievements in seismic risk assessment of Italy. *12ECEE.* Londres. Elsevier Science Ltd. Artigo nº 464.
- Madeira, J., Silveira, A.B., Serralheiro, A., 1998.
Efeitos geológicos do sismo do Faial de 9 de Julho de 1998. *Protecção Civil* 14, 12-20.

- McGuire, R.K., 1995.
Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop. *BSSA*, **85**: 1275-1284.
- McGuire, R.K., 2004.
Seismic hazard and risk analysis. *EERI Monograph*, Earthquake Engineering Research Institute.
- Moreira, V.S., 1984.
Sismicidade histórica de Portugal Continental. Separata da Revista do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica. Lisboa.
- Newmark, N.M. & Rosenblueth, E., 1971.
Fundamentals of earthquake engineering. Prentice-Hall.
- Neves, J.C., Costa, A., Oliveira, C.S., 2007.
Vulnerabilidade sísmica do parque habitacional das ilhas do Faial e Pico (Parte 1 – danos exteriores). *Sísmica 2007*, 7ESES, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Nunes, F., Costa, T.C., Senos, M.L., 1999.
Estudos de sismicidade no Arquipélago dos Açores – Aplicação ao sismo de 9 de Julho de 1998. 4ESES, Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve, Faro.
- Oliveira, C.S., 1989a.
Efeitos dos sismos sobre as construções – Parte I – Danos mais frequentes. *Revista Engenharia e Arquitectura*, Ano 3, nº 13, Fev / Março. Lisboa. pp. 34-52.
- Oliveira, C.S., 1989b.
Efeitos dos sismos sobre as construções - Parte II – Concepção estrutural e redução de danos. *Revista Engenharia e Arquitectura*, Ano 3, nº 14, Abril/Maio. Lisboa. pp. 108-126.
- Oliveira, C.S., 1992.
Quantificação do movimento sísmico aquando do sismo de 1 de Janeiro de 1980. Monografia *10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980*. pp. 83-125, Editores C.S. Oliveira, A.R.A Lucas e J.H. Correia Guedes, LNEC e SRHOP, Lisboa.
- Oliveira, C.S. & Ferreira, M.A., 2008.
Impacto do sismo de 1998 no território dos Açores. Principais consequências e indicadores. «Sismo de 1998 - Açores. Uma década depois». Ed.C.S. Oliveira et al., Governo dos Açores/SPRHI, S.A. Azores. Portugal.
- Paula, A., 1996.
Base de dados de informação macrossísmica. Relatório realizado no âmbito do projecto Environment *Estudos de Risco Sísmico*. LNEC, Lisboa.

- Peng, Z.R. & Tsou, M.-H. (2003).
INTERNET GIS, Distributed Geographic Information. Services for the Internet and Wireless Networks, John Wiley & Sons.
- Pereira de Sousa, F.L., 1919-1932.
O Terramoto do 1º de Novembro de 1755 em Portugal e um Estudo Demográfico. Serviços Geológicos. Lisboa.
- RSA, 1983.
Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. Decreto-Lei nº 235/83 de 31 de Maio e Decreto-Lei nº 357/85 de 2 de Setembro. Imprensa Nacional - Casa da Moeda, 1986. Lisboa.
- RSCCS, 1958.
Regulamento de Segurança das Construções Contra os Sismos. Decreto nº 41 658. Imprensa Nacional. Lisboa.
- RSEP, 1961.
Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes. Decreto nº 44 041. Imprensa Nacional, Lisboa.
- Sandi, H., 1986.
Vulnerability and risk analysis for individual structures and systems. *8ECEE*. LNEC, Lisboa. pp. 11-69.
- Sousa, M.L., 1996.
Modelos probabilistas para avaliação da casualidade sísmica em Portugal Continental. Tese de Mestrado em Investigação Operacional e Engenharia de Sistemas. IST, UTL. Lisboa.
- Sousa, M.L., 2006.
Risco Sísmico em Portugal. Tese de Doutoramento em Engenharia do Território. IST, UTL. Lisboa.
- Sousa, M.L., 2007.
Hierarquização das regiões de Portugal Continental em função do seu risco sísmico Sísmica 2007 – 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, FEUP, Porto.
- Sousa, M.L. & Afonso, N., 2007.
Relatório de actividade do Projecto USuET «Análise sistémica do risco sísmico: uma visão integrada. Aplicação a Centros Urbanos nos Açores Relatório 299/2007, DE/NESDE, Proc. 0305/14/15791, LNEC, Lisboa.
- Sousa, M.L. & Afonso N., 2008.
Simulation of seismic scenarios in azores islands. Azores 1998. International Seminar on Seismic Risk and Rehabilitation of Stone Masonry Housing. Faial, Portugal.

- Sousa, M.L., Afonso N. & Matos, J., 2008.
Simulation of seismic scenarios in a WebGIS environment. Application to Azores islands. 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China.
- Sousa, M. L., Campos Costa, A., Carvalho, A. & Coelho, E., 2004.
An automatic seismic scenario loss methodology integrated on a Geographic Information System. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Artigo nº 2526, Vancouver, B.C., Canada.
- Sousa, M. L., Campos Costa, A. & Coelho, E.; 2006.
LNECloss Simulador de Cenários Sísmicos integrado num Sistema de Informação Geográfica. engenharia e vida Ano II, nº21, pp. 28-33.
- Sousa, M.L., Campos Costa, A. & Oliveira, C.S., 2007.
Análise do risco sísmico de Portugal Continental, II Encontro Nacional de Riscos, Segurança e Fiabilidade - Riscos Públicos e Industriais, IST, Lisboa.
- Sousa, M.L. & Carvalho, A., 2001.
Estudo de casualidade sísmica no Grupo Central do Arquipélago dos Açores. Relatório 208/01. LNEC, Lisboa.
- Sousa, M.L., Carvalho, A. & Campos Costa, A., 2001.
Seismic hazard de-aggregation for the Central Group of Azores Islands. 5ESES. LREC, Ponta Delgada. pp. 241-250.
- Sousa, M.L. & Oliveira, C.S., 1991.
Sismicidade histórica: Intensidades sísmicas, cartas de isossistas e atenuação. Relatório – NDA. LNEC, Lisboa.
- SSN, 1998.
<http://www.serviziosismico.it/PROG/1998/RISCHIO/start.html>. [acedido em 2002].
- Tiedemann, H., 1990.
What can be gained from earthquake prediction? ECE/UN *Seminar on Prediction of Earthquake Occurrence and Ground Motion*. Editado por Carlos S. Oliveira Lisboa. pp. 705–720.
- Tiedemann, H., 1992.
Earthquakes and volcanic eruptions: A handbook on risk assessment. Swiss Reinsurance Company, Zurique, Suíça.
- Trifunac, M.D. & Brady, A.G., 1975.
On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. *BSSA*, **65**: 139-162.

Trifunac, M.D. & Lee, V.W., 1989.

Empirical models for scaling pseudo relative velocity spectra of strong earthquake accelerations in terms of magnitude, distance, site intensity and recording site conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **8**, nº 3. Elsevier Publishers Ltd, Los Angeles.

Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H. Kanamori, M., 1999.

Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California. *Earthquake Spectra* **15** (3): 557-564.

Vozzone, M., Bilé Serra, J. & Caldeira, L., 2002.

Caracterização, vulnerabilidade e estabelecimento de danos para o planeamento de emergência sobre o risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos municípios de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vinhos e Torres Vedras. Fichas e perfis geotécnicos. Relatório 376/02 – NF. LNEC, Lisboa.

Zonno, G. Musacchio, G. Meroni, F. Oliveira, C.S. Ferreira, M.A. and Neves, F., 2008.

The 9th July 1998 Faial Earthquake: Comparison of stochastic finite fault damage simulation with surveyed data. Proceed. of the Azores 1998. International Seminar on Seismic Risk and Rehabilitation of Stone Masonry Housing. Faial, Portugal.

Zuccaro, G. & Papa, F., 2002.

Method of seismic vulnerability and exposure assessment at national scale – the Italian case. *I2ECEE*. Londres, Elsevier Science Ltd. Artigo nº 698.

Agradecimentos

O presente estudo foi realizado no âmbito do projecto USuET «Análise sistémica do risco sísmico: uma visão integrada. Aplicação a centros urbanos nos Açores». financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) POCI/CTE-GIN/58095/2004.

Este trabalho apenas foi possível graças à contribuição de diversas pessoas e entidades às quais se agradece:

1. A Dra. Anabela Martins pelo seu apoio global ao desenvolvimento do projecto USuET
2. O Instituto de Engenharia de Estruturas, do Território e Construção (ICIST) do Instituto Superior Técnico, parceiro do LNEC no projecto USuET, que disponibilizou o levantamento dos edifícios danificados pelo sismo de 9 de Julho de 1998, nos Açores.
3. O Dr. Gaetano Zonno do Istituto Nazionale di Geofísica e Vulcanologia, Sezione di Milano, em Itália, que forneceu a simulação da acção sísmica para o cenário de 1998 utilizando um modelo de falha finita.

VISTOS

O Engenheiro Director do
do Departamento de Estruturas (DE)



João Almeida Fernandes
Investigador Coordenador

A Engenheira Chefe
do Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica
de Estruturas (NESDE)



Ema Coelho
Investigadora Principal

AUTORIA



Maria Luísa Sousa
Investigadora Auxiliar
(DE/NESDE)



Nuno Afonso
Engenheiro Geógrafo

