

Métodos expeditos para avaliação sísmica de edifícios de alvenaria com pavimentos flexíveis

Rapid methods for seismic assessment of existing masonry buildings with flexible floors

Vasco Bernardo
Alfredo Campos Costa
Aníbal Costa
José Manuel Catarino
Paulo X. Candeias

Resumo

A avaliação da segurança sísmica de edifícios existentes de alvenaria tem como referência os procedimentos dispostos na NP EN 1998-3:2017 (Anexo C) e o respetivo Anexo Nacional, que estabelecem os requisitos de desempenho e os critérios de conformidade para edifícios existentes sujeitos a um determinado nível de ação sísmica. No seguimento das exigências regulamentares, e à luz da verificação da segurança à ação sísmica preconizada na norma, realizaram-se análises probabilísticas de vulnerabilidade sísmica e fiabilidade estrutural a um grande conjunto de edifícios de alvenaria representativos do parque habitacional, que conduziram ao desenvolvimento de métodos expeditos para a avaliação sísmica em alternativa à verificação pelo método de referência. Os métodos propostos permitem avaliar a resistência sísmica de edifícios de alvenaria com pavimentos flexíveis, sem recurso a análises numéricas e recorrendo apenas a parâmetros geométricos (Método I) ou em conjunto com as propriedades mecânicas dos materiais (Método II).

Abstract

The seismic assessment of existing masonry buildings is based on the procedures included in NP EN 1998-3: 2017 (Annex C) and corresponding Portuguese National Annex, which establish the performance requirements and compliance criteria for existing buildings subjected to a certain level of seismic action. According to normative requirements, analytical seismic vulnerability assessment and structural reliability analyses were carried out on a large set of masonry buildings representative of the Portuguese housing stock, which led to the development of rapid methods for seismic assessment as an alternative to the reference method defined in the European standard. The proposed methods allow the seismic assessment of masonry buildings with flexible floors, without explicit numerical analysis, using only geometric parameters (Method I) or together with the material mechanical properties (Method II).

Palavras-chave: Edifícios existentes de alvenaria / Pavimentos flexíveis / Avaliação sísmica / Métodos expeditos

Keywords: Existing masonry buildings / Flexible floors / Seismic assessment / Rapid methods

Vasco Bernardo

Bolseiro de Doutoramento
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
vbernardo@lnec.pt

Alfredo Campos Costa

Investigador Principal
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
alf@lnec.pt

Aníbal Costa

Professor Catedrático
Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal
agc@ua.pt

José Manuel Catarino

Investigador-Coordenador
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
jmcatarino@lnec.pt

Paulo X. Candeias

Investigador Auxiliar
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
pcandeias@lnec.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

BERNARDO, V. [et al.] – Métodos expeditos para avaliação sísmica de edifícios de alvenaria com pavimentos flexíveis. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 16. ISSN 2183-8488. (julho 2021) 99-112.

1 Introdução

Com a entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 95/2019 de 18 de julho [1], que estabelece o regime aplicável à reabilitação de edifícios ou frações autónomas, passa a ser obrigatória a avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios existentes de acordo com a Portaria n.º 302/2019 de 12 de setembro [2].

Face às novas exigências regulamentares, o LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) em conjunto com a SPES (Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica) e no âmbito da tese de doutoramento do primeiro autor, com data de entrega prevista para 2021, desenvolveu métodos expeditos para a avaliação sísmica de edifícios de alvenaria, à luz da atual versão da NP EN 1998-3:2017 [3]. Neste contexto, a avaliação sísmica de edifícios existentes, tendo por base o método de referência preconizado na NP EN 1998-3:2017, nomeadamente o disposto no Anexo C para edifícios de alvenaria, poderá ser uma alternativa quando for cumprido o conjunto de requisitos e condições infra apresentadas, que validam a aplicabilidade dos métodos expeditos propostos no presente documento.

Os procedimentos utilizados no desenvolvimento dos métodos expeditos envolvem o cálculo numérico e analítico de um conjunto de edifícios, recorrendo a análises probabilísticas de vulnerabilidade sísmica e a estudos de fiabilidade (Ferry Borges e M. Castanheta [4]), válidos para todo o território nacional. Os métodos propostos – Método I e II – permitem avaliar a resistência sísmica de edifícios de alvenaria com pavimentos rígidos e flexíveis, sem recurso a análises numéricas e recorrendo apenas a parâmetros geométricos e às propriedades mecânicas das paredes de alvenaria. Ambos os métodos asseguram igual nível de fiabilidade estrutural para diferentes perigosidades sísmicas, diferindo no nível do conhecimento da estrutura e/ou nos respetivos parâmetros de avaliação, conduzindo a resultados mais ou menos conservativos.

Os métodos de avaliação propostos no presente documento destinam-se exclusivamente à avaliação da segurança de edifícios de alvenaria com comportamento flexível no seu plano, podendo informação referente à avaliação de edifícios com comportamento rígido no plano ser consultada na nota técnica publicada na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas n.º 14 da série III (Bernardo *et al.* [5]).

2 Disposições gerais

2.1 Objeto e campo de aplicação

O presente documento define os requisitos para a aplicação de métodos expeditos na avaliação sísmica de edifícios existentes de alvenaria com pavimentos flexíveis. As metodologias propostas são válidas para todo o território nacional e para a ação sísmica tipo 1 (afastada) e tipo 2 (próxima) definidas na NP EN 1998-1:2010 [6] não podendo ser extrapoladas para outros tipos de ações, estruturas ou pavimentos, ou ainda para efeitos de dimensionamento de estruturas novas ou reforçadas.

Tabela 1 Resumo dos principais parâmetros e requisitos associados aos métodos de avaliação I, II e III

	Requisitos	Parâmetros de avaliação	Modelo estrutural
Método III	Geometria do edifício	Avaliação global: Deslocamento no topo para 80% da força máxima	Modelo não-linear de comportamento global
	Espessura das paredes		
	Peso da estrutura	Avaliação elemento a elemento: Resistência máxima em flexão e/ou corte	Análise Linear
Método II	Propriedades dos materiais	Coefficiente sísmico	Opcional
Método I	Geometria do edifício	Área de paredes relativamente à área dos pisos	N/D
	Espessura das paredes		
	Resistência inicial ao corte		

2.2 Enquadramento dos procedimentos de avaliação sísmica

A avaliação estrutural dos edifícios poderá ser realizada através de quatro metodologias que apresentam níveis crescentes de precisão e complexidade, designados por Métodos I, II, III e IV. A escolha do método de avaliação dependerá da classe de importância do edifício, das condições geotécnicas locais, da interação com edifícios adjacentes, do número de pisos e da regularidade estrutural.

Os métodos expeditos (Método I e Método II), apresentados no capítulo 4, foram desenvolvidos à luz do método de referência preconizado na NP EN 1998-3:2017 (Método III) e com procedimentos do Método IV (análises probabilísticas), de forma a que os resultados das avaliações sejam conservativos, em função dos parâmetros de avaliação, e apresentem conformidade com as disposições regulamentares. Para informações adicionais recomenda-se a leitura do documento referente à avaliação de edifícios com comportamento rígido no plano (Bernardo *et al.* [5]).

A Tabela 1 apresenta o resumo dos principais requisitos e parâmetros de avaliação para os Métodos I, II e III.

3 Domínio de aplicação

Os edifícios avaliados pelos métodos expeditos obedecem a um conjunto de princípios e requisitos, de forma a garantir não só a validade das metodologias utilizadas como também a segurança estrutural perante a ação sísmica, de acordo com o disposto na NP EN 1998-3:2017. A Tabela 2 resume os princípios e critérios de aplicabilidade para a utilização dos métodos de avaliação expeditos (Método I e Método II) para edifícios com pavimento flexível e pelo método de referência da NP EN 1998-3:2017 (Método III).

3.1 Princípios base para a avaliação expedita

As metodologias propostas são válidas apenas para análises de comportamento sísmico no plano das paredes de edifícios isolados ou dispostos em banda. Em qualquer dos casos admissíveis e de acordo com o estabelecido na NP EN 1998-3:2017, os colapsos para fora do plano não estão contemplados. No entanto, deve ser

assegurado um comportamento monolítico (*box behaviour*) das estruturas.

3.2 Requisitos para aplicação dos métodos expeditos

3.2.1 Requisitos gerais e geotécnicos

Os métodos expeditos (Método I e II) de avaliação presentes no presente documento destinam-se exclusivamente a edifícios de habitação em alvenaria com pavimentos flexíveis, até cinco pisos acima da cota de soleira e área em planta até 350 m², pertencentes à classe de importância para edifícios I e II, conforme definido na NP EN 1998 1:2010.

Os métodos expeditos são aplicáveis apenas a edifícios que se encontrem fundados em terrenos dos tipos A, B ou C, de acordo com o definido na NP EN 1998-1:2010. Para informações adicionais relativamente aos requisitos geotécnicos a cumprir para a utilização dos métodos expeditos, consultar Bernardo *et al.* [5] (secção 3.2.3).

3.2.2 Requisitos estruturais e arquitetónicos

As metodologias expeditas são válidas para todas as alvenarias tradicionais quando se verifique o comportamento flexível dos pavimentos – diafragma flexível. Entende-se por pavimentos flexíveis aqueles cuja resistência e rigidez no plano não garantam um comportamento de diafragma rígido para ações sísmicas. Por exemplo, os edifícios com pavimentos em madeira não rigidificados, onde a ligação entre estes e as paredes de suporte seja insuficiente ou inexistente para permitir deslocamentos uniformes ao nível do piso. Os edifícios com lajes em betão armado onde também se verifique uma ligação insuficiente ou inexistente aos elementos de suporte, deverão ser analisados com comportamento flexível no plano.

Os métodos que se apresentam são também aplicáveis a edifícios com outro tipo de pavimento, quando não se verifique o comportamento rígido no plano e/ou um comportamento monolítico do conjunto das paredes resistentes às forças horizontais. No entanto, salienta-se que, no caso de edifícios com diafragmas horizontais flexíveis, os mecanismos locais para fora do plano são

Tabela 2 Princípios e critérios gerais de aplicabilidade para os métodos de avaliação I, II e III

Critérios de aplicabilidade		Método I e II	Método III
Tipo de alvenaria	Alvenaria tradicionais	Todas	
Mecanismos admissíveis	No plano	No plano (*)	
Tipo de pavimento	Flexível	Todos	
Classe de importância	I e II	Todas	
Número de pisos	até cinco pisos	Sem limite	
Área em planta	até 350 m ²	Sem limite	
Disposição do edifício	Isolado ou em banda	Omisso	
Regularidade estrutural	Sim	Opcional (**)	
Interação entre edifícios	ver restrição em 3.2.2	Sem restrição	
Condições geotecniais locais	Restringido aos solos Tipo A, B e C (NP EN 1998-1:2010)	Todos de acordo com a NP EN 1998-1:2010	
Sistema de fundação	Fundação rígida	Omisso	
Estado limite verificado	Danos severos (SD)	Limitação de Danos (DL) Danos Severos (SD) Colapso Iminente (NC)	

* A atual versão da NP EN 1998-3:2017 não prevê mecanismos de colapso de edifícios para fora do plano.

** Em função do tipo de análise adotada de acordo com NP EN 1998-3:2017.

suscetíveis de ocorrer para ações horizontais, devendo o derrube das paredes estar adequadamente restringido e assegurando-se, sempre que possível, o comportamento mais próximo de *box behaviour*.

As metodologias expeditas são válidas para edifícios isolados ou em banda. Para edifícios isolados deverão ser analisadas as duas direções ortogonais, sendo a avaliação condicionada pela direção de menor resistência às forças sísmicas horizontais. No caso de edifícios em banda, a verificação poderá ser realizada apenas na direção paralela às fachadas, desde que se verifique a existência de paredes meirais ou de empena sem aberturas e contínuas em toda a altura do edifício.

As disposições regulamentares das NP EN 1998-1:2010 e NP EN 1998-3:2017 relacionadas com a regularidade estrutural em planta e em altura dos edifícios são também exigidas na avaliação pelos métodos expeditos. Pretende-se garantir nos métodos expeditos comportamentos sísmicos mais regulares em planta, sem rotações dos pisos que originem deformações excessivas nas paredes extremas ou diferenças substanciais de rigidez e resistência entre paredes de pisos sucessivos, evitando-se situações de irregularidade em altura. Para os edifícios em que não se verifique aquelas disposições de regularidade estrutural, a adoção dos métodos expeditos não é aplicável, sendo necessário recorrer ao método de referência (Método III) proposto pela NP EN 1998-3:2017.

Relativamente à interação entre edifícios adjacentes, deverá ser verificado o alinhamento entre o pavimento de edifícios contíguos, sendo os métodos expeditos válidos quando não se verificar um

desnível entre lajes superior a 2/3 da espessura da parede meira $\left(\Delta h \leq \frac{2}{3}t\right)$, conforme ilustrado na Figura 1.

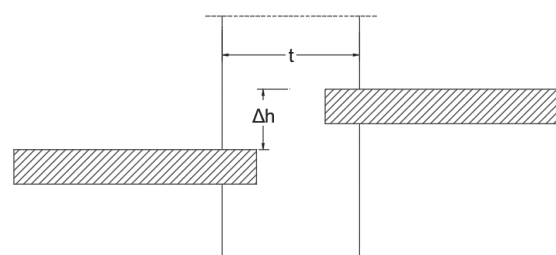


Figura 1 Requisito construtivo entre edifícios contíguos para a aplicação dos métodos expeditos

4 Descrição dos métodos expeditos de avaliação

Nesta secção apresenta-se os procedimentos gerais e a avaliação através dos métodos expeditos (Métodos I e II).

4.1 Síntese

Os métodos expeditos foram desenvolvidos ao abrigo da atual versão da NP EN 1998-3:2017 e NP EN 1998-1:2010, com o objetivo

de avaliar os edifícios de alvenaria de forma relativamente simples, desde que sejam cumpridos todos os requisitos enumerados na Tabela 2. Para o efeito, e no âmbito da Tese de doutoramento do primeiro autor, foi realizado um levantamento da geometria de cerca 100 edifícios existentes de alvenaria, permitindo construir uma base de dados que teve na origem no desenvolvimento dos métodos expeditos. Os edifícios foram analisados pelo método global preconizado na NP EN 1998-1:2010, recorrendo a análises estáticas não lineares a um conjunto de 9000 edifícios, com variação nas características mecânicas dos materiais, cobrindo assim uma vasta gama de valores admissíveis. Informações adicionais podem ser consultadas em Bernardo *et al.* [5].

4.2 Procedimentos gerais

A aplicação dos métodos expeditos (Métodos I e II) só é válida se, para além dos requisitos gerais apresentados na Tabela 2, forem asseguradas as seguintes disposições:

- A força de corte basal deverá ser calculada com base nas paredes resistentes, solicitadas na direção da ação sísmica. Por exemplo, no caso de edifícios em banda, com a ação sísmica a atuar na direção paralela às fachadas, as paredes que entram para o cálculo efetivo da resistência do edifício são aquelas que se encontram paralelas a esse mesmo plano.
- No cálculo da resistência do edifício à ação sísmica é aconselhável que as paredes a considerar para o efeito sejam contínuas, desde a fundação até ao último piso. Quando tal não for verificado, deve-se proceder da seguinte forma (ver Figura 2):
 - i) Paredes demolidas no piso térreo (caso tipo 1): os restantes troços de paredes, que se encontrem na mesma prumada da parede demolida, deverão ser considerados como cargas distribuídas sobre os elementos resistentes adjacentes e contabilizados para o cálculo da massa da estrutura. Para a avaliação da segurança ao nível de cada piso, as paredes na mesma prumada do troço demolido não deverão ser incluídas na resistência;
 - ii) Paredes demolidas em pisos intermédios (caso tipo 2): a avaliação da segurança ao nível do piso onde a parede foi demolida e nos pisos superiores não deve incluir a

resistência das paredes que estejam na mesma prumada, contribuindo apenas com o seu peso. Por outro lado, quando se verificar a sua continuidade nos pisos inferiores, é permitido contabilizar a sua resistência para a avaliação;

- iii) Paredes demolidas no último piso (caso tipo 3): a avaliação do último piso será realizada sem a parede demolida, enquanto nos pisos inferiores as paredes pertencentes à mesma prumada podem ser incluídas na avaliação.

- Deverá ser verificada em altura do edifício a continuidade de paredes mestras, paredes de fachada, paredes de núcleo de escadas/elevadores, paredes de saguão ou paredes meias ou empena, não sendo permitida a utilização dos métodos expeditos no caso em que sejam executadas demolições parciais ou totais das mesmas. A avaliação pelos métodos expeditos não permite contabilizar as resistências de paredes tipo tabique com espessura inferior a 0,15m.
- A massa utilizada na determinação do coeficiente sísmico deverá ser devidamente contabilizada, considerando os elementos principais, secundários e sobrecargas. Para o efeito deverá ser empregue a combinação sísmica de ações (Bernardo *et al.* [5] – secção 4.2.3.2 expressão (9)), de acordo com a NP EN 1990:2009 [7] e NP EN 1998-1:2010.
- As cargas verticais gravíticas transmitidas às paredes resistentes poderão ser estimadas através de modelos de cálculo simplificados. Na presença de pavimentos em madeira que verifiquem o disposto na secção 3.2.2, a carga a considerar deverá ser distribuída de acordo com as paredes que suportam o vigeamento desse piso. No caso de lajes em betão armado nas duas direções poderão ser consideradas linhas de rotura a 45 °.
- As propriedades médias dos materiais a utilizar na avaliação da segurança pelo Método II deverão ser obtidas através de ensaios *in situ*, divididas pelo respetivo coeficiente de confiança (CF) associado ao nível de conhecimento (KL) adquirido para a estrutura. Na ausência de resultados, deverão ser utilizadas as resistências mínimas da Tabela 3, divididas pelo nível de conhecimento limitado KL1 (CF = 1,35). No caso do Método I, deverão ser consideradas as propriedades mínimas divididas pelo coeficiente de confiança para a nível de conhecimento limitado KL1 (CF = 1,35).

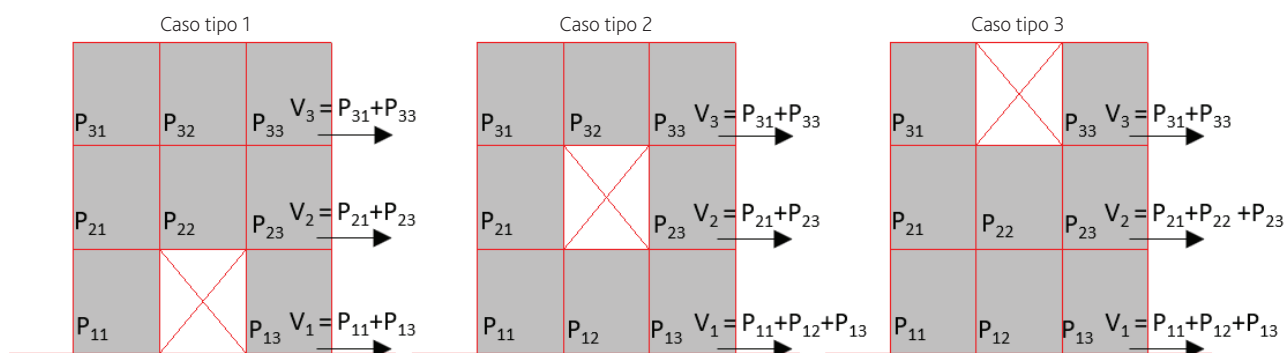


Figura 2 Representação esquemática das paredes a considerar na avaliação em caso de demolições parciais

Tabela 3 Exemplos de propriedades de alguns tipos de alvenaria (Candeias *et al.* [8])

Tipo de alvenaria	f_c (MPa)	f_t (MPa)	f_{v0} (MPa)	E (MPa)	G (MPa)	w (kN/m ³)
Alvenaria de pedra irregular, com seixos e pedras irregulares distribuídas de forma errática	1,1 a 1,9	0,03 a 0,05	–	900	300	19
Alvenaria de pedra não aparelhada com folhas externas de espessura limitada e núcleo de enchimento (três folhas)	2,0 a 3,0	0,05 a 0,08	–	1200	400	20
Alvenaria de pedra aparelhada com boa aderência	2,6 a 3,8	0,08 a 0,11	–	1700	600	21
Alvenaria regular de pedra macia (blocos de tufo ou arenito)	1,4 a 2,2	0,05 a 0,06	–	1100	400	13 a 16
Alvenaria de pedra aparelhada rija (aparelho regular)	2,0 a 3,2	–	0,10 a 0,19	1400	500	13 a 16
Cantaria construída com pedras de boa qualidade	6,0 a 8,0	–	0,19 a 0,25	2800	900	22
Alvenaria de tijolo maciço com argamassa à base de cal	2,5 a 3,4	0,09 a 0,14	0,13 a 0,19	1500	500	18
Alvenaria de tijolo perfurado (índice de furação vertical < 40%) com argamassa à base de cimento e cal	4,9 a 8,1	–	0,24 a 0,32	4600	1100	15

Nota: f_c é a resistência à compressão, f_t é a resistência à tração, f_{v0} é a resistência inicial ao corte para esforço axial nulo (coesão do modelo Mohr-Coulomb), E é o módulo de elasticidade, G é o módulo de distorção, e w é o peso volúmico.

Tabela 4 Valores do coeficiente sísmico global exigidos (CS_{E_i}) para cada zona sísmica, tipo de terreno e número total de pisos do edifício

Zona sísmica	1 piso			2 pisos			3 pisos			4 pisos			5 pisos			
	Solo A	Solo B	Solo C	Solo A	Solo B	Solo C	Solo A	Solo B	Solo C	Solo A	Solo B	Solo C	Solo A	Solo B	Solo C	
Sismo Afastado Continente	1.1	0,31	0,42	0,49	0,28	0,37	0,43	0,27	0,35	0,39	0,26	0,32	0,36	0,25	0,30	0,33
	1.2	0,24	0,34	0,40	0,23	0,31	0,36	0,22	0,29	0,33	0,21	0,27	0,31	0,20	0,26	0,29
	1.3	0,17	0,25	0,30	0,16	0,23	0,27	0,16	0,22	0,26	0,16	0,21	0,25	0,16	0,21	0,24
	1.4	0,13	0,19	0,23	0,13	0,18	0,22	0,12	0,17	0,21	0,12	0,17	0,20	0,12	0,17	0,20
	1.5	0,06	0,10	0,12	0,06	0,10	0,12	0,06	0,10	0,12	0,06	0,10	0,12	0,06	0,10	0,12
	1.6	0,03	0,05	0,06	0,03	0,05	0,06	0,03	0,05	0,06	0,03	0,05	0,06	0,03	0,05	0,06
Açores	2.1	0,33	0,44	0,51	0,29	0,39	0,45	0,23	0,30	0,34	0,17	0,23	0,27	0,14	0,19	0,22
	2.2	0,29	0,39	0,46	0,26	0,34	0,40	0,20	0,27	0,31	0,15	0,20	0,24	0,12	0,16	0,19
Sismo Próximo Continente	2.3	0,29	0,40	0,46	0,27	0,35	0,39	0,21	0,28	0,31	0,15	0,21	0,24	0,12	0,17	0,20
	2.4	0,18	0,26	0,32	0,17	0,24	0,29	0,14	0,19	0,23	0,10	0,14	0,17	0,07	0,11	0,13
	2.5	0,14	0,20	0,25	0,13	0,19	0,23	0,10	0,15	0,19	0,07	0,11	0,13	0,05	0,08	0,10

Nota: os valores apresentados consideram a verificação da segurança para um período de retorno de 308 anos.

4.3 Avaliação através dos métodos expeditos

4.3.1 Avaliação da segurança pelo Método II

O Método II permite a avaliação da segurança à ação sísmica através do coeficiente sísmico da estrutura. Para um determinado edifício existente, a estrutura verifica a segurança se, ao nível de cada piso j , a capacidade resistente do edifício estimada em termos de coeficiente sísmico (CS_{Cj}) for igual ou superior ao coeficiente sísmico exigido (CS_{Ej}), de acordo com a expressão (1):

$$CS_{Cj} \geq CS_{Ej} \quad (1)$$

4.3.1.1 Exigência estrutural relativamente à ação sísmica

Os valores do coeficiente sísmico exigido (CS_E) são apresentados na Tabela 4, em função do número de pisos, zona sísmica e tipo de terreno. Os valores do coeficiente sísmico a considerar ao nível de cada piso (CS_{Ej}), deverão ser corrigidos por um coeficiente η_j , cujos valores são definidos na Tabela 5, através da expressão (2):

$$CS_{Ej} = \eta_j CS_E \quad (2)$$

Tabela 5 Valores do coeficiente η_j em função do número de pisos do edifício e do piso em análise

Piso	Número de pisos do edifício				
	5	4	3	2	1
5	0,45	–	–	–	–
4	0,60	0,50	–	–	–
3	0,75	0,70	0,70	–	–
2	0,90	0,85	0,85	0,85	–
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

4.3.1.2 Capacidade resistente do edifício relativamente à ação sísmica

A avaliação da capacidade resistente do edifício pelo Método II tem em conta a possibilidade das paredes desenvolverem três tipos de mecanismos no plano: flexão V_{flk} , corte diagonal V_{cdk} e deslizamento V_{clk} . O coeficiente sísmico medido CS é definido pelo quociente entre a resistência horizontal de um piso V_{Hj} e o peso total do edifício W_E , correspondente à combinação sísmica de ações, e calculado de acordo com o disposto em Bernardo et al. [5] (secção 4.2.3.2 – expressão (4)). Este valor deverá ser corrigido, de acordo com a expressão (3), para ter em conta a redistribuição das forças de inércia e efeitos não lineares na estrutura – coeficiente sísmico resistente CS_C – para comparação com a exigência CS_E (Tabela 4).

$$CS_C = \begin{cases} \alpha \cdot CS^{(1-1,50 \cdot CS)}, & CS \leq 0,825 \\ CS_{C,m\acute{a}x} & , CS > 0,825 \end{cases} \quad (3)$$

Os valores do coeficiente α e $CS_{C,m\acute{a}x}$ a adotar na expressão (3) são apresentados na Tabela 6 em função do número total de pisos do edifício acima do solo. Em alternativa, podem ser utilizados os ábacos propostos na Figura 3 para determinar o coeficiente sísmico resistente CS_C .

Tabela 6 Valores admissíveis de α e $CS_{C,m\acute{a}x}$ em função do número total de pisos do edifício

	1 piso	2 pisos	3 pisos	4 pisos	5 pisos
α	0,35	0,40	0,43	0,45	0,46
$CS_{C,m\acute{a}x}$	<u>0,36</u> (±0,05)	<u>0,42</u> (±0,03)	<u>0,45</u> (±0,02)	<u>0,46</u> (±0,01)	<u>0,47</u> (±0,01)

Nota: a sublinhado os valores recomendados para a determinação do $CS_{C,m\acute{a}x}$

4.3.2 Avaliação da segurança pelo Método I

O Método I permite a avaliação da segurança à ação sísmica através da relação entre a área de paredes na direção da ação sísmica e a área do piso. Para um determinado edifício existente, a estrutura verifica a segurança se, ao nível de cada piso j , o quociente entre a área de paredes na direção da ação sísmica (A_{pj}) e a área do piso (A_{pisoj}) for igual ou superior às exigências definidas na Tabela 7, de acordo com a seguinte expressão (4):

$$\frac{A_{pC,j}}{A_{pisoj}} \geq \frac{\alpha_E}{\beta} \quad (4)$$

em que:

α_E relação entre a área de paredes exigida e área do piso, em função da zona sísmica, número de pisos e tipo de solo (ver Tabela 7);

β fator de correção para a tensão de corte inicial (coesão), dado por:

$$\beta = \frac{f_{v0,min}}{1,35} \leq 2,0 \quad (5)$$

0,10 MPa

O valor mínimo da coesão $f_{v0,min}$ pode ser obtido de acordo com a Tabela 3, em função do tipo de parede. Na realização de ensaios experimentais às paredes de alvenaria, o valor a adotar deverá ser o valor médio dividido pelo coeficiente de confiança referente ao nível de conhecimento adquirido para a estrutura. Na existência de vários tipos de paredes, poderá ser admitida uma tensão média ponderada:

$$f_{v0,med} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot f_{v0,min})}{\sum_{i=1}^n A_i} \leq 0,20 \text{ MPa} \quad (6)$$

A verificação do edifício ao nível de cada piso poderá realizada considerando as exigências α_E da Tabela 7 corrigidas pelo coeficiente η_j , definidos na Tabela 5, e de acordo com a seguinte expressão:

$$\alpha_{Ej} = \alpha_E \cdot \eta_j \quad (7)$$

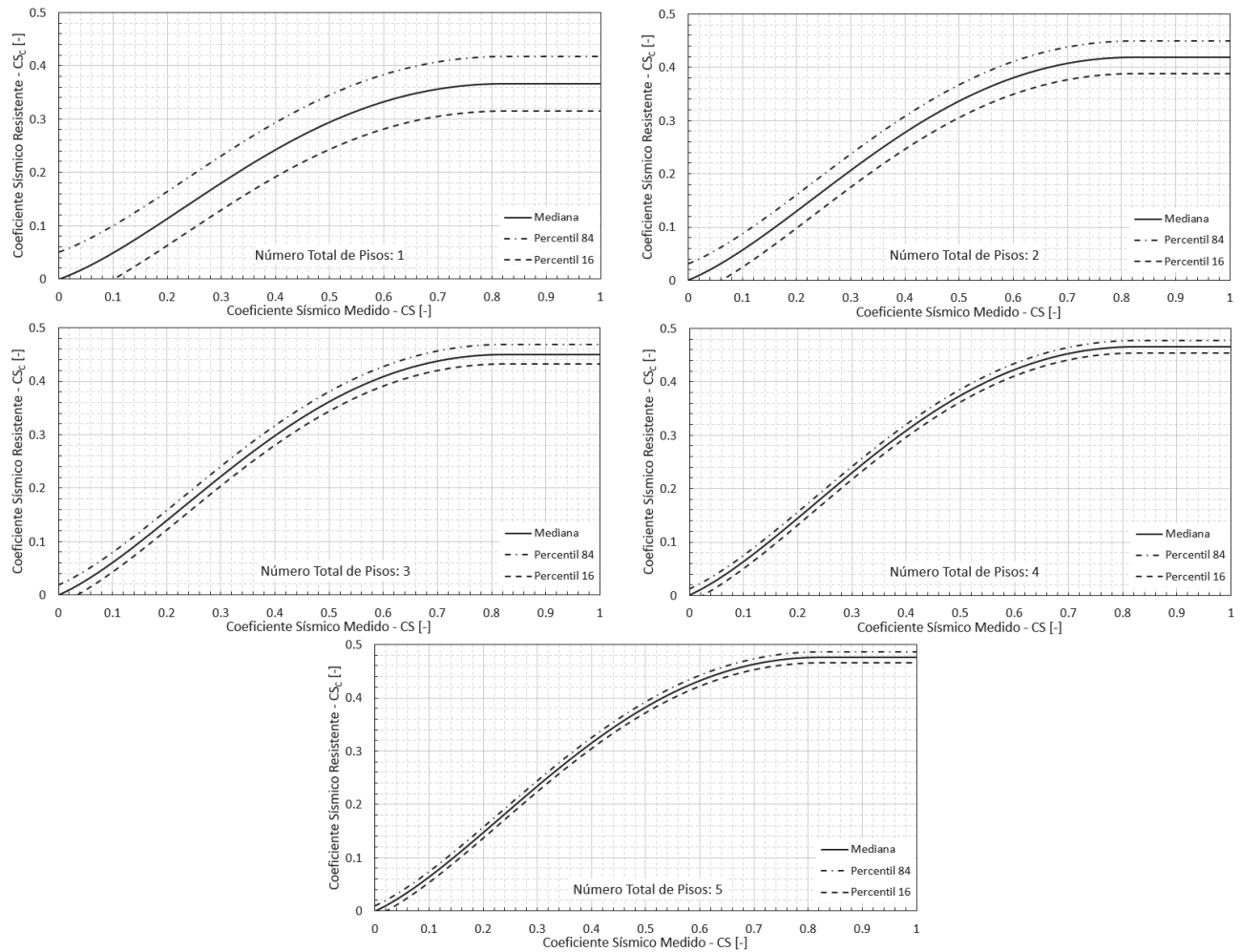


Figura 3 Ábacos de conversão do coeficiente sísmico medido em coeficiente sísmico resistente no caso de edifícios com pavimento flexível avaliados pelo Método II

Tabela 7 Valores de α_{ξ} para cada zona sísmica, tipo de terreno e número total de pisos do edifício

Zona sísmica	1 piso			2 pisos			3 pisos			4 pisos			5 pisos			
	Solo A	Solo B	Solo C	Solo A	Solo B	Solo C	Solo A	Solo B	Solo C	Solo A	Solo B	Solo C	Solo A	Solo B	Solo C	
Sismo Afastado Continente	1.1	0,26	0,35	0,41	0,23	0,31	0,35	0,21	0,26	0,30	0,19	0,24	0,27	0,18	0,22	0,25
	1.2	0,20	0,28	0,33	0,19	0,25	0,29	0,17	0,22	0,25	0,16	0,20	0,23	0,15	0,19	0,22
	1.3	0,14	0,21	0,25	0,13	0,19	0,22	0,12	0,17	0,20	0,12	0,16	0,18	0,11	0,15	0,17
	1.4	0,11	0,16	0,20	0,10	0,15	0,18	0,09	0,13	0,16	0,09	0,13	0,15	0,08	0,12	0,14
	1.5	0,05	0,08	0,10	0,05	0,08	0,10	0,05	0,07	0,09	0,05	0,07	0,09	0,04	0,07	0,08
	1.6	0,02	0,04	0,05	0,02	0,04	0,05	0,02	0,04	0,04	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04
Açores	2.1	0,28	0,37	0,43	0,23	0,31	0,36	0,17	0,23	0,26	0,13	0,17	0,20	0,10	0,13	0,16
	2.2	0,24	0,33	0,38	0,20	0,27	0,32	0,15	0,20	0,24	0,11	0,15	0,18	0,08	0,12	0,14
Sismo Próximo Continente	2.3	0,24	0,33	0,38	0,21	0,28	0,32	0,16	0,21	0,24	0,11	0,16	0,18	0,09	0,12	0,14
	2.4	0,15	0,22	0,27	0,13	0,19	0,23	0,10	0,14	0,17	0,07	0,10	0,13	0,05	0,08	0,10
	2.5	0,11	0,17	0,21	0,10	0,15	0,18	0,08	0,11	0,14	0,05	0,08	0,10	0,04	0,06	0,08

5 Exemplo de aplicação

Nesta secção exemplifica-se a aplicação do método global preconizado no Anexo C da NP EN 1998-3:2017 (Método III) e dos métodos expeditos propostos (Método I e II), na avaliação sísmica de um edifício de alvenaria com pavimento flexível.

5.1 Descrição do edifício

Pretende-se realizar a avaliação sísmica de um edifício existente com pavimentos flexíveis, localizado em Lisboa. O edifício, em banda, destina-se a habitação, sendo constituído por cinco pisos acima do solo, com pé-direito de 3,0 m e altura total de 15,0 m. A área de implantação é de 156,25 m² (12,5 m × 12,5 m). O edifício encontra-se fundado num terreno tipo B.

A estrutura do edifício é constituída por paredes de alvenaria de tijolo, onde apoia o pavimento com comportamento de diafragma flexível. As paredes das fachadas são a duas vezes de tijolo maciço (0,47 m), as paredes interiores resistentes entre alojamentos, núcleos de escada e empenas a uma vez (0,23 m) em tijolo maciço, e as paredes interiores divisórias a meia vez em tijolo furado (0,11 m), conforme a planta representada na Figura 4. Considera-se que não existe variação da espessura das paredes em altura e que os mecanismos locais para fora do plano estão impedidos de ocorrer.

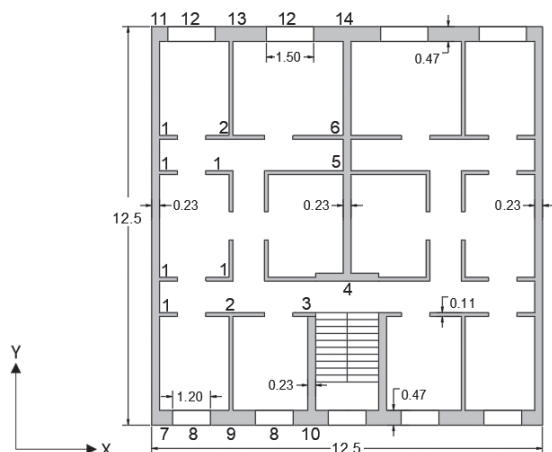


Figura 4 Planta tipo do edifício a avaliar

A título de exemplo, considerou-se as propriedades mecânicas das alvenarias apresentadas na Tabela 8. Admitiu-se que a informação recolhida acerca do edifício e os ensaios realizados *in situ*, permite

Tabela 8 Propriedades mecânicas das alvenarias

Material	Módulo de elasticidade (E) [GPa]	Módulo de distorção (G) [GPa]	Resistência à compressão (f_c) [MPa]	Resistência ao corte ($f_{v,oi}$) [MPa]	Coefficiente de atrito (μ) [-]	Peso volúmico (γ) [kN/m ³]
Alvenaria tijolo maciço	2,00	0,84	4,00	0,20	0,40	18,0
Alvenaria tijolo furado	1,50	0,63	3,00	0,20	0,40	15,0

adotar um nível de conhecimento integral ($KL = 1,00$).

5.2 Avaliação pelo Método III

A avaliação sísmica do edifício, de acordo com o disposto no Anexo C da NP EN 1998-3:2017 (C.4.1), foi realizada através de um modelo numérico tridimensional com recurso à formulação por macro elementos, disponível no software de análise estrutural *TreMuri* [9].

A avaliação da segurança pelo método de referência (Método III), é uma avaliação global que consiste em determinar a capacidade da estrutura em termos de deslocamento na cobertura (deslocamento alvo) e de resistência lateral na base, medida através do esforço transversal. Para o efeito, foram realizadas análise estáticas não lineares nas duas direções principais para obter as respetivas curvas de capacidade. O deslocamento último (D_u) a considerar deverá ser o deslocamento correspondente a 80% do corte basal máximo. Na Figura 5 apresentam-se as curvas de capacidade do edifício nas duas direções principais e a respetiva bilinearização.

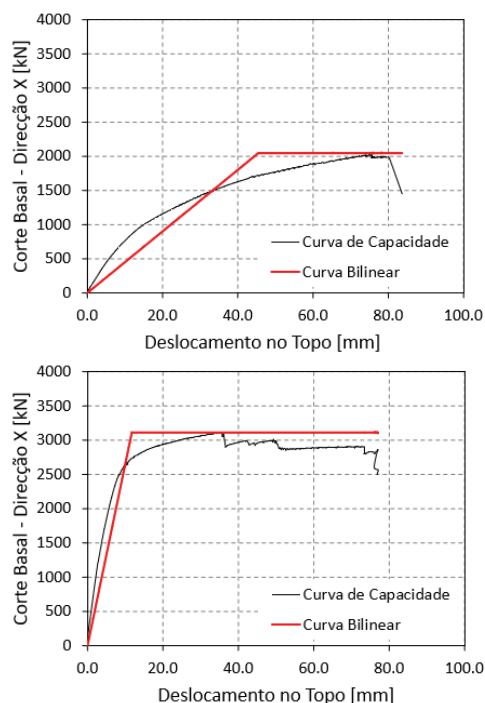


Figura 5 Curva de Capacidade do edifício nas direções principais X e Y

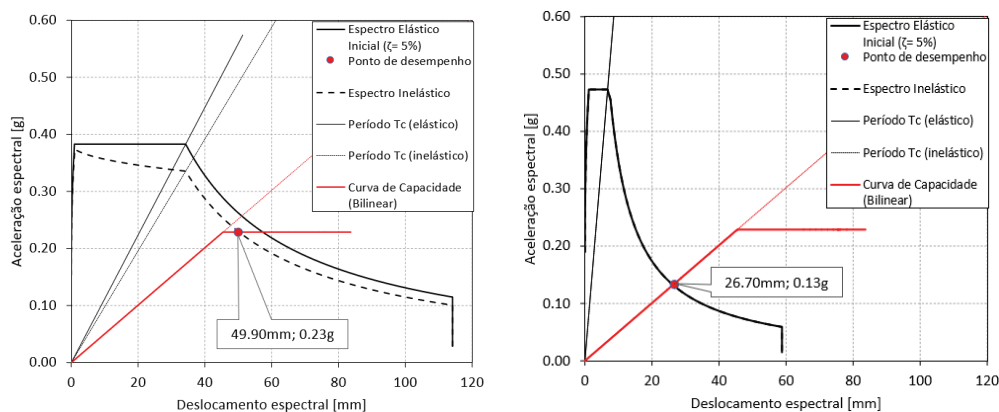


Figura 6 Pontos de Desempenho para a direção X, solo B e zona sísmica 1.3 e 2.3, respetivamente

Os pontos de desempenho foram determinados pelo Método N2, sugerido na NP EN 1998-1:2010, para a ação sísmica regulamentar (próxima e afastada). Tendo em conta que o edifício pertence à classe de importância II (edifícios correntes), deverá ser verificado o estado limite de danos severos (SD), o que corresponde a um período de retorno de 308 anos, ou seja, com probabilidade de excedência de 15% em 50 anos.

A verificação da segurança à ação sísmica é garantida se o ponto de desempenho, definido na curva de capacidade da estrutura, em particular para o estado limite SD, for inferior a 75% do deslocamento último (D_u). Na Figura 6 apresenta-se os pontos de

desempenho na direção X (paralela às fachadas), para o solo tipo B e para a zona sísmica 1.3 e 2.3, onde é verificada a segurança para ambas as zonas.

A verificação da segurança foi também efetuada admitindo que o edifício se encontra em diferentes zonas sísmicas. A Tabela 9 apresenta a avaliação do edifício na direção principal mais condicionante (direção X), para as diferentes zonas sísmicas do país, considerando o solo tipo B. O edifício analisado verifica a segurança para todas as zonas do continente, à exceção das zonas 1.1 e 1.2 (assinaladas a vermelho), caracterizadas por uma perigosidade sísmica maior.

Tabela 9 Avaliação sísmica na direção X pelo Método III para diferentes zonas sísmicas do país e solo B

Deslocamento	Zona sísmica											
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	
Capacidade [mm]	62,0 (*)											
Exigido [mm]	81,0	66,9	49,9	35,0	21,0	12,2	38,6	32,2	26,7	17,9	13,1	

(*) Estado limite de danos severos (SD) de acordo com a NP EN 1998-3:2017 para edifícios correntes.

5.3 Avaliação pelos métodos expeditos

A aplicação dos métodos expeditos pressupõe o cumprimento dos critérios da Tabela 2 e os procedimentos gerais definidos na secção 4.2, nomeadamente relacionados com a classe de importância, número de pisos, regularidade estrutural, interação com edifícios adjacentes e condições geotécnicas locais.

De acordo com o enunciado, o edifício tem cinco pisos, área em planta inferior a 350 m², destina-se a habitação (classe de importância II) e encontra-se fundado em terreno tipo B.

Em relação à regularidade em planta e altura, o edifício apresenta uma configuração geométrica compacta, sem recuos ou avanços em altura, e uma distribuição de massa e rigidez aproximadamente simétrica nas duas direções. A planta do edifício é quadrangular com esbelteza $\lambda = 1,0$. Deste modo o edifício satisfaz os critérios de regularidade estrutural dispostos em 4.2.3 da NP EN 1998-1:2010.

O edifício encontra-se disposto em banda, sendo que os desníveis entre os respetivos pavimentos e os dos edifícios contíguos é inferior ao limite definido na secção 3.2.2. Assim sendo, estão reunidas as condições necessárias para a aplicabilidade dos métodos expeditos I e II.

5.3.1 Avaliação pelo Método II

A avaliação da segurança pelo método II é definida através de um coeficiente sísmico exigido (CS_e), apresentado na Tabela 4, associado a diferentes sismicidades e condições geotécnicas. A capacidade resistente do edifício é também expressa em termos de um coeficiente sísmico resistente (CS_c) que contabiliza os vários mecanismos de rotura que possam ocorrer nas paredes, nomeadamente, flexão ($V_{fk,i}$), corte diagonal ($V_{cdk,i}$) e deslizamento ($V_{clk,i}$).

A massa do edifício foi estimada para a combinação sísmica de ações, considerando uma sobrecarga de utilização de 2,0 kN/m², obtendo-se uma massa aproximada em cada piso de 170 toneladas. Tendo em conta que a direção X é condicionante, a verificação da segurança é exemplificada apenas nessa direção. Para efeito foi considerada uma tensão média de compressão nas paredes de 0,07 MPa em cada piso.

Considerando a geometria do edifício definida na planta da Figura 4 e as propriedades mecânicas das alvenarias, apresenta-se na Tabela 10 a resistência das paredes para os vários mecanismos e o respetivo coeficiente sísmico ao nível da base.

A Tabela 11 apresenta a verificação da segurança para a zona sísmica onde se encontra o edifício (1.3 e 2.3) e admitindo a sua localização nas restantes zonas do continente, observando-se a concordância

Tabela 10 Coeficiente Sísmico Resistente ao nível da base na direção X (C_{sc}) pelo Método II

Parede i	Partes iguais	t [m]	L [m]	H [m]	V_{fik} [kN]	V_{cdk} [kN]	V_{clk} [kN]	V_{min} [kN]	Mecanismo condicionante	$\sum_i V_{min}$ [kN]	V_{rd} [kN]	CS_c [-]
1	12	0,11	0,75	3	6,5	24,3	28,1	6,5	Flexão	77,9	2470	0,23
2	4	0,11	1,85	3	39,5	59,9	69,2	39,5	Flexão	158,0		
3	2	0,11	0,70	3	5,7	22,7	26,2	5,7	Flexão	11,3		
4	1	0,16	5,25	3	450,3	361,0	278,0	278,0	Corte	278,0		
5	1	0,11	5,25	3	318,1	255,0	196,4	196,4	Corte	196,4		
6	1	0,11	3,45	3	137,4	167,6	129,0	129,0	Corte	129,0		
7	2	0,47	0,75	3	27,7	103,8	119,9	27,7	Flexão	55,5		
8	4	0,47	1,20	1	0,0	169,2	112,8	112,8	Corte	451,2		
9	2	0,47	1,40	3	96,7	193,7	223,7	96,7	Flexão	193,3		
10	2	0,47	1,10	3	59,7	152,2	175,8	59,7	Flexão	119,3		
11	2	0,47	0,55	3	14,9	76,1	87,9	14,9	Flexão	29,8		
12	2	0,47	1,50	1	0,0	211,5	141,0	141,0	Corte	282,0		
13	2	0,47	1,65	3	134,3	228,3	263,7	134,3	Flexão	268,5		
14	1	0,47	2,10	3	217,5	305,1	335,6	217,5	Flexão	217,5		

Tabela 11 Avaliação sísmica na direção X pelo Método II para diferentes zonas sísmicas do país e solo B

Coeficiente Sísmico [-]	Zona sísmica											
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	
Capacidade (CS_c)	0,23 (*)											
Exigido (CS_e)	0,30	0,26	0,21	0,17	0,10	0,05	0,19	0,16	0,17	0,11	0,08	

(*) Estado limite de danos severos de acordo com a NP EN 1998-3:2017 para edifícios correntes.

Tabela 12 Coeficiente Sísmico Resistente no piso j para a direção X ($CS_{c,j}$) e fator de correção η para a exigência sísmica ao nível do piso ($CS_{e,j}$)

Piso j	V_{rd} [kN]	Massa do edifício [ton]	Coeficiente sísmico global CS_c [-]	Coeficiente sísmico resistente do piso $CS_{c,j}$ [-]	η [-]
1	2470	850	0,23	0,23	1,00
2	2210			0,20	0,90
3	1925			0,17	0,75
4	1600			0,14	0,60
5	1180			0,10	0,45

Tabela 13 Avaliação sísmica na direção X pelo Método II ao nível dos pisos para diferentes zonas sísmicas do continente e solo B

Piso	Coeficiente Sísmico [-]	Zona sísmica										
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
1	Capacidade (CS_c)	0,23										
	Exigido (CS_e)	0,30	0,26	0,21	0,17	0,10	0,05	0,19	0,16	0,17	0,11	0,08
2	Capacidade (CS_c)	0,20										
	Exigido (CS_e)	0,27	0,24	0,19	0,15	0,09	0,04	0,17	0,15	0,15	0,10	0,08
3	Capacidade (CS_c)	0,17										
	Exigido (CS_e)	0,23	0,20	0,16	0,13	0,07	0,04	0,14	0,12	0,13	0,08	0,06
4	Capacidade (CS_c)	0,14										
	Exigido (CS_e)	0,18	0,16	0,12	0,10	0,06	0,03	0,11	0,10	0,10	0,07	0,05
5	Capacidade (CS_c)	0,10										
	Exigido (CS_e)	0,14	0,12	0,09	0,08	0,04	0,02	0,08	0,07	0,08	0,05	0,04

(*) Estado limite de danos severos (SD) de acordo com a NP EN 1998-3:2017 para edifícios correntes

entre a avaliação pelo método expedito II e o método III (Tabela 9). A avaliação pelo método II permite também verificar a segurança do edifício ao nível de cada piso j , sendo neste caso a exigência em termos de coeficiente sísmico (CS_{SEj}) corrigida por um fator η (ver Tabela 5), em função do número total de pisos. O coeficiente sísmico do edifício ao nível de cada piso para a direção principal X é apresentado na Tabela 12.

Na Tabela 13 apresenta-se a avaliação do edifício ao nível de cada piso na direção X e para as diferentes zonas sísmicas do continente.

5.3.2 Avaliação pelo Método I

A avaliação da segurança sísmica pelo Método I consiste em determinar a relação entre a área total de paredes na direção da ação sísmica A_{PC} e a área do piso A_{Piso} , e comparar com as exigências α_E da Tabela 5.

Apresenta-se na Tabela 14 e Tabela 15, respetivamente, os parâmetros necessários para a avaliação pelo Método I e a verificação da

segurança ao nível da base para todos as zonas sísmicas do país, considerando o solo tipo B e a ação sísmica na direção principal X. Considerando que não existe variação da espessura das paredes em altura e que a área de paredes é igual entre pisos, a verificação é efetuada apenas ao nível da base do edifício.

Tabela 14 Parâmetros requeridos para a avaliação da segurança pelo Método I na direção principal X

$A_{PC,x}$ [m ²]	A_{Piso} [m ²]	f_{v0} [MPa]	β [-]	$\frac{A_{PC}}{A_{Piso}}$
13,5	156,3	0,20	1,48	0,086

A avaliação da segurança sísmica pelo método expedito II permite verificar, para a estrutura analisada, a concordância entre este e o método de referência (método III). No caso do método I, os resultados são mais conservativos, não sendo verificada a segurança também para a zona sísmica 1.1, 1.2, 1.3 e 2.1.

Tabela 15 Avaliação sísmica na direção X pelo Método I para diferentes zonas sísmicas do continente e solo B

Piso		Zona sísmica										
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
1	Capacidade	0,086										
	$\frac{A_{PC,x}}{A_{Piso}}$	0,086										
	Exigido	0,151	0,128	0,100	0,080	0,045	0,022	0,091	0,079	0,082	0,053	0,041
	$\frac{\alpha_E}{\beta}$											

(*) Estado limite de danos severos (SD) de acordo com a NP EN 1998-3:2017 para edifícios correntes.

Agradecimentos

Trabalho realizado no âmbito da Tese de Doutoramento financiada pela Fundação para Ciência e Tecnologia (FCT) - PD/BD/135325/2017.

Referências

- [1] “Decreto-Lei n.o 95/2019
(<https://dre.pt/pesquisa/-/search/123279819/details/maximized>),” 2019.
- [2] “Portaria n.o 302/2019
(<https://dre.pt/home/-/dre/124642991/details/maximized>),” 2019.
- [3] “NP EN 1998-3:2017 – Eurocódigo 8 – Projeto de Estruturas para Resistência aos Sismos – Parte 3: Avaliação e Reabilitação de Edifícios.” Instituto Português da Qualidade, 2017.
- [4] Ferry Borges, J.; Castanheta, M. – “Structural safety.” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Curso 101, 3.ª Edição, Lisboa, Portugal, 1985.
- [5] Bernardo, V.; Campos Costa, A.; Costa, A.; Catarino, J.M.; Candeias, P. – “Métodos expeditos para avaliação sísmica de edifícios de alvenaria com pavimentos rígidos.” *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. Ed. LNEC. Série III. n.º 14, 2020.
- [6] “NP EN 1998-1:2010 – Eurocódigo 8 – Projeto de Estruturas para Resistência aos Sismos – Parte 1: Regras Gerais, Ações Sísmicas e Regras para Edifícios.” Instituto Português da Qualidade, 2010.
- [7] “NP EN 1990:2009 – Eurocódigo 0 – Bases para o projeto de estruturas.” Instituto Português da Qualidade, 2009.
- [8] Candeias, P.; – “General aspects of the application in Portugal of Eurocode 8 – Part 3 – Annex C (Informative) – Masonry Buildings,” *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. RPEE série III , n.º 12, Lisbon, Portugal [in Portuguese], 2020.
- [9] Lagomarsino, S.; Penna, A.; Galasco, A.; Cattari, S. – “TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings,” *Eng. Struct.*, 2013.

