

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

Rapid methods for seismic assessment of existing masonry buildings with rigid 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 rígidos, 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 rigid floors, without explicit numerical analysis, using only geometric parameters (Method I) as well as together with the material mechanical properties (Method II).

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

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

Na presente versão foram retificadas as expressões (5) e (7). Esta versão substitui a publicada em novembro de 2020.

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 rígidos. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 14. ISSN 2183-8488. (novembro 2020) 111-128.

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], sempre que se verifique uma das seguintes condições nas obras de ampliação, alteração ou reconstrução: i) existência de sinais evidentes de degradação da estrutura do edifício; ii) procedam ou tenham por efeito uma alteração do comportamento estrutural do edifício; iii) cuja área intervencionada, incluindo demolições e ampliações, exceda os 25% da área bruta de construção do edifício; e iv) cujo custo de construção exceda em pelo menos 25% o custo de construção nova de edifício equivalente. A avaliação da vulnerabilidade sísmica de um edifício é ainda obrigatória no caso de edifícios das classes de importância III ou IV, definidas nos termos da norma NP EN 1998-1:2010 [3] (escolas, salas de reunião, instituições culturais, hospitais, quartéis de bombeiros, centrais elétricas), sempre que se verifique alguma das situações atrás descritas, com redução para 15% dos limites referidos de 25%.

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 [4]. 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 [5]), 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, 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.

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 rígidos. As metodologias propostas são válidas para todo o território nacional e para a ação sísmica tipo 1

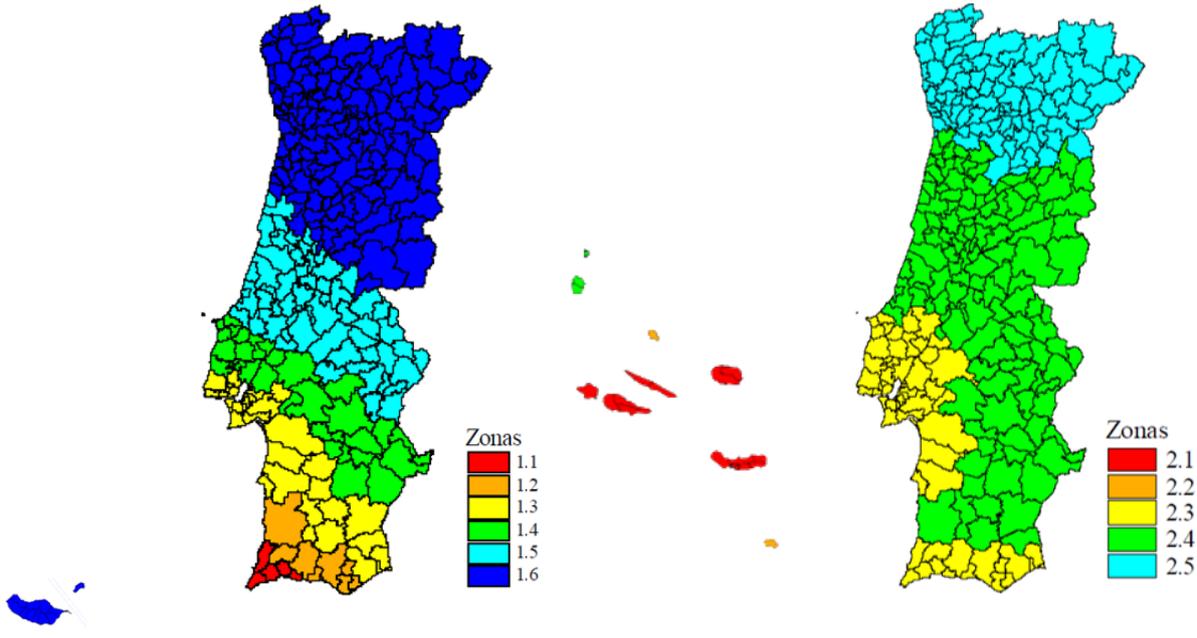


Figura 1 Zonamento Sísmico para o território nacional (NP EN 1998-1:2010)

(afastada) e tipo 2 (próxima) definidas na NP EN 1998-1:2010, Figura 1, não podendo ser extrapoladas para outros tipos de ações, estruturas ou pavimentos, ou ainda para efeitos de dimensionamento de estruturas novas ou reforçadas.

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.

O Método IV corresponde a uma análise explicitamente probabilística e de elevada complexidade, sendo a sua aplicação recomendada apenas a estruturas com Classe de Importância III ou IV, definidas de acordo com a NP EN 1998-1:2010 (ver Tabela 1). Este método permite quantificar níveis de desempenho sísmico com maior precisão e rigor, nomeadamente em relação ao nível de dano e operacionalidade expectável para diferentes níveis de intensidade sísmica. Dada a sua especificidade, o Método IV não será apresentado no presente documento, podendo mais informação acerca deste ser consultada em bibliografia (Cornell & H.S. Ang [6]). Em relação ao Método III, define-se como o método de avaliação de referência e corresponde ao preconizado na NP EN 1998-3:2017. Os métodos expeditos I e II, resumidos no capítulo 4, foram desenvolvidos à luz do método de referência (Método III) e com procedimentos do Método IV, de forma a que os resultados das avaliações sejam conservativos, em função dos parâmetros de avaliação, e

apresentem conformidade com as disposições regulamentares. A Tabela 2 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 3 resume os princípios e critérios de aplicabilidade para a utilização dos métodos de avaliação expeditos.

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.

Do ponto de vista da ação sísmica, a avaliação dos edifícios existentes é efetuada através da limitação de danos para um determinado estado limite, associado a um período de retorno da ação sísmica. A NP EN 1998-3:2017 define três estados limites em função da classe de importância do edifício: i) Estado limite de colapso iminente (NC); ii) Estado limite de danos severos (SD); e iii) Estado limite de limitação de dano (DL). Os métodos expeditos são válidos para as classes de importância I e II, de acordo com NP EN 1998-1:2010, com

Tabela 1 Classes de importância para edifícios

Classe de importância	Edifícios	Métodos propostos
I	Edifícios de importância menor para a segurança pública, como por exemplo edifícios agrícolas, etc.	Todos
II	Edifícios correntes não pertencentes às outras categorias.	
III	Edifícios cuja resistência sísmica é importante atendendo às potenciais consequências associadas ao seu colapso, como por exemplo escolas, salas de reunião, instituições culturais, etc.	Método III e IV
IV	Edifícios cuja integridade em caso de sismo é de importância vital para a proteção civil, como por exemplo hospitais, quartéis de bombeiros, centrais elétricas, etc.	

Tabela 2 Principais requisitos e parâmetros de avaliação para os Métodos 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		

Tabela 3 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	Rígido no plano	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 geotecnicas locais	Restringido aos solos Tipo A, B e C (NP EN 1998-1:2010)	Todos de acordo com a NP EN 1998-1:2010
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.

a salvaguarda de que o estado limite correspondente à avaliação do edificado será para a limitação de danos severos (SD), i.e., com probabilidade de excedência de 15% em 50 anos, equivalente a um período de retorno de 308 anos.

3.2 Requisitos para aplicação dos métodos expeditos

3.2.1 Requisitos gerais

Os métodos expeditos (Método I e II) de avaliação destinam-se exclusivamente a edifícios de habitação em alvenaria com pavimentos rígidos, 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 (ver Tabela 1).

3.2.2 Requisitos estruturais e arquitetónicos

As metodologias expeditas são válidas para todas as alvenarias tradicionais desde que se verifique o comportamento rígido dos pavimentos. Entende-se por pavimentos rígidos aqueles cuja resistência e rigidez no seu plano garanta um comportamento de diafragma rígido para ações sísmicas. Por exemplo, os edifícios de alvenaria com laje maciça em betão armado em que se garanta a ligação das lajes às paredes de suporte e que permitam deslocamentos uniformes ao nível do piso podem ser avaliados por estas metodologias.

Os métodos que se apresentam são também aplicáveis a edifícios com pavimentos de madeira ou outros tipos de pavimentos, desde que se verifique o comportamento rígido no plano e um comportamento monolítico do conjunto das paredes resistentes às forças horizontais (*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 meias ou de empena sem aberturas e contínuas em toda a altura do edifício.

As disposições regulamentares dispostas na 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 meia

$\left(\Delta h \leq \frac{2}{3}t\right)$, conforme ilustrado na Figura 2.

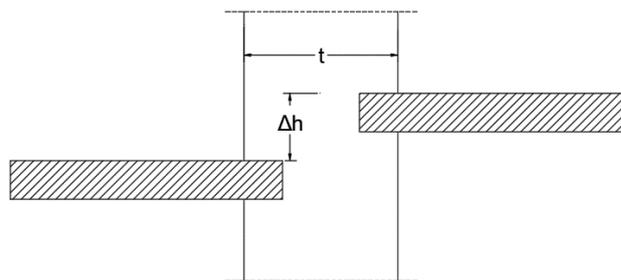


Figura 2 Requisito construtivo entre edifícios contíguos para a aplicação dos métodos expeditos

3.2.3 Requisitos geotécnicos

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 outros tipos de terrenos a avaliação deverá ser realizada através do método de referência (Método III), sendo aconselhável análises adicionais na presença de solos moles ou especiais, de forma a quantificar eventuais vulnerabilidades ao nível do solo (e.g. liquefação dos terrenos).

A avaliação pelos métodos expeditos pressupõe o comportamento monolítico da fundação, garantindo que a imposição dos movimentos sísmicos ao longo da base das paredes estruturais ocorra sem grandes deformações do sistema de fundação.

Relativamente à topografia local do terreno, verifica-se através de evidências de sismos anteriores que os edifícios localizados em encostas ou zonas de declive elevado são mais suscetíveis a danos estruturais [7], [8], pelo que se restringe a utilização dos métodos expeditos a edifícios cujas fundações das paredes se encontrem niveladas. Os pisos totalmente enterrados poderão ser excluídos da análise.

Resumem-se na Tabela 3 os princípios e critérios gerais de aplicabilidade para os métodos de avaliação I, II e III.

4 Descrição das metodologias de avaliação

Nesta secção apresenta-se sucintamente o método de referência (Método III), definido na NP EN 1998 3:2017, e os procedimentos para aplicação dos métodos expeditos (Métodos I e II).

4.1 Método de referência (Método III)

O método de referência (Método III) corresponde ao processo de avaliação preconizado pela NP EN 1998 3:2017, pelo que nesta secção se apresenta uma descrição sucinta dos principais aspetos relacionados com a avaliação dos edifícios de alvenaria existentes (Anexo C). Mais informações, nomeadamente relacionadas com aspetos gerais da sua aplicação, podem ser consultadas na respetiva norma ou em Candeias *et al.* [9]. A Tabela 4 sumariza os principais aspetos na avaliação pelo Método III.

Tabela 4 Aspectos gerais para avaliação através do método de referência (Método III)

	Análise Local	Análise Global
Métodos de análise	Linear (forças laterais ou análise modal por espectro de resposta)	Linear ou não linear (estáticas ou dinâmicas)
Nível de Conhecimento (KL) e Coeficiente de Confiança (CF) (depende da informação obtida no edifício)	Limitado (KL1): CF = 1,35	Normal (KL2): CF = 1,20 Integral (KL3): CF = 1,00
	Normal (KL2): CF = 1,20	
	Integral (KL3): CF = 1,00	
Estados Limite (depende da classe de importância e nível de conhecimento)	Limitação de Danos (DL): $T_r = 73$ anos (classe: III e IV)	Limitação de Danos (DL): $T_r = 73$ anos (classe: III e IV)
		Danos Severos (SD): $T_r = 308$ anos (classe: todas)
		Colapso Iminente (NC): $T_r = 975$ anos (classe: III e IV)
Avaliação (propriedades médias μ)	Elementos "dúcteis" $\frac{\mu}{CF}$	Linear: corte basal (válido apenas para DL)
	Capacidade resistentes na cedência e em deformação	Não linear: deslocamento no topo e verificação em deformação (SD e NC) ou resistência (DL)
		Linear: corte basal (válido apenas para DL)
	Elementos "frágeis" $\frac{\mu}{CF \cdot \gamma_m}$	Capacidade resistente na cedência

4.1.1 Princípios fundamentais

A metodologia geral contemplada na NP EN 1998-3:2017, para a avaliação do desempenho (*Performance Based Assessment*) de edifícios existentes, é realizada através da verificação da segurança para diferentes estados limites associados a um determinado período de retorno (T_r). Em Portugal, tendo em conta a perigosidade sísmica do território Nacional, são definidos três estados limites que deverão ser avaliados em função do Nível de Conhecimento (KL) da estrutura: Limitação de Danos (DL), Danos Severos (SD) e Colapso Iminente (NC), que correspondem a uma probabilidade de excedência em 50 anos de, respetivamente, 50% ($T_r = 73$ anos), 15% ($T_r = 308$ anos) e 5% ($T_r = 975$ anos).

Relativamente ao Nível de Conhecimento (KL) da estrutura, que reflete indiretamente as incertezas epistémicas na caracterização do edifício, nomeadamente aspetos relacionados com a geometria e caracterização dos materiais, são estabelecidos três níveis que traduzem o grau de incerteza na avaliação do edifício, em função da informação obtida (nível de inspeção e ensaios *in situ*): Conhecimento Limitado (KL1), Conhecimento Normal (KL2) e Conhecimento Integral (KL3), com os respetivos coeficientes de confiança de 1.35, 1.20 e 1.00.

4.1.2 Aspectos gerais da avaliação

A avaliação da segurança sísmica é realizada através de um critério de conformidade, considerando as exigências regulamentares e

a capacidade do edifício. Em termos de capacidade, os elementos resistentes à ação sísmica podem apresentar a formação de mecanismos "dúcteis" ou "frágeis". A avaliação dos elementos "dúcteis" deverá ser em termos de capacidade de deformação, enquanto para elementos "frágeis" a verificação é efetuada em termos de capacidade resistente. A capacidade máxima na cedência deverá ser avaliada para ambos os elementos considerando o estado limite DL ($T_r = 73$ anos). No caso de elementos "dúcteis", deverá também ser verificada a capacidade de deformação para os estados limite SD ($T_r = 308$ anos) e NC ($T_r = 975$ anos). A verificação de cada estado limite será em função da classe de importância. Por exemplo, em edifícios de alvenaria pertencentes à classe de importância II, é apenas necessária a verificação para o estado limite de danos severos (SD).

Além desta classificação, os elementos podem ser considerados como elementos "sísmico primários" (e.g. paredes de fachada, paredes de empena ou paredes interiores com função resistente) e elementos "sísmicos secundários" (e.g. paredes divisórias sem função resistente). A contribuição da rigidez dos elementos "sísmico secundários", na direção da ação sísmica, não deverá ser superior a 15% da rigidez concedida pelos elementos "sísmico primários".

Em relação às propriedades dos materiais consideradas na avaliação, deverão ser utilizados os valores médios obtidos em ensaios *in situ* ou, na sua ausência, os valores recomendados da Tabela 6. No caso de elementos "sísmico primários", as propriedades médias deverão ser divididas pelos respetivos coeficientes de confiança, associados

ao Nível de Conhecimento (KL). Se estes elementos forem suscetíveis a mecanismos de rotura “frágeis” deverão também ser divididos por um coeficiente parcial de segurança (γ_m), de acordo com o disposto em NA. 2.2.1(7)P da NP EN 1998-3:2017.

4.1.3 Avaliação da segurança

Os métodos de análise para a avaliação dos edifícios de alvenaria de acordo com o Método III dependem do nível de conhecimento (KL). Quando o nível de conhecimento for limitado (KL1) deverão ser utilizados métodos de análise lineares (forças laterais equivalentes ou análise modal por espectro de resposta) sem redução do valor espectral da ação sísmica considerada. Para níveis de conhecimento normal (KL2) e integral (KL3), são permitidas análises lineares e não lineares.

O processo de avaliação é determinado pelo tipo de análise (linear ou não linear) e pode ser realizado ao nível dos elementos (análise local) ou da estrutura (análise global). As análises lineares são admissíveis para todos os níveis de conhecimento (KL1, KL2 e KL3) e recorrem a métodos de análise lineares, enquanto para análises globais deverá ser garantido o nível de conhecimento KL2 ou KL3. Por exemplo, no caso de análises globais estáticas não lineares, é requerida a curva

de capacidade do edifício em termos de força basal e descolamento no topo, até ser atingido 80% da força máxima após a cedência. Os estados limites são definidos nessa curva para uma determinada ação sísmica e comparados com as exigências regulamentares.

4.2 Métodos expeditos

4.2.1 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 3. 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, nomeadamente: dimensões em planta; dimensões em altura; espessura de paredes; aberturas das paredes; geometria das áreas habitadas e de circulação. Na Figura 3 apresentam-se exemplos de configurações geométricas genéricas para os edifícios de alvenaria.

Os edifícios foram analisados pelo método global preconizado na NP EN 1998-1:2010, recorrendo a análises estáticas não lineares. No

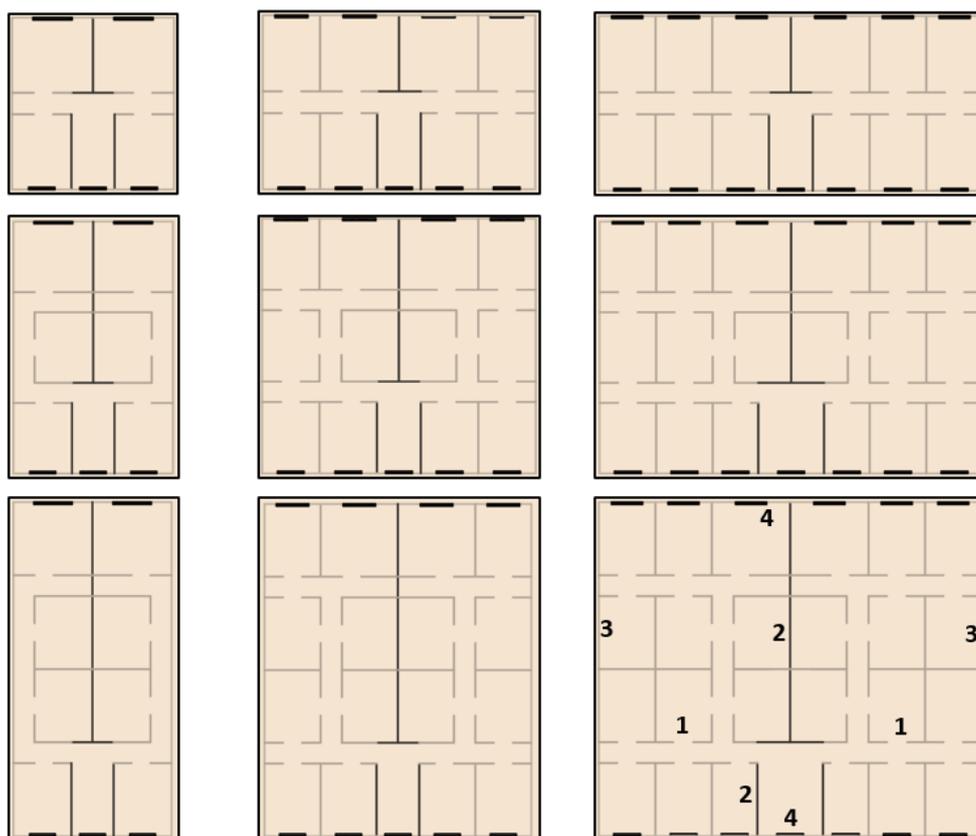


Figura 3 Plantas tipo de edifícios de alvenaria com indicação de vários tipos de parede: 1) paredes interiores divisórias com função resistente ou não; 2) paredes interiores resistentes entre alojamentos e núcleos de escada; 3) paredes de empena; 4) paredes de fachada

total, foram gerados 9000 edifícios, com variação nas características mecânicas dos materiais, cobrindo assim uma vasta gama de valores admissíveis. Os pontos de desempenho de cada edifício foram determinados para todas as zonas sísmicas do país, em solos dos Tipos A, B e C, e períodos de retorno até 5000 anos. Deste modo, verificou-se quais as estruturas que estavam em conformidade com a disposto na NP EN 1998-3:2017, em particular para o estado limite de danos severos (SD) exigido para edifícios correntes (classe de importância II). À parte, foi conduzido um estudo de fiabilidade que inclui a fragilidade dos edifícios e a perigosidade sísmica, permitindo assim obter a probabilidade de exceder o valor máximo de resistência ou deformação e estabelecer a relação entre o índice de fiabilidade e o coeficiente sísmico.

As metodologias propostas surgem no seguimento destas análises que, devidamente calibradas com testes de confiança, podem ser mais ou menos conservativas em função do conhecimento do edifício e dos parâmetros disponíveis para a avaliação (consultar Tabela 2). Dois níveis de métodos expeditos foram definidos e podem ser aplicados na avaliação de edifícios existentes de alvenaria: (i) Método I, com base na relação entre a área de paredes na direção da ação considerada e a área do piso; (ii) Método II, baseado no coeficiente sísmico do edifício dado pelo corte basal dividido pela massa da estrutura. Tendo em conta os parâmetros de avaliação necessários para a aplicação do Método I, os valores de exigência serão mais conservativos em comparação com o Método II.

4.2.2 Procedimentos gerais

A aplicação dos métodos expeditos (Métodos I e II) só é válida se, para além dos requisitos gerais apresentados na Tabela 3, 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 4):

- 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;
 - 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;
 - 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 meeiras 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 0,15 m.
 - 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 (ver expressão 9), de acordo com a NP EN 1990:2009 [10] e NP EN 1998-1:2010
 - As cargas verticais gravíticas transmitidas às paredes resistentes poderão ser estimadas através de modelos de cálculo simplificados. Na ausência destes poderão ser consideradas linhas de rotura a 45.º no caso de lajes em betão armado nas duas direções. 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;

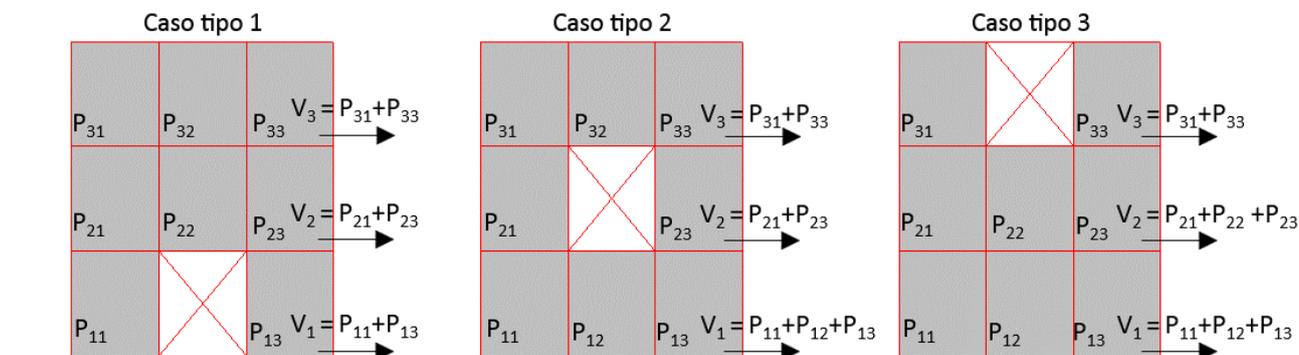


Figura 4 Representação esquemática das paredes a considerar na avaliação em caso de demolições parciais

Tabela 5 Exemplos de propriedades de alguns tipos de alvenaria (Candeias *et al.* [9]).

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 volumico.

- As propriedades médias dos materiais a utilizar na avaliação da segurança pelo Método II deverão ser obtidas através de ensaios *in situ*, divididas pelo respeito 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 5, 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 (CF = 1,35).

4.2.3 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 ($CS_{c,j}$) for igual ou superior ao coeficiente sísmico exigido ($CS_{E,j}$), de acordo com a expressão (1):

$$CS_{c,j} \geq CS_{E,j} \quad (1)$$

Tabela 6 Valores do coeficiente sísmico global exigidos CS_E 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.

4.2.3.1 Exigência estrutural relativamente à ação sísmica

Os valores do coeficiente sísmico exigido (CS_E) são apresentados na Tabela 6, em função do número de pisos, zona sísmica e tipo de terreno. Os valores do coeficiente sísmico a considerar ao nível de cada piso ($CS_{E,j}$), deverão ser corrigidos por um coeficiente η_j , cujos valores são definidos na Tabela 7, através da expressão (2):

$$CS_{E,j} = \eta_j \cdot CS_E \quad (2)$$

Tabela 7 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

4.2.3.2 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: flexão V_{fjk} , corte diagonal V_{cdk} e deslizamento V_{clk} . O coeficiente sísmico resistente CS_C a comparar com a exigência CS_E é definido pelo quociente entre a resistência horizontal de um piso $V_{H,j}$ e o peso total do edifício W_E , correspondente à combinação sísmica de ações, e corrigido para ter em conta a redistribuição das forças de inércia e efeitos não lineares na estrutura, de acordo com a seguinte expressão:

$$CS_{C,j} = \begin{cases} 0.50 \cdot CS^{(1-1.50 \cdot CS)}, & CS \leq 0.825 \\ 0.52, & CS > 0.825 \end{cases} \quad (3)$$

com:

$$CS = \frac{V_{H,j}}{W_E} = \frac{\sum_{i=1}^n \min(V_{fjk,i}, V_{cdk,i}, V_{clk,i})}{W_E} \quad (4)$$

em que:

$V_{fjk,i}$, $V_{cdk,i}$, $V_{clk,i}$ – resistência à flexão, ao corte diagonal e ao deslizamento, respetivamente, de cada parede i num dado piso j ;

W_E – peso total do edifício para a combinação sísmica de ações (ver equação 9).

A resistência de cada parede i devido aos mecanismos de flexão (5), corte diagonal (6) e deslizamento (7) pode ser determinada, respetivamente, através das seguintes expressões:

$$V_{fjk,i} = \frac{\sigma_0 \cdot t \cdot l^2 \left(1 - 1.15 \cdot \frac{\sigma_0}{f_k}\right)}{2 \cdot \alpha \cdot h} \quad (5)$$

$$V_{cdk,i} = l \cdot t \cdot \frac{f_{tk}}{b} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{f_{tk}} + 1} \quad (6)$$

$$V_{clk,i} = l \cdot t \cdot (f_{v0k} + \mu \cdot \sigma_0) \quad (7)$$

em que:

t – espessura da parede;

l – largura da parede (comprimento total da parede descontando as aberturas de passagem);

h – altura da parede;

α – condições de apoio nas extremidades da parede ($\alpha = 0.5$);

b – fator para ter em conta a distribuição das tensões na parede ($b = h/l$, $1.0 \leq b \leq 1.5$);

N – esforço normal a atuar na parede;

σ_0 – tensão de compressão normal;

f_k – resistência à compressão da alvenaria;

f_{v0k} – resistência inicial ao corte (coesão) da alvenaria;

f_{tk} – resistência à tração diagonal da alvenaria (na ausência de valores considerar $f_{tk} = 1.5 f_{v0k}$);

μ – coeficiente de atrito da alvenaria (na ausência de informação considerar $\mu = 0.4$);

Como simplificação, poderá ser considerada uma tensão de compressão média nas paredes, $\sigma_{0med,j}$ ao nível do piso j , dada por:

$$\sigma_{0med,j} = \frac{N_{total,j}}{A_{parede,j}} \quad (8)$$

A massa de cada piso j , a considerar no cálculo do coeficiente sísmico deverá estar de acordo com o disposto na cláusula 3.2.4 da NP EN 1998-1:2010, para a seguinte combinação da ação sísmica, $w_{-}(E,j)$:

$$W_{E,j} = \sum G_{k,j} + \sum (\Psi_{E,m} q_{k,m})_j \quad (9)$$

em que as ações permanentes, $G_{k,j}$, devem ser definidas de acordo com a memória escrita do projeto (no caso de existir) ou regulamentos aplicáveis no período de construção, devendo ser verificadas com observações realizadas *in situ*. As ações de caráter variável, $q_{k,m}$, deverão respeitar o disposto na Tabela 8.

O coeficiente de combinação para as ações sísmicas, $\Psi_{E,m}$, deve ser determinado com base na seguinte expressão:

$$\Psi_{E,m} = \Phi \cdot \Psi_{2,m} \quad (10)$$

em que os valores de Φ e $\Psi_{2,m}$, apresentados na Tabela 9 e Tabela 10, respetivamente, dependem do tipo de categoria do edifício conforme especificado na cláusula 6.3.1.1 da NP EN 1991-1-2:2009 [11].

Tabela 8 Valores característicos para sobrecargas distribuídas (q_k) e concentradas (Q_k) em edifícios

Categorias de zonas carregadas	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Categoria A		
Pavimentos	1,5 a <u>2,0</u>	<u>2,0</u> a 3,0
Escadas	<u>2,0</u> a 4,0	<u>2,0</u> a 4,0
Varandas	<u>2,5</u> a 4,0	<u>2,0</u> a 3,0
Categoria B		
	2,0 a <u>3,0</u>	1,5 a <u>4,5</u>
Categoria C		
C1	2,0 a <u>3,0</u>	3,0 a <u>4,0</u>
C2	3,0 a <u>4,0</u>	2,5 7,0 (<u>4,0</u>)
C3	3,0 a <u>5,0</u>	<u>4,0</u> a <u>7,0</u>
C4	4,5 a <u>5,0</u>	3,5 <u>7,0</u>
C5	<u>5,0</u> a 7,5	3,5 a <u>4,5</u>
Categoria D		
D1	<u>4,0</u> a 5,0	3,5 a 7,0 (<u>4,0</u>)
D2	4,0 a <u>5,0</u>	3,5 a <u>7,0</u>

Nota: A sublinhado, os valores recomendados para aplicação separada de q_k e Q_k

Tabela 9 Valores de ψ_z para o cálculo de $\psi_{E,m}$

Categoria	ψ_z
Categoria A: zonas de habitação	0,3
Categoria B: zonas de escritórios	0,3
Categoria C: zonas de reunião de pessoas	0,6
Categoria D: zonas comerciais	0,6
Categoria E: zonas de armazenamento	0,8
Categoria F: zonas de tráfego (peso dos veículos ≤ 30 kN)	0,6
Categoria G: zonas de tráfego (30 kN < peso dos veículos ≤ 160 kN)	0,3
Categoria H: coberturas	0

Tabela 10 Valores de ψ_z para o cálculo de $\psi_{E,m}$

Tipo de ação variável	Piso	ψ
Categorias A-C	Cobertura	1,0
	Pisos com ocupações correlacionadas	0,8
	Pisos com ocupações independentes	0,5
Categorias D-F e arquivos	Todos	1,0

4.2.4 Avaliação da segurança pelo Método I

O Método I permite a avaliação da segurança da 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 ($A_{p,j}$) e a área do piso ($A_{piso,j}$) for igual ou superior às exigências definidas na , de acordo com a seguinte expressão:

$$\frac{A_{pC,j}}{A_{piso,j}} \geq \frac{\alpha_E}{\beta} \quad (11)$$

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 11);

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

$$\beta = \frac{f_{v0,min}}{0,10 \text{ MPa}} \leq 2,0 \quad (12)$$

O valor mínimo da coesão ($f_{v0,min}$) pode ser obtido de acordo com a Tabela 5, 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:

$$f_{v0,med} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot f_{v0,min,i})}{\sum_{i=1}^n A_i} \leq 0,20 \text{ MPa} \quad (13)$$

A verificação do edifício ao nível de cada piso poderá realizada considerando as exigências α_E da Tabela 11 corrigidas pelo coeficiente η_j , definidos na Tabela 8, e de acordo com a seguinte expressão:

$$\alpha_{E,j} = \alpha_E \cdot \eta_j \quad (14)$$

Tabela 11 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	0,20	0,27	0,32	0,19	0,24	0,28	0,18	0,23	0,26	0,17	0,21	0,24	0,16	0,20	0,22
	1.2	0,16	0,22	0,26	0,15	0,20	0,23	0,14	0,19	0,22	0,14	0,18	0,20	0,13	0,17	0,19
	1.3	0,11	0,16	0,19	0,11	0,15	0,18	0,10	0,14	0,17	0,10	0,14	0,16	0,10	0,14	0,16
	1.4	0,09	0,12	0,15	0,08	0,12	0,14	0,08	0,11	0,14	0,08	0,11	0,13	0,08	0,11	0,13
	1.5	0,04	0,06	0,08	0,04	0,06	0,08	0,04	0,06	0,08	0,04	0,06	0,08	0,04	0,06	0,08
	1.6	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04
Açores	2.1	0,22	0,29	0,34	0,19	0,25	0,29	0,15	0,20	0,22	0,11	0,15	0,18	0,09	0,12	0,14
	2.2	0,19	0,25	0,30	0,17	0,23	0,26	0,13	0,18	0,20	0,10	0,13	0,16	0,08	0,11	0,13
Sismo Próximo Continente	2.3	0,19	0,26	0,30	0,17	0,23	0,26	0,14	0,18	0,20	0,10	0,14	0,16	0,08	0,11	0,13
	2.4	0,12	0,17	0,21	0,11	0,16	0,19	0,09	0,13	0,15	0,06	0,09	0,11	0,05	0,07	0,09
	2.5	0,09	0,13	0,17	0,09	0,13	0,15	0,07	0,10	0,12	0,05	0,07	0,09	0,04	0,05	0,07

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 rígido.

5.1 Descrição do edifício

Pretende-se realizar a avaliação sísmica de um edifício existente com pavimentos rígidos, 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 x 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 apoiam as lajes de betão armado com 0,10 m de espessura. 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 5. Considera-se que não existe variação da espessura das paredes em altura.

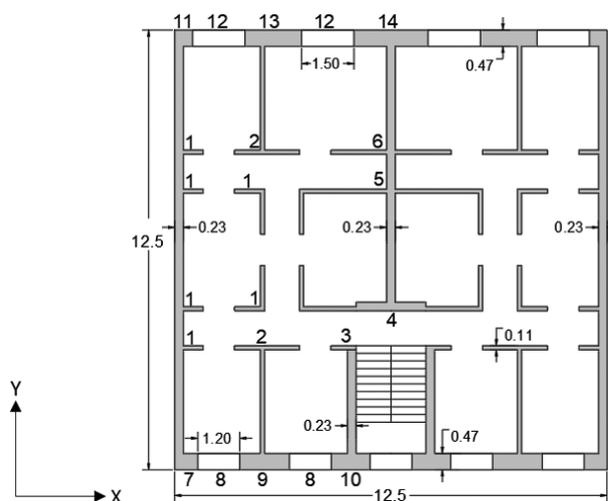


Figura 5 Planta tipo do edifício a avaliar

A título de exemplo, foi considerada uma alvenaria de tijolo com argamassa à base de cimento. Na Tabela 12 apresenta-se as propriedades médias para este tipo de alvenaria com base na informação bibliográfica. Admitiu-se que a informação recolhida

Tabela 12 Propriedades mecânicas das alvenarias

Material	Módulo de elasticidade (E) [GPa]	Módulo de Distorção (G) [GPa]	Resistência à compressão (f_c) [MPa]	Resistência ao corte ($f_{v,or}$) [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	3,0	0,20	0,40	15,0

acerca do edifício e os ensaios realizados *in situ*, permite 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* [12]. 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 transverso. 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 6 apresentam-se as curvas de capacidade do edifício nas duas direções principais e a respetiva bilinearização.

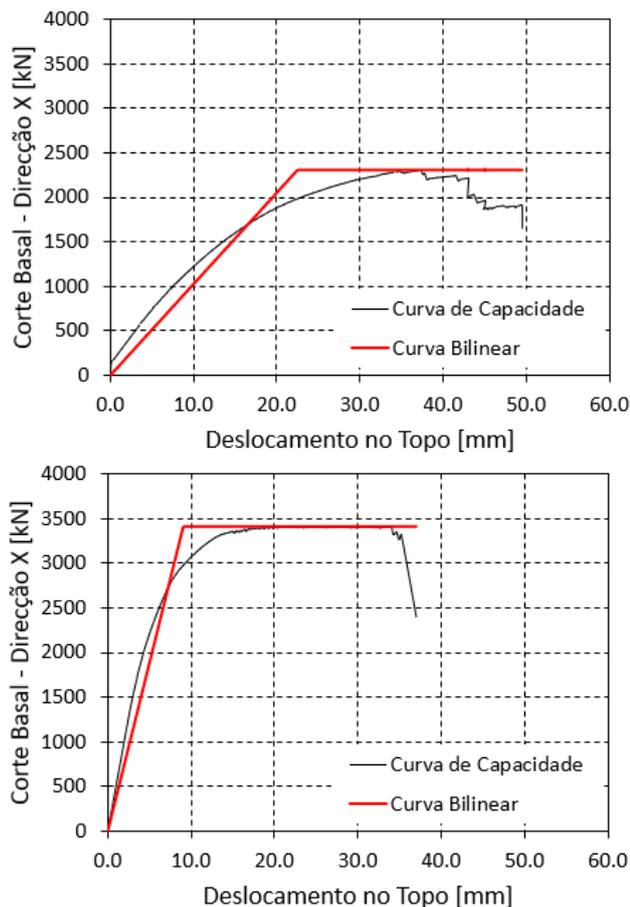


Figura 6 Curva de Capacidade do edifício nas direções principais X e Y.

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 7 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.

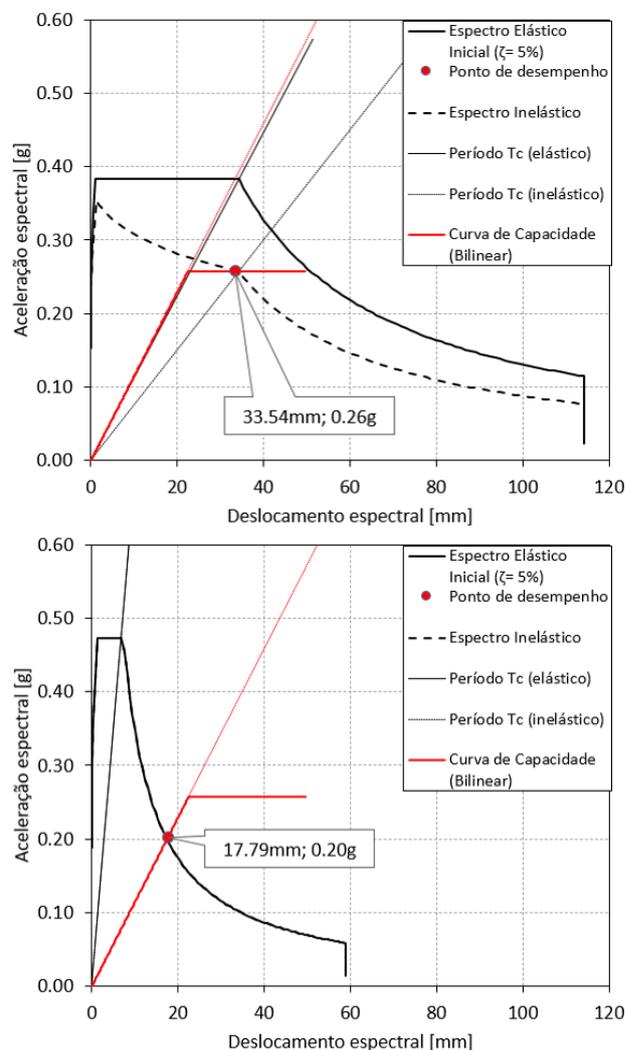


Figura 7 Pontos de Desempenho para a direção X, solo B e zona sísmica 1.3 e 2.3, respetivamente

A verificação da segurança foi também efetuada admitindo que o edifício se encontra em diferentes zonas sísmicas. A Tabela 13 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

Tabela 13 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]	38,0 (*)										
Exigido [mm]	52,4	43,3	33,5	22,5	13,4	7,9	25,7	21,5	17,8	12,0	8,7

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

Tabela 14 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_{flk} [kN]	V_{cdk} [kN]	V_{cdk} [kN]	V_{min} [kN]	Mecanismo Condicionante	$\sum V_{min}$ [kN]	V_{rd} [kN]	C_{sc} [-]
1	12	0,11	0,75	3	6,5	24,3	28,1	6,5	Flexão	77,9	2470	0,25
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 15 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 (C_{sc})	0,25 (*)										
Exigido (C_{sc})	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 16 Coeficiente Sísmico Resistente no piso j para a direção X (CS_{Cj}) e fator de correção η para a exigência sísmica ao nível do piso (CS_{Ej})

Piso j	V_{rd} [kN]	Massa do edifício [ton]	Coeficiente Sísmico Global CS_c [-]	Coeficiente Sísmico Resistente do piso CS_{Cj} [-]	η [-]
1	2470	850	0,25	0,25	1,00
2	2210			0,22	0,90
3	1925			0,19	0,75
4	1600			0,15	0,60
5	1180			0,11	0,45

Tabela 17 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
1	Capacidade (CS_c)	0,25									
	Exigido (CS_e)	0,30	0,26	0,21	0,17	0,10	0,05	0,19	0,16	0,17	0,11
2	Capacidade (CS_c)	0,22									
	Exigido (CS_e)	0,27	0,24	0,19	0,15	0,09	0,04	0,17	0,15	0,15	0,10
3	Capacidade (CS_c)	0,19									
	Exigido (CS_e)	0,23	0,20	0,16	0,13	0,07	0,04	0,14	0,12	0,13	0,08
4	Capacidade (CS_c)	0,15									
	Exigido (CS_e)	0,18	0,16	0,12	0,10	0,06	0,03	0,11	0,10	0,10	0,07
5	Capacidade (CS_c)	0,11									
	Exigido (CS_e)	0,14	0,12	0,09	0,08	0,04	0,02	0,08	0,07	0,08	0,05

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

para todos as zonas do continente, à exceção das zonas 1,1 e 1,2 (assinaladas a vermelho), caracterizadas por uma perigosidade sísmica maior.

5.3 Avaliação pelos métodos expeditos

A aplicação dos métodos expeditos pressupõe o cumprimento dos critérios da Tabela 3 e os procedimentos gerais definidos na secção 4.2.2, 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 (C_{SE}), apresentado na Tabela 6, associado a diferentes sismicidades e condições geotécnicas. A capacidade resistente do edifício é também expressa em termos de um coeficiente sísmico (C_{SE}) que contabiliza os vários mecanismos de rotura que possam ocorrer nas paredes, nomeadamente, flexão ($V_{fkk,i}$), 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 o efeito, foi

considerada uma tensão média de compressão nas paredes de 0.07MPa em cada piso.

Considerando a geometria do edifício definida na planta da Figura 5 e as propriedades mecânicas das alvenarias, apresenta-se na Tabela 14 a resistência das paredes para os vários mecanismos e o respetivo coeficiente sísmico ao nível da base.

A Tabela 15 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 entre a avaliação pelo método expedito II e o método III (Tabela 13).

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 ($C_{SE,j}$) corrigida por um fator λ (ver Tabela 7), 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 16.

Na Tabela 17 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 7.

Apresenta-se na Tabela 18 e Tabela 19, 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 18 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

Tabela 19 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						
	Exigido											
	α_E	0,134	0,115	0,091	0,074	0,043	0,022	0,082	0,072	0,074	0,048	0,037
	β											

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

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 1.3.

6 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 1998-1:2010 – Eurocódigo 8 – Projeto de Estruturas para Resistência aos Sismos – Parte 1: Regras Gerais, Ações Sísmicas e Regras para Edifícios.” Instituto Português da Qualidade, 2010.
- [4] "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.
- [5] Ferry Borges, J.; Castanheta, M. – "Structural safety.” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Curso 101, 3.ª Edição, Lisboa, Portugal, 1985.
- [6] Cornell, C.A.; Ang, A.H.-S. – "Reliability bases of structural safety and design,” *J. Struct. Div.*, 1974.
- [7] Lee, S.T.; Yu, T.T.; Peng, W.F.; Wang, C.L. – "Incorporating the effects of topographic amplification in the analysis of earthquake-induced landslide hazards using logistic regression,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2010.
- [8] xiang Liu, H.; Xu, Q.; rong Li, Y. – "Effect of lithology and structure on seismic response of steep slope in a shaking table test,” *J. Mt. Sci.*, 2014.
- [9] Candeias, P. *et al.* – "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.
- [10] "NP EN 1990:2009 – Eurocódigo 0 – Bases para o projeto de estruturas.” Instituto Português da Qualidade, 2009.
- [11] "NP EN 1991-1:2009 – Eurocódigo 1 – Ações em Estruturas – Parte 1-1: Ações Gerais.” Instituto Português da Qualidade, 2009.
- [12] 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.

