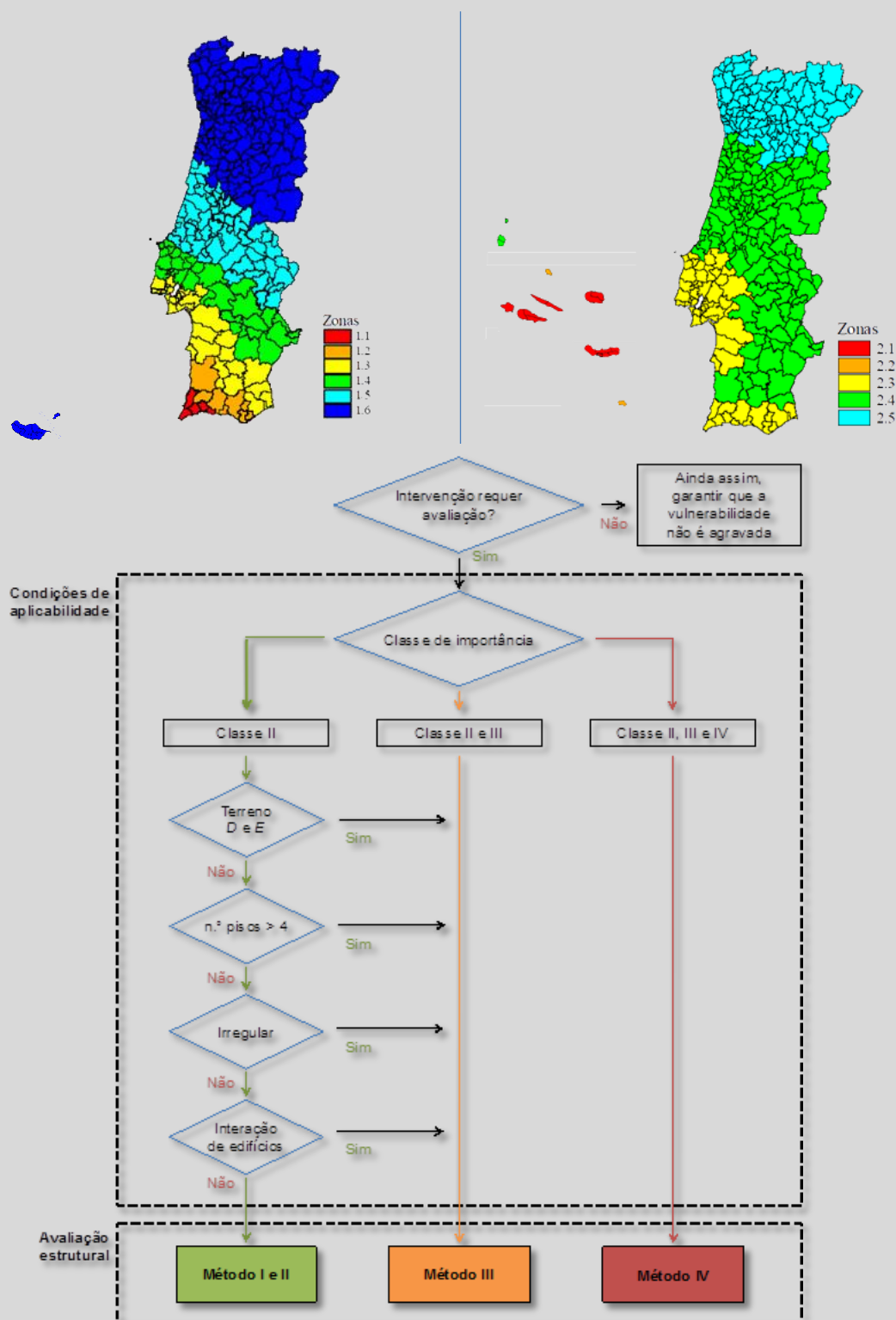


Guião de avaliação da segurança sísmica de edifícios existentes de betão armado



Este guião resulta de uma iniciativa da Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica (SPES) à qual o LNEC deu total apoio tendo sido realizado ao abrigo do *Protocolo de Colaboração no âmbito do Estudo de Procedimentos para Certificação Sísmica de Edifícios Existentes*, de 2014, de cooperação entre ambas as instituições.

Título

Guião de avaliação da segurança sísmica de edifícios existentes de betão armado

Autoria

DEPARTAMENTO ESTRUTURAS

Romain Ribeiro de Sousa

Bolseiro de Investigação, Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas

Alfredo Campos Costa

Investigador Principal, Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas

UNIVERSIDADE DE AVEIRO

Aníbal Costa

Professor Catedrático, RISCO, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Colaboração

SOCIEDADE PORTUGUESA DE ENGENHARIA SÍSMICA (SPES)

João Azevedo

Luís Guerreiro

Xavier Romão

João Estêvão

Daniel Oliveira

Francisco Fernandes

LNEC

José Manuel Catarino

Manuel Pipa

Paulo Candeias

António Correia

Índice

1	Disposições gerais	1
1.1	Objeto e campo de aplicação	1
1.2	Enquadramento dos procedimentos de avaliação sísmica	1
2	CrITÉrios de aplicabilidade dos procedimentos de avaliação sísmica	3
2.1	Classe de importância dos edifícios	3
2.2	Número de pisos	4
2.3	CrITÉrios de regularidade	4
2.3.1	Regularidade em planta	4
2.3.2	Regularidade em altura	5
2.4	Interação com edifícios adjacentes	6
2.5	Condições geotécnicas locais	7
3	Avaliação estrutural	8
3.1	Método de referência	8
3.2	Métodos expeditos	9
3.2.1	Princípios gerais	9
3.2.2	Avaliação da segurança estrutural de acordo com o Método II	10
3.2.3	Avaliação da segurança estrutural de acordo com o Método I	13
	Referências	15

Índice de tabelas

Figura 1.1.	Descrição integrada do procedimento de avaliação	2
Figura 2.1.	Zonamento sísmico da NP EN 1998-1 (2010)	3
Figura 2.2.	CrITÉrios de regularidade dos edifícios com recuos (NP EN1998-1; 2010)	6
Figura 2.3.	Disposições para avaliar a interação com edifícios adjacentes (adaptado de ECPFE / EPPO; 2013)	7

Índice de tabelas

Tabela 1.1.	Resumo dos principais parâmetros e requisitos associados aos métodos de avaliação I, II e III	2
Tabela 2.1.	Classes de importância para edifícios	3
Tabela 3.1.	Valores dos coeficientes sísmicos exigidos (CS_E) para edifícios de 1 a 4 pisos localizados em cada zona sísmica e nos tipos de terreno A, B e C, definidos de acordo com a NP EN 1998 – 1 (2010)	10
Tabela 3.2.	Valores do coeficiente η_j em função do número de pisos do edifício e do piso em análise	10
Tabela 3.3.	Sobrecargas distribuídas (q_k) e concentradas (Q_k) em pavimentos, varandas e escadas de edifícios (NP EN 1991-1-1; 2009)	12
Tabela 3.4.	Valores de ψ_2 para o cálculo de $\psi E, m$ (NP EN 1990, 2009)	13
Tabela 3.5.	Valores de φ para o cálculo de $\psi E, m$ (NP EN1998-1; 2010)	13
Tabela 3.6.	Valores exigidos de área de pilares, em percentagem da área de implantação dos edifícios por zona sísmica e tipo de terreno	14

1 | Disposições gerais

1.1 Objeto e campo de aplicação

O presente guião estabelece regras de aplicabilidade de procedimentos expeditos para a avaliação da segurança sísmica de edifícios existentes de betão armado. As disposições definidas neste documento não podem ser consideradas para efeitos de dimensionamento de elementos estruturais novos ou para o reforço de elementos estruturais existentes.

As metodologias utilizadas para o desenvolvimento dos procedimentos estão descritas no relatório LNEC, Sousa *et al.* (2019).

1.2 Enquadramento dos procedimentos de avaliação sísmica

A avaliação estrutural de edifícios de betão armado pode ser realizada através de 4 metodologias, Método I a IV, que apresentam níveis crescentes de precisão e complexidade. A escolha do método de avaliação a utilizar depende da classe de importância do edifício, das condições geotécnicas locais, da interação com edifícios adjacentes, do número de pisos e da regularidade estrutural (ver Capítulo 2).

Dos 4 métodos admissíveis, o Método III representa o método de avaliação de referência e correspondente à metodologia estabelecida na NP EN 1998-3 (2017). Os procedimentos e parâmetros dos Métodos I e II foram definidos de forma a que os resultados das avaliações conduzam a resultados mais conservativos em relação aos métodos de referência da NP EN 1998-3 (2017). A descrição dos procedimentos associados aos Métodos I e II, bem como um sumário dos procedimentos definidos na NP EN1998-3 (2017) são apresentados no Capítulo 3 |.

A avaliação estrutural pode ainda ser realizada através do Método IV, que corresponde a uma análise explicitamente probabilística. Este método permite quantificar níveis de desempenho sísmico com maior precisão e detalhe, nomeadamente quanto ao nível de dano e operacionalidade expectável para diferentes níveis de intensidade sísmica.

Tendo em conta a complexidade das análises envolvidas no Método IV, a sua aplicabilidade é recomendada apenas a estruturas da Classe de Importância III ou IV. Dada a sua especificidade, os procedimentos associados a este método não são apresentados neste documento, estando descritos detalhadamente no Capítulo 3 no relatório LNEC, Sousa *et al.* (2019). A Tabela 1.1 e a Figura 1.1 apresentam um resumo das principais características dos Métodos I, II e III bem como um fluxograma que descreve as principais etapas do procedimento de avaliação.

Tabela 1.1. Resumo dos principais parâmetros e requisitos associados aos métodos de avaliação I, II e III

	Conhecimento necessário	Parâmetros de avaliação	Modelo estrutural
Método III	- Geometria do edifício - Geometria dos elementos estruturais - Propriedades dos materiais - Disposição das armaduras	- Rotação da corda e resistência ao corte de todos os elementos estruturais	- Preferencialmente modelo não-linear
Método II	- Geometria do edifício - Secção transversal dos pilares - Quantidade e resistência das armaduras longitudinais e transversais	- Coeficiente sísmico	-
Método I	- Geometria do edifício - Secção transversal dos pilares	- Percentagem da área de pilares relativamente à área dos pisos	-

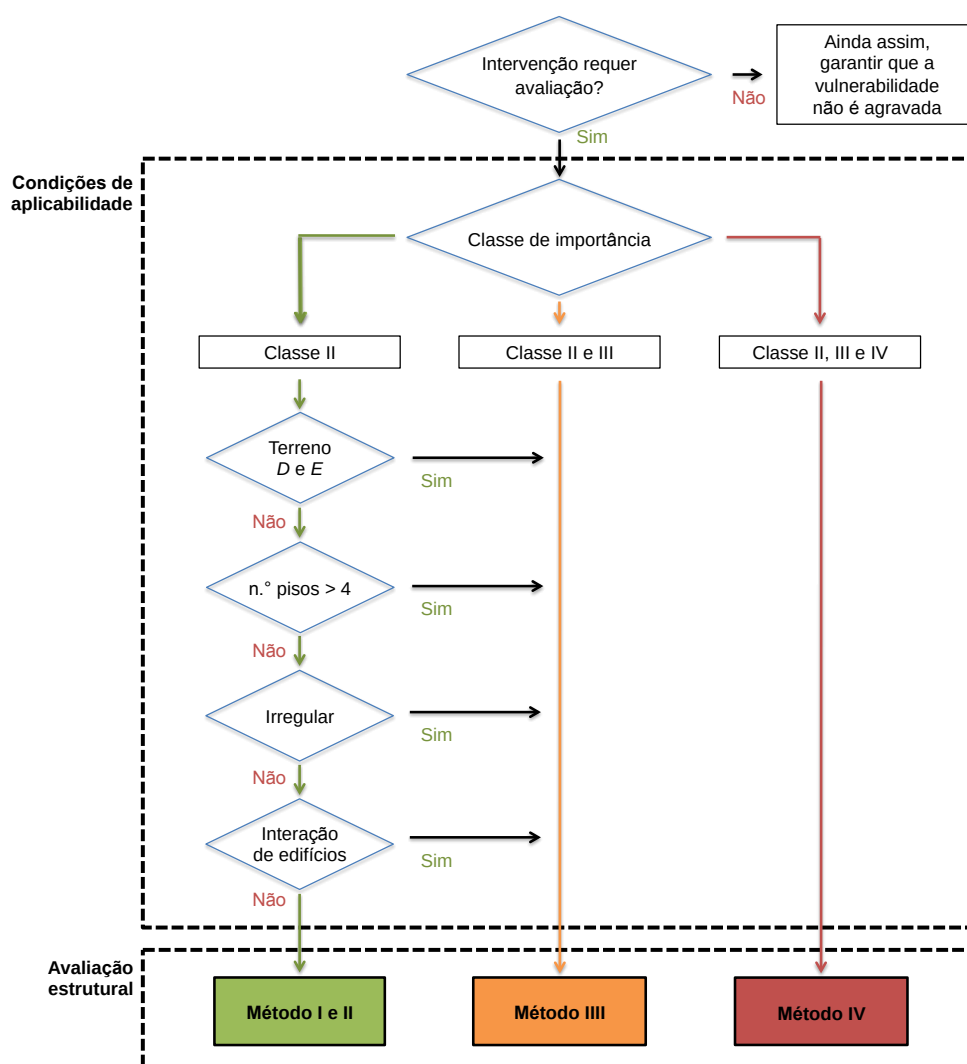


Figura 1.1. Descrição integrada do procedimento de avaliação

2 | Critérios de aplicabilidade dos procedimentos de avaliação sísmica

A escolha dos métodos de avaliação admissíveis depende de 5 critérios, apresentados nas secções seguintes, e que são:

- Classe de importância;
- Número de pisos;
- Regularidade estrutural;
- Interação com edifícios adjacentes;
- Condições geotécnicas locais.

2.1 Classe de importância dos edifícios

A classe de importância dos edifícios é definida de acordo com a Tabela 2.1, à imagem do que é estabelecido na NP EN 1998-1 (2010). Na coluna da direita são apresentados os métodos de avaliação propostos em função da classe de importância*. Na Figura 2.1 apresenta-se o zonamento sísmico da NP EN 1998-1 (2010) como referência para aplicação dos métodos.

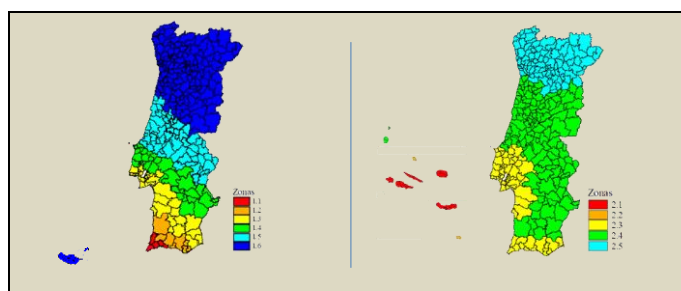


Figura 2.1. Zonamento sísmico da NP EN 1998-1 (2010)

Tabela 2.1. 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.	

* O critério da classe de importância categoriza os edifícios de acordo com a sua relevância tendo em conta as consequências do colapso em termos de vidas humanas, da importância para a segurança pública e para a proteção civil em situações de socorro e emergência após um sismo. Assim, são propostas avaliações por metodologias mais sofisticadas em função dessa relevância. Naturalmente, os métodos de avaliação mais sofisticados podem também ser usados para avaliar edifícios de classes de importância inferiores de forma a obter uma avaliação mais precisa e detalhada.

2.2 Número de pisos

A aplicabilidade dos Métodos I e II restringe-se apenas a edifícios que não excedam 4 pisos * e com área de implantação igual ou inferior a 400 m².

* Piso é definido como cada um dos planos sobrepostos, acima da cota do terreno, nos quais se divide um edifício e que se destinam a satisfazer exigências funcionais ligadas à sua utilização. No contexto de aplicação das presentes metodologias simplificadas, caves ou subcaves totalmente enterradas não são consideradas como pisos.

A limitação do número de pisos pretende garantir que os métodos expeditos são usados apenas em edifícios que apresentem um comportamento dinâmico que não seja condicionado pela contribuição de modos de vibração de ordem superior, cujos efeitos são difíceis de ter em conta através de métodos de análise expeditos.

2.3 Critérios de regularidade

Um edifício é considerado regular se verificar os critérios de regularidade em planta e em altura estabelecidos na NP EN1998-1 (2010), e que se apresentam de forma sucinta nas subsecções seguintes.

Excluem-se da verificação destes critérios de regularidade os edifícios de habitação com 1 ou 2 pisos *.

* Edifícios de habitação com 1 ou 2 pisos são considerados de pequeno porte dada a reduzida esbelteza e elevada compacidade que os caracteriza.

2.3.1 Regularidade em planta

São considerados regulares em planta os edifícios que satisfaçam os seguintes critérios:

- No que se refere à rigidez lateral e à distribuição de massas, a estrutura do edifício deve ser aproximadamente simétrica em planta em relação a dois eixos ortogonais;
- A configuração em planta deve ser compacta, isto é, deve ser delimitada, em cada piso, por uma linha poligonal convexa. Se existirem recuos em relação a essa linha (ângulos reentrantes ou bordos recuados), poderá considerar-se que existe regularidade em planta se esses recuos não afetarem a rigidez do piso no plano e se, para cada um deles, a área entre o contorno do piso e a linha poligonal convexa que o envolve não é superior a 5 % da área do piso;
- A rigidez dos pisos no plano deve ser suficientemente grande em relação à rigidez lateral dos elementos estruturais verticais, para que a deformação do piso tenha um efeito reduzido na distribuição das forças entre os elementos. Assim, as formas L, C, H, I e X em planta deverão ser cuidadosamente examinadas, em particular no que diz respeito à rigidez dos ramos laterais salientes, que deverá ser comparável à da parte central, de forma a satisfazer a condição de diafragma rígido;
- A esbelteza $\lambda = L_{\max}/L_{\min}$ do edifício em planta não deve ser superior a 4, em que $L_{\max}$ e $L_{\min}$ são, respetivamente, a maior e a menor dimensão em planta do edifício, medidas em direções ortogonais;

- A cada nível e para cada direção de cálculo x e y , a excentricidade estrutural e_o e o raio de torção r devem verificar as duas condições seguintes, aqui expressas para a direção de cálculo y :

$$e_{ox} \leq 0.30 \cdot r_x \quad (1)$$

$$r_x \geq l_s \quad (2)$$

em que:

e_{ox} - distância entre o centro de rigidez e o centro de massa, medida segundo a direção x , perpendicular à direção de cálculo considerada (“excentricidade estrutural”);

r_x - raiz quadrada da relação entre a rigidez de torção e a rigidez lateral na direção y (“raio de torção”);

l_s - raio de giração da massa do piso em planta (raiz quadrada da relação entre (a) o momento polar de inércia da massa do piso em planta em relação ao centro de gravidade do piso e (b) a massa do piso).

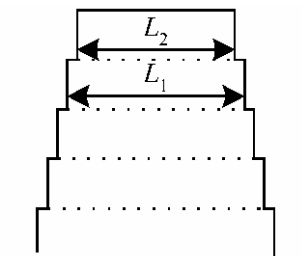
2.3.2 Regularidade em altura

São considerados regulares em altura os edifícios que satisfaçam os seguintes critérios:

- Todos os sistemas resistentes a ações laterais, tais como núcleos, paredes estruturais ou pórticos, são contínuos desde a fundação até ao topo do edifício ou, se existirem andares recuados a diferentes alturas, até ao topo da zona considerada no edifício;
- A rigidez lateral e a massa de cada piso permanecem constantes ou apresentam uma redução gradual, sem alterações bruscas, desde a base até ao topo do edifício;
- Nos edifícios com estrutura porticada, a relação entre a resistência real do piso e a resistência exigida pelo cálculo não deverá variar desproporcionadamente entre pisos adjacentes. Neste contexto, os aspetos particulares das estruturas em pórtico com enchimentos de alvenaria são tratados na cláusula 4.3.6.3.2 da NP EN1998-1 (2010);
- Quando a construção apresenta recuos aplicam-se as seguintes condições adicionais:
 - No caso de sucessivos recuos que mantêm uma simetria axial, o recuo em qualquer piso não deve ser superior a 20 % da dimensão em planta do nível inferior na direção do recuo (ver Figura 2.2(a) e Figura 2.2(b));
 - No caso de um único recuo localizado nos 15 % inferiores da altura total do sistema estrutural principal, o recuo não deve ser superior a 50 % da dimensão em planta do nível inferior (ver Figura 2.2(c)). Neste caso, a estrutura da zona inferior situada no interior da projeção vertical dos pisos superiores deverá ser calculada para resistir a, pelo menos, 75 % da força horizontal que atuaria a esse nível num edifício semelhante sem alargamento da base;

- No caso de recuos não simétricos, a soma, em cada lado, dos recuos de todos os pisos não deve ser superior a 30 % da dimensão em planta ao nível do piso acima da fundação ou acima do nível superior de uma cave rígida, e cada recuo não deve ser superior a 10 % da dimensão em planta do nível inferior (ver Figura 2.2(d)).

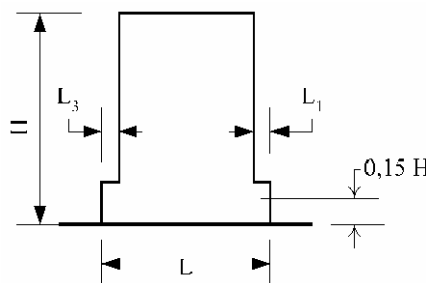
(a) recuos sucessivos



Critério para o recuo em qualquer piso na situação (a):

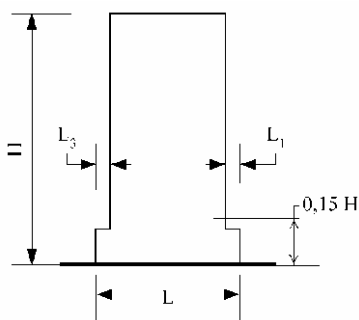
$$\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0.20$$

(b) o recuo localiza-se acima de 0.15 H



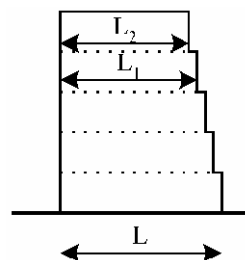
Critério para (b): $\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0.20$

(c) o recuo localiza-se abaixo de 0.15 H



Critério para (c): $\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0.50$

(d) Recuos não-simétricos



Crítérios para (d): $\frac{L - L_2}{L} \leq 0.30$

$$\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0.10$$

Figura 2.2. Critérios de regularidade dos edifícios com recuos (NP EN1998-1; 2010)

2.4 Interação com edifícios adjacentes

Os critérios relativos à interação com edifícios adjacente não se aplicam a edifícios isolados ou a edifícios em que a presença de juntas estruturais permitam uma deformação lateral, sem restrições, correspondente a um deslocamento igual ou superior a 2.2 % da altura do mais baixo de entre o edifício em avaliação e o adjacente.

Em edifícios em banda ou de gaveto, em que as juntas de dilatação não garantam um comportamento dinâmico do edifício independente relativamente a qualquer dos edifícios que lhe sejam adjacentes, os Métodos I e II podem ser aplicados apenas se o edifício satisfizer os limites definidos de acordo com os seguintes aspetos construtivos:

- Alinhamento entre lajes de edifícios adjacentes: considera-se que o(s) edifício(s) adjacente(s) pode(m) interferir com o comportamento sísmico se a sua altura for igual ou inferior a 50 % da altura do edifício a ser avaliado.
- Diferença de altura entre edifícios adjacentes: os efeitos da interação não podem ser desprezados quando a(s) laje(s) do(s) edifício(s) adjacente(s) apresentam um desnível superior aos limites definidos na Figura 2.3.

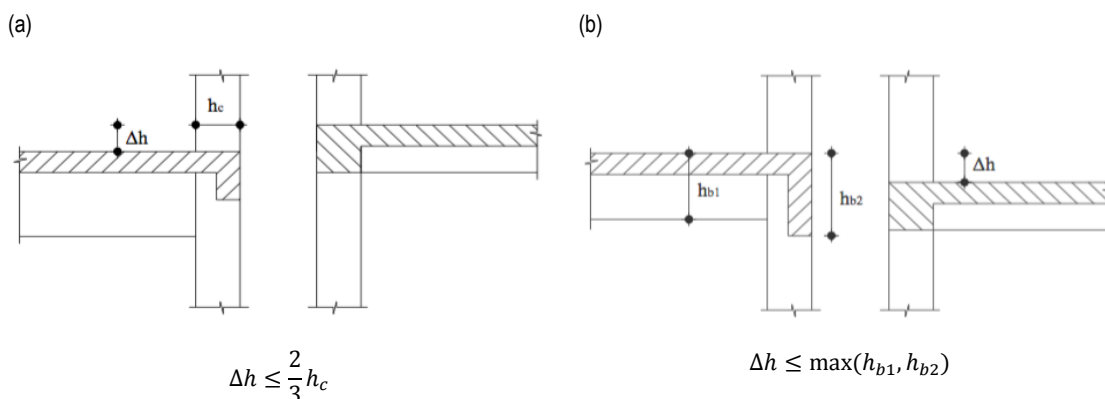


Figura 2.3. Disposições para avaliar a interação com edifícios adjacentes (adaptado de ECPFE / EPPO; 2013)

2.5 Condições geotécnicas locais

Os métodos expeditos I e II são aplicáveis apenas a edifícios situados em terrenos do Tipo A, B ou C, como definidos na NP EN 1998-1 (2010) *.

* Esta regra pretende limitar o uso dos métodos expeditos em estruturas fundadas em terrenos moles ou especiais. Nestes casos é aconselhável a realização de análises adicionais no sentido de avaliar potenciais vulnerabilidades ao nível do solo (e.g., potencial de liquefação) e de quantificar os efeitos de interação solo-estrutura.

3 | Avaliação estrutural

Neste capítulo são apresentadas as linhas gerais do método de referência (Método III), descrito em detalhe na NP EN 1998-3 (2017), bem como os procedimentos relativos aos métodos expeditos (Método I e II).

3.1 Método de referência

O Método III é considerado o método de referência e corresponde ao processo de avaliação detalhado na NP EN 1998-3 (2017). Nesta secção é apresentado apenas um sumário dos procedimentos, não dispensando a consulta da norma em caso de aplicação deste método.

De acordo com este método, e para estruturas das classes de importância I e II, a avaliação da segurança deve ser realizada para o estado limite de Danos Severos (SD, do inglês *Significant Damage*).

Os efeitos das ações devem ser determinados considerando uma ação sísmica correspondente a um período de retorno $T_{SD} = 308$ anos.

A capacidade dos elementos estruturais deve ser verificada tendo em conta possíveis roturas frágeis (resistência ao corte V_R) e dúcteis (rotação da corda θ_u), definidas através das expressões (3) e (4), respetivamente, cujo significado das variáveis pode ser consultado em NP EN 1998-3 (2017).

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\frac{h-x}{2L_V} \min(N, 0.55A_c f_c) + (1 - 0.05 \min(5, \mu_{\Delta}^{pl})) \cdot \left[0.16 \max(0.5, 100\rho_{tot}) \left(1 - 0.16 \min\left(5, \frac{L_V}{h}\right) \right) \sqrt{f_c} A_c + V_w \right] \right] \quad (3)$$

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0.016 (0.3^v) \left[\frac{\max(0.01, w')}{\max(0.01, w)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0.35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1.25^{100 f_d}) \quad (4)$$

O valor de θ_u a considerar para avaliação de segurança para o estado limite de danos severos deve corresponder a $\frac{3}{4}$ do valor determinado através da expressão (4).

Em edifícios cujo comportamento dinâmico possa ser significativamente influenciado por modos de vibração superiores ao modo fundamental em cada direção, deve ser adotado um modelo que permita considerar a contribuição dos diferentes modos (e.g. análise modal por espectro de resposta).

Os resultados de análises lineares podem ser bastante imprecisos quando aplicados a edifícios com irregularidades estruturais, especialmente se estes responderem fora do domínio elástico. Nestes casos, deve ser adotado um modelo não linear.

É recomendado que o modelo numérico considere os painéis de alvenaria como parte do sistema resistente para ações sísmicas, especialmente se estes possam ter um efeito adverso no comportamento global ou local da estrutura (e.g. potenciem o desenvolvimento de mecanismos de *soft storey*).

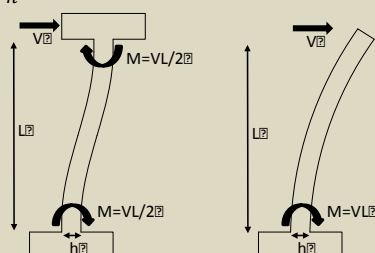
3.2 Métodos expeditos

3.2.1 Princípios gerais

A aplicação dos métodos expeditos, nomeadamente dos Método I e II, apresenta as seguintes características e requisitos:

- A avaliação da segurança não requer a definição de modelos numéricos. A segurança estrutural é avaliada apenas em função das propriedades geométricas (Método I) acrescidas da pormenorização das armaduras dos elementos verticais (Método II);
- Sem prejuízo das restantes condições de aplicabilidade destes métodos, poderá adotar-se a ação sísmica definida para terrenos do Tipo B se a área de construção for igual ou inferior a 1600 m². Define-se área de construção, para efeitos de aplicação destes procedimentos, como o valor resultante do somatório das áreas de todos os pavimentos, acima do solo, medidas pelo extradorso das paredes exteriores com a exclusão das seguintes áreas: sótãos não habitáveis, áreas destinadas a estacionamento, áreas técnicas (PT, central térmica, compartimentos de recolha de lixo, etc.), terraços, varandas e alpendres, galerias exteriores, arruamentos e outros espaços livres de uso público cobertos pelo edifício;
- Para o cálculo da resistência do edifício à ação sísmica devem ser considerados apenas os elementos verticais contínuos ao longo dos pisos desde a fundação até ao último piso;
- A aplicação dos Método I ou II é permitido apenas se, de entre os elementos verticais contínuos, não existirem pilares curtos cuja rotura possa comprometer a estabilidade local ou global da estrutura. São considerados pilares curtos, aqueles que, em virtude da sua geometria ou da interação com elementos estruturais ou não estruturais, apresentem uma relação $\frac{M}{Vh} \leq 2.5$, em que M e V são os esforços atuantes nas extremidades dos elementos para a combinação sísmica de ações e h é a maior dimensão da secção transversal *.
- A avaliação da segurança sísmica está dispensada em estruturas secundárias dedicadas a zonas técnicas, depósitos de água, entre outras, geralmente localizadas no topo dos edifícios e não comprometendo a sua segurança. Por outro lado, a massa de todos os elementos principais e secundários deve ser devidamente contabilizada para o cálculo da massa sujeita à ação sísmica;

* Como ilustrado na figura abaixo, para um elemento com altura livre L , a relação $\frac{M}{Vh}$ depende das condições de fronteira do elemento, sendo esta equivalente a $\frac{L}{2h}$ e $\frac{L}{h}$, para elementos biencastados e em consola, respetivamente.



3.2.2 Avaliação da segurança estrutural de acordo com o Método II

De acordo com o Método II, a segurança estrutural relativamente à ação sísmica é avaliada em termos do coeficiente sísmico. Um edifício existente verifica a segurança relativamente à ação sísmica se, ao nível de cada piso j e em cada uma das duas direções principais do edifício, a capacidade resistente do edifício estimada em termos do coeficiente sísmico ($CS_{C,j}$) for igual ou superior ao coeficiente sísmico exigido ($CS_{E,j}$):

$$CS_{C,j} \geq CS_{E,j} \quad (5)$$

3.2.2.1 Exigência estrutural relativamente à ação sísmica

Os valores do coeficiente sísmico global exigido (CS_E) são apresentados na Tabela 3.1 em função do número de pisos do edifício, zona sísmica e tipo de terreno onde o edifício se encontra implantado.

Tabela 3.1. Valores dos coeficientes sísmicos exigidos (CS_E) para edifícios de 1 a 4 pisos localizados em cada zona sísmica e nos tipos de terreno A, B e C, definidos de acordo com a NP EN 1998 – 1 (2010)

Zona Sísmica	1 piso			2 pisos			3 pisos			4 pisos			
	Terreno A	Terreno B	Terreno C	Terreno A	Terreno B	Terreno C	Terreno A	Terreno B	Terreno C	Terreno A	Terreno B	Terreno C	
1.1	0.26	0.37	0.45	0.24	0.32	0.39	0.22	0.29	0.35	0.22	0.27	0.32	Sismo afastado Continente
1.2	0.19	0.28	0.35	0.18	0.25	0.31	0.17	0.23	0.28	0.16	0.22	0.26	
1.3	0.12	0.19	0.24	0.12	0.18	0.22	0.11	0.17	0.20	0.11	0.16	0.19	
1.4	0.06	0.11	0.14	0.07	0.10	0.13	0.06	0.10	0.12	0.06	0.09	0.12	
1.5	0.02	0.05	0.06	0.03	0.05	0.06	0.03	0.05	0.06	0.03	0.05	0.06	
1.6	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	
2.1	0.14	0.22	0.26	0.12	0.16	0.19	0.10	0.13	0.15	0.08	0.10	0.12	Sismo próximo Açores
2.2	0.09	0.15	0.19	0.08	0.12	0.15	0.06	0.10	0.12	0.05	0.07	0.09	
2.3	0.05	0.09	0.12	0.05	0.08	0.10	0.04	0.07	0.08	0.04	0.05	0.07	Sismo próximo Continente
2.4	0.02	0.04	0.06	0.02	0.04	0.06	0.02	0.03	0.05	0.01	0.03	0.04	
2.5	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.04	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	

Os valores de coeficiente sísmico exigido a considerar ao nível de cada piso j são obtidos através da expressão (6), multiplicando o valor coeficiente sísmico global pelo valor do coeficiente η_j definido na Tabela 3.2.

$$CS_{E,j} = \eta_j CS_E \quad (6)$$

Tabela 3.2. Valores do coeficiente η_j em função do número de pisos do edifício e do piso em análise

Piso	Número de pisos do edifício			
	4	3	2	1
4	0.40	-	-	-
3	0.70	0.50	-	-
2	0.90	0.83	0.67	-
1	1.00	1.00	1.00	1.00

3.2.2.2 Capacidade resistente do edifício relativamente à ação sísmica

À imagem do Método III, a avaliação da capacidade resistente de acordo com o Método II tem em conta a possibilidade dos elementos estruturais desenvolverem mecanismos de flexão ou de corte.

Assim, a capacidade resistente do edifício medida em termos do coeficiente sísmico pode ser definida como o rácio entre a resistência para forças horizontais de um piso $V_{H,j}$ e o peso total do edifício correspondente à combinação sísmica de ações W_E :

$$CS_{C,j} = \frac{V_{H,j}}{W_E} = \frac{\sum_{i=1}^n \min(V_{F,i}, V_{C,i})}{W_E} \quad (7)$$

em que:

$V_{F,i}$, $V_{C,i}$ - resistência à flexão e ao corte, respetivamente, de cada pilar i de um dado piso j , de um total de n pilares do edifício;

W_E - peso total do edifício é dado pela expressão (12), apresentada seguidamente.

A resistência dos pilares devido a mecanismos de flexão e corte pode ser determinada através das expressões (8) e (9), respetivamente:

$$V_{F,i} = 1.24 \left(\frac{b_i h_i^2 \rho_{l,i} f_{yl}}{L_{v,i}} \right)^{0.73} \quad (8)$$

$$V_{C,i} = 0.87 A_{c,i} \left(\tau_c \left[1 - 0.16 \min \left(5, \frac{L_{v,i}}{h_i} \right) \right] + \rho_{w,i} f_{yw,i} \right) \quad (9)$$

em que:

b_i - dimensão da secção transversal do pilar i perpendicular à direção de carga em consideração;

h_i - dimensão da secção transversal do pilar i segundo a direção de carga em consideração;

$\rho_{l,i}$ - taxa total da armadura longitudinal do pilar i ;

f_{yl} - valor médio da tensão de cedência das armaduras longitudinais;

$L_{v,i}$ - distância entre a extremidade do pilar i e o ponto de inflexão. Pode considerar-se $L_{v,i}$ igual a metade da altura livre do pilar, quando bi-encastado ou à altura livre do pilar, quando em consola;

$A_{c,i}$ - área da secção transversal do pilar i ;

τ_c - tensão transversal equivalente associada a mecanismos de corte dos pilares, conservativamente considerada igual a 0.24 MPa;

$\rho_{w,i}$ - taxa total da armadura transversal do pilar i ;

$f_{yw,i}$ - valor médio da tensão de cedência das armaduras transversais dividido por um fator de segurança de 1.55 (resultante da multiplicação do fator de segurança para o aço de 1.15 por um fator de conhecimento de 1.35).

De acordo com o disposto na cláusula 3.2.4 da NP EN 1998-1 (2010), os efeitos das forças inércia resultantes da ação sísmica devem ter em conta a presença, em cada piso j , das massas associadas

a todas as forças gravíticas, expressas em forças por unidade de área que surgem na seguinte combinação de ações:

$$w_{E,j} = \sum G_{k,j} + \sum (\psi_{E,m} q_{k,m})_j + \sum 1/ A_{s,j} (\psi_{E,n} Q_{k,n})_j \quad (10)$$

em que as ações permanentes $G_{k,j}$ devem ser definidas de acordo com a memória descritiva do projeto e complementadas com observações realizadas *in situ*, de forma a identificar possíveis alterações em relação ao projeto original. Por outro lado, as ações variáveis distribuídas $q_{k,m}$ e concentradas $Q_{k,n}$ devem ser definidas de acordo com a Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Sobrecargas distribuídas (q_k) e concentradas (Q_k) em pavimentos, varandas e escadas de edifícios (NP EN 1991-1-1; 2009)

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 7.0
- 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>

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

Todas as cargas concentradas Q_k devem portanto estar expressas em II.10 em força por unidade de superfície, dividindo cada $Q_{k,j}$ pela área do piso j , $A_{s,j}$

O coeficiente de combinação para o cálculo dos esforços sísmicos, $\psi_{E,m}$, deve ser determinado com base na seguinte expressão:

$$\psi_{E,m} = \varphi \psi_{2,m} \quad (II.11)$$

Os valores de ψ_2 e φ são definidos na Tabela 3.4 e Tabela 3.5, respetivamente. As categorias de edifícios encontram-se descritas mais detalhadamente na cláusula 6.3.1.1 da NP EN 1991-1-1 (2009).

Tabela 3.4.Valores de ψ_2 para o cálculo de $\psi_{E,m}$ (NP EN 1990, 2009)

Categoria	ψ_2
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 ($30 \text{ kN} < \text{peso dos veículos} \leq 160 \text{ kN}$)	0.3
Categoria H: coberturas	0

Tabela 3.5.Valores de φ para o cálculo de $\psi_{E,m}$ (NP EN1998-1; 2010)

Tipo de ação variável	Piso	φ
Categorias A-C	Cobertura	1.0
	Pisos com ocupações correlacionadas	0.8
	Pisos com ocupações independentes	0.5
Categorias D-F e arquivos		1.0

Assim, o peso total do edifício pode ser estimado através da expressão (12):

$$W_E = \sum_{j=1}^n (w_{E,j} A_{s,j}) \quad (12)$$

com:

$A_{s,j}$ - área do piso j ;

$w_{E,j}$ - peso por unidade de superfície do piso j , resultante da combinação sísmica de ações determinado através das expressão (10).

3.2.3 Avaliação da segurança estrutural de acordo com o Método I

De acordo com o Método I, a segurança estrutural relativamente à ação sísmica é avaliada em termos de percentagem de área de pilares em relação à área do piso.

Um edifício existente verifica a segurança relativamente à ação sísmica se, ao nível de cada piso j , a percentagem de área de pilares existentes ($A_{PC,j}$) relativamente à área do piso for igual ou superior à percentagem de área de pilares exigida ($A_{PE,j}$):

$$A_{PC,j} \geq A_{PE,j} \quad (13)$$

Os valores da percentagem de área de pilares exigida (A_{PE}) são apresentados na Tabela 3.6, em função do número de pisos do edifício, zona sísmica e tipo de terreno onde o mesmo se encontra implantado.

Tabela 3.6. Valores exigidos de área de pilares, em percentagem da área de implantação dos edifícios por zona sísmica e tipo de terreno

Zona Sísmica	1 piso			2 pisos			3 pisos			4 pisos			
	Terreno A	Terreno B	Terreno C	Terreno A	Terreno B	Terreno C	Terreno A	Terreno B	Terreno C	Terreno A	Terreno B	Terreno C	
1.1	0.9	1.2	1.5	1.6	2.1	2.6	2.2	2.9	3.5	2.9	3.6	4.3	Sismo afastado Continente
1.2	0.6	0.9	1.2	1.2	1.7	2.0	1.7	2.3	2.8	2.2	2.9	3.5	
1.3	0.4	0.6	0.8	0.8	1.2	1.5	1.1	1.6	2.0	1.5	2.1	2.5	
1.4	0.2	0.3	0.5	0.4	0.7	0.9	0.6	1.0	1.2	0.8	1.3	1.6	
1.5	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.5	0.6	0.4	0.6	0.8	
1.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	0.1	0.3	0.4	
2.1	0.5	0.7	0.9	0.8	1.1	1.3	1.0	1.3	1.5	1.0	1.3	1.6	Sismo próximo Açores
2.2	0.3	0.5	0.6	0.5	0.8	1.0	0.6	0.9	1.2	0.7	1.0	1.2	
2.3	0.2	0.3	0.4	0.3	0.5	0.7	0.4	0.7	0.8	0.5	0.7	0.9	Sismo próximo Continente
2.4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.4	0.2	0.3	0.5	0.2	0.4	0.5	
2.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	

Os valores exigidos da percentagem de área de pilares a considerar para cada de piso ($A_{PE,j}$) é obtido através da expressão (14), multiplicando o valor de A_{PE} pelo valor do coeficiente η_j definido na Tabela 3.2:

$$A_{PE,j} = \eta_j \times A_{PE} \quad (14)$$

Referências

- EPPO, 2013 – **Code of Interventions (KAN.EPE.)**. Earthquake Planning and Protection Organization (EPPO), Athens, Greece.
- NP EN 1998-1, 2010 – **Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios**. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 1998-3, 2017 – **Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos Parte 3: Avaliação e reabilitação de edifícios**. Instituto Português da Qualidade.
- SOUSA, R.; CAMPOS COSTA, A.; COSTA, A., 2019 – **Metodologia para a avaliação da segurança sísmica de edifícios existentes baseada em análises de fiabilidade estrutural. Edifícios de betão armado**. LNEC - Proc. 0305/1309/19281. Relatório 81/2019 – DE/NESDE.