

Verificação da segurança sísmica de edifícios em alvenaria através de metodologias simplificadas

Rui Marques¹ & Paulo B. Lourenço²

ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho
Campus de Azurém
4800-058 Guimarães

Resumo: Este artigo introduz conceitos de base para o cálculo sísmico de edifícios sustentáveis em alvenaria simples de pequeno porte (até 2 pisos), usando metodologias de análise estrutural a nível global e simplificadas. Estas metodologias, ainda que relativamente simples e passíveis de utilização através de um cálculo manual, foram desenvolvidas em países com sismicidade média a alta, e ainda assim com forte tradição de construção em alvenaria simples moderna (i.e. unidades robustas e estruturas com paredes bem ligadas e dispostas em ambas as direcções). O desempenho sísmico de edifícios assim dimensionados mostrou-se bastante satisfatório.

Introdução

A utilização de tijolos cerâmicos terá sido, provavelmente, um dos maiores passos de desenvolvimento na história da construção, dadas as vantagens construtivas e funcionais que este material permitiu relativamente à pedra. A Revolução Industrial potenciou a produção mecanizada de tijolos cerâmicos perfurados, cujas potencialidades permitiram um grande desenvolvimento e uso deste material. As características dos tijolos foram igualmente influenciadas pelo uso emergente de estruturas em betão armado, ainda que nesta solução os tijolos sejam usados como material de enchimento sem requisitos mecânicos significativos.

No entanto, tendo em vista a sustentabilidade da construção, nomeadamente através da optimização de recursos naturais, as unidades de alvenaria têm sido desenvolvidas de modo a que permitam o seu uso estrutural moderno, particularmente através do sistema de alvenaria resistente simples. Mais do que o número de pisos ou o vão dos edifícios, o desafio para a indústria da construção passa pelo desenvolvimento de soluções permitindo uma dependência mínima de fontes energéticas artificiais. Desta forma, a tipologia em alvenaria resistente simples na construção de pequenos edifícios é potenciada como um sistema com energia e custos reduzidos, permitindo poupança de recursos económicos e redução do impacto ambiental.

A indústria de unidades para alvenaria, especialmente de tijolos cerâmicos, está particularmente desenvolvida em países como a Alemanha e a Espanha, e disponível no mercado português, onde unidades com elevadas propriedades funcionais e mecânicas permitem o uso de alvenaria estrutural alternativamente ao betão armado, com todas as vantagens: culturais, sociais, energéticas, económicas, ambientais, de conforto, segurança no trabalho, velocidade de construção, trabalhabilidade, durabilidade e, em geral, sustentabilidade. Por exemplo, o uso de parede simples com o tijolo espanhol “Termobrick” de 31cm de espessura (transmitância térmica de $0.53\text{W/m}^2\text{K}$), ver Fig. 1a, em alternativa a

¹ Mestre em Projecto de Estruturas e Geotecnia, Doutorando em Estruturas de Alvenaria, marquesmnc@sapo.pt

² Doutorado em Engenharia Civil, Professor Catedrático, pbl@civil.uminho.pt

parede dupla com tijolos de furação horizontal (panos de 15+11cm + 3cm de isolamento XPS conforme Fig. 1b; transmitância térmica de 0.54W/m²K) permite uma economia de 25% no custo da alvenaria.

Além do mais, a alvenaria simples é um sistema de construção fechado, permitindo minimizar as perdas de energia e a necessidade da sua compensação, e conseqüentemente o impacto nas sensações físicas humanas. Desta forma, os edifícios em alvenaria simples resultam mais confortáveis e saudáveis para os utilizadores. Também por esta razão, significativa parte da economia conseguida com o sistema estrutural em alvenaria simples advém dos custos de utilização a médio-longo prazo, e a longo prazo por razões de durabilidade.

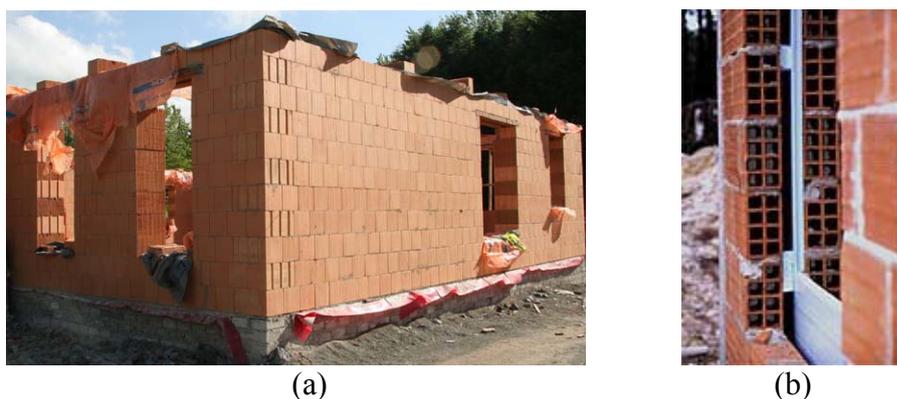


Figura 1 – Tipologias de alvenaria (a) resistente simples e (b) de enchimento com dois panos.

Verificação da Segurança Sísmica

Para além do desempenho energético dos edifícios, a sua segurança estrutural, particularmente a sua segurança sísmica, necessita igualmente de ser verificada. A ocorrência de sismos severos recentes, tais como os terremotos do Haiti e do Chile em 2010, tem colocado em evidência a vulnerabilidade sísmica de edifícios deficientemente dimensionados. Sobre este aspecto, convém não esquecer que Portugal é um país com sismicidade média a elevada, trazendo-se aqui à memória os sismos destrutivos de Lisboa (1755), Benavente (1909) e Açores (1998). Para além das perdas materiais, estes eventos deixaram marcas irreversíveis nas populações, seja por morte ou trauma sofridos.

Na década de 1970, como reacção à ocorrência de sismos destrutivos na ex-Jugoslávia e em Itália (e.g., Skopje em 1963, Friuli em 1976), um método pioneiro foi introduzido para a verificação da segurança sísmica de edifícios em alvenaria, o POR [1], o qual resultou da experiência adquirida na observação dos efeitos dos sismos sobre os edifícios, e também de campanhas experimentais alargadas [2-4]. Este método considerava uma resposta força-deslocamento laterais ($V-d$) bilinear e conjunta (aditiva) das paredes em cada piso do edifício (Fig. 2a).

Ainda que bastante simples, e baseado num “mecanismo de piso” exemplificado na Figura 2b que mostra o colapso de um edifício ensaiado em plataforma sísmica devido a um mecanismo do piso-térreo, este método é ainda hoje usado em Itália no cálculo de edifícios até 2 pisos. Por outro lado, em Portugal o método POR é ainda hoje desconhecido, sendo o dimensionamento sísmico de edifícios baseado em metodologias de análise local essencialmente elásticas, as quais subestimam significativamente a capacidade das estruturas em alvenaria. Por esta razão, neste trabalho introduzem-se conceitos básicos para o cálculo de edifícios em alvenaria considerando o comportamento não-linear e global dos edifícios.

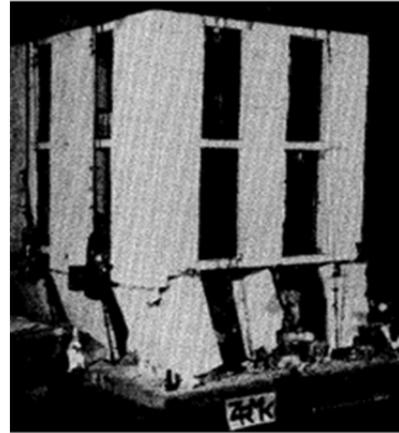
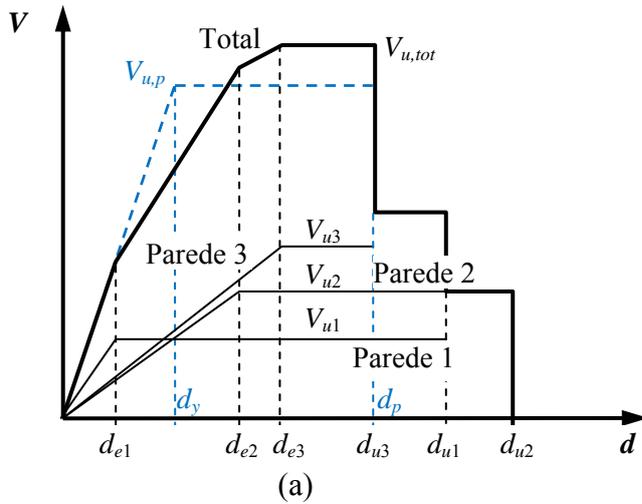


Figura 2 – (a) Princípio de cálculo do POR [1] assumindo (b) um mecanismo de piso [5].

Com respeito à Figura 2a, a resposta bilinear a acções laterais assumida para uma parede de alvenaria, entenda-se para um nembro de alvenaria, consiste de um primeiro tramo com rigidez elástica k_l admitindo uma condição de deformação com dupla curvatura (Eq. 1):

$$k_l = \frac{G \cdot B \cdot s}{\chi \cdot H} \cdot \frac{1}{1 + \frac{G}{\chi \cdot E} \cdot \left(\frac{H}{B}\right)^2} \quad (1)$$

onde E e G são respectivamente os módulos de elasticidade normal e tangencial da alvenaria; B , H e s são respectivamente o comprimento, a altura e a espessura do painel; χ é o factor de corte, o qual para secções rectangulares assume valor de 1.2. A resposta elástica é limitada pela activação de um mecanismo de colapso, que em função das condições da parede (propriedades mecânicas, esforço normal e esbeltez) pode ser por flexão composta, deslizamento horizontal, deslizamento diagonal ou corte diagonal, tal como ilustrado na Figura 3. O limite de resistência de uma parede pode ser formulado através das Equações (2-4), em função do tipo de mecanismo condicionante:

- Flexão composta:

$$V_f = \frac{B}{H} \cdot \left(N - \frac{N^2}{f_k \cdot B \cdot s} \right) \quad (2)$$

- Deslizamento horizontal ou diagonal:

$$V_d = \frac{B \cdot s \cdot f_{vk0} + 0.4 \cdot N}{0.75 + 0.25 \cdot H/B} \quad (3)$$

- Corte diagonal:

$$V_t = \sqrt{(f_{tk0} \cdot B \cdot s)^2 + \frac{f_{tk0} \cdot B \cdot s \cdot N}{0.75 + 0.25 \cdot H/B}} \quad (4)$$

onde N é a força axial sobre o painel; f_k é a resistência à compressão, f_{vk0} é a resistência ao corte sob compressão nula, e f_{tk0} é a resistência pura ao corte por tracção diagonal da alvenaria.

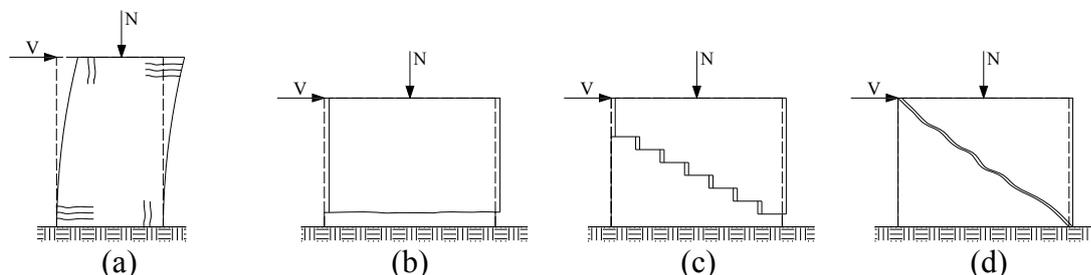


Figura 3 – Mecanismos de colapso típicos de nembos em alvenaria: (a) flexão composta, (b) deslizamento horizontal, (c) deslizamento diagonal e (d) corte diagonal.

Atingida a resistência limite da parede, a evidência experimental [6] demonstra que a parede possui uma reerva de capacidade não linear, relacionada com a capacidade de deformação cíclica inelástica e com a dissipação de energia. Esta característica é considerada na resposta através da definição de um ramo plástico com ductilidade (d_u/d_e) na ordem de 5.0 para o mecanismo de flexão composta e de 2.0 para o mecanismo de corte [7].

Depois de calculada a resposta bilinear para as várias paredes, a resposta global do piso é definida como a linha multi-linear resultante da soma das respostas individuais (Fig. 2a). Ainda que o método POR obrigue a uma análise piso-por-piso, a verificação do piso-térreo é normalmente condicionante, face ao nível máximo de solicitação ali mobilizado. Note-se que, tal como proposto em [8] a resistência do edifício deve ser determinada com base quer na capacidade de carga lateral, quer na ductilidade disponível do piso crítico. Desta forma, a resistência sísmica do edifício $V_{u,p}$ deve ser avaliada a partir de uma envolvente idealizada bilinear (a tracejado na Fig. 2a) para verificar os requisitos de ductilidade estrutural.

Tal envolvente bilinear é definida assumindo a rigidez elástica inicial da envolvente calculada, e um patamar plástico que se prolonga até um nível de deslocamento em correspondência com uma queda de 20% de $V_{u,tot}$ sobre a curva de capacidade calculada, assegurando que a área abaixo da envolvente calculada é igual à área sob a envolvente idealizada bilinear (condição de energia). Por outro lado, a ductilidade global do piso em análise, estimada como a relação entre o deslocamento último (d_p) da envolvente bilinear e o seu deslocamento de cedência (d_γ), deve resultar pelo menos igual a 1.6 (condição de ductilidade).

A verificação da segurança em termos de força é feita comparando a resistência sísmica do edifício $V_{u,p}$ com a força lateral de cálculo a que o piso é solicitado, a qual pode ser calculada através do método das forças laterais definido no Eurocódigo 8 [9]:

$$c_a S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \leq V_{u,p} \quad (5)$$

onde c_a é o coeficiente de afectação da acção de corte basal ao piso em análise, no cálculo do qual se pode assumir uma distribuição de força em altura proporcional à massa ou proporcional ao primeiro modo de vibração na direcção estudada; $S_d(T_1)$ é a ordenada do espectro de cálculo para o período fundamental de vibração do edifício, T_1 ; m é a massa total do edifício; λ é um factor de correcção que depende do número de pisos e do valor de T_1 : 0.85 se $T_1 \leq 2 T_C$ e o edifício tiver mais de dois pisos, ou 1.0 caso contrário; T_C é o limite superior

do período no patamar de aceleração espectral constante. Os valores dos parâmetros envolvidos no cálculo da ordenada do espectro de cálculo podem ser obtidos em [9].

Alternativamente à análise piso-por-piso através do método POR, um procedimento baseado na análise da resposta do edifício no seu todo tem vindo a ser implementado por Marques e Lourenço [10]. Trata-se de um método idealizado por Augenti [7] com inspiração no POR, o qual permite no entanto evoluir para uma análise da resposta global de edifícios, baseado na assumpção de uma resposta cumulativa de pisos e paredes. O uso de metodologias de análise global permite, em geral, obter soluções estruturalmente mais equilibradas.

Ainda que suportado por uma formulação complexa incremental-iterativa, tal método pode ser implementado numa folha de cálculo, com referência à Figura 4, seguindo os passos de: (1) cálculo da curva característica $T-d$ de cada parede de piso considerando a contribuição dos nembos que a constituem, (2) cálculo da curva de capacidade $V-D$ de cada parede multi-piso integrando as curvas características individuais de cada piso e (3) cálculo da curva de capacidade do edifício como a soma das curvas de paredes multi-piso resistentes na direcção em estudo. O procedimento de verificação de segurança é análogo ao apresentado atrás.

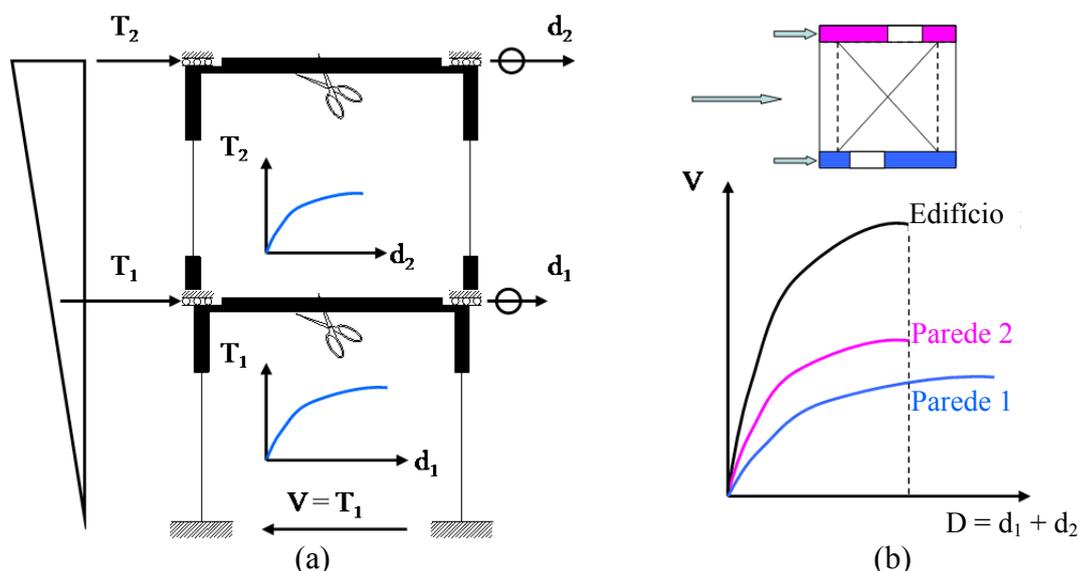


Figura 4 – Cálculo da curva de capacidade de (a) parede e (b) edifício [10].

Conclusões

Neste artigo são identificadas vantagens a curto, médio e longo prazo na construção de edifícios de pequeno porte (até 2 pisos) com estrutura resistente em alvenaria simples, particularmente aquelas relacionadas com o custo da construção, com o ciclo energético e com a durabilidade, permitindo poupança de recursos económicos e menores impactos ambientais.

Os métodos apresentados para verificação sísmica de edifícios resistentes em alvenaria simples estão amplamente validados face à sua base científica e experimental, assim como estão amplamente disseminados em países com forte tradição de construção em alvenaria. Tais métodos permitem um cálculo e interpretação de resultados simples e intuitivos, dismistificando a dificuldade de aplicação de métodos inelásticos no dimensionamento de estruturas. Ainda que existam ferramentas sofisticadas para análise estrutural, acredita-se que

o sucesso das ferramentas de cálculo de estruturas em alvenaria passa pela introdução de metodologias simples de análise global.

Referências

- [1] Tomažević, M. 1978. The computer program POR. Report ZRMK, Liubliana (em esloveno).
- [2] Turnšek, V. e Čačovič, F. 1971. Some experimental results on the strength of brick masonry walls. Proceedings of the 2nd International Brick & Block Masonry Conference, Stoke-on-Trent, 149-156.
- [3] Tomažević, M., Turnšek, V. e Terčelj, S. 1978. Computation of the shear resistance of masonry buildings. Report ZRMK-IK, Liubliana (em esloveno).
- [4] Tomažević, M. e Turnšek, V. 1982. Verification of the seismic resistance of masonry buildings. Proceedings of the British Ceramic Society, Stoke-on-Trent, No. 30, 360-369.
- [5] Tomažević, M., Modena, C., Velechovsky, T. e Weiss, P. 1990. The influence of structural layout and reinforcement on the seismic behaviour of masonry buildings: An experimental study. The Masonry Society Journal, 9(1):26-50.
- [6] Anthoine, A., Magenes, G. e Magonette, G. 1995. Shear-compression testing and analysis of brick masonry walls. Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Viena.
- [7] Augenti, N. 2004. Il calcolo sismico degli edifici in muratura. UTET Libreria, Turim (em italiano).
- [8] Tomažević, M. e Weiss, P. 1990. A rational, experimentally based method for the verification of earthquake resistance of masonry buildings. Proceedings of the 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, Vol. 2, 349-358.
- [9] IPQ 2010. NP EN 1998-1:2010: Eurocódigo 8 – Projecto de estruturas para resistência aos sismos, Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. CT 115 (LNEC), Março de 2010.
- [10] Marques, R. e Lourenço, P.B. 2011. Possibilities and comparison of structural component models for the seismic assessment of modern unreinforced masonry buildings. Computers and Structures, no prelo.