

170 mm

135 mm

POTENCIALIDADES DE CONSTRUÇÃO E PROJECTO DE EDIFÍCIOS EM ALVENARIA SIMPLES

RUI MARQUES
Eng.º Civil
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal

PAULO B. LOURENÇO
Prof. Eng.º Civil
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal

SUMÁRIO

A alvenaria é a mais tradicional tipologia de construção em Portugal. No entanto, a simplicidade de utilização de betão armado e um receio pouco fundamentado sobre a resistência aos sismos rapidamente fizeram esquecer a alvenaria como solução estrutural. Recentemente, têm sido tomadas diligências no sentido de reanimar a construção com alvenaria resistente, nomeadamente através do desenvolvimento de sistemas de alvenaria modernos eficientes e sismo-resistentes e de estudos de viabilidade desta solução. Neste artigo avaliam-se as potencialidades de construção de edifícios com alvenaria simples em Portugal, nomeadamente a possibilidade de construção em altura, e com arrojo arquitectónico com referência a um caso real. Paralelamente, potencia-se a utilização de dois softwares de cálculo comerciais no projecto sísmico de edifícios em alvenaria.

ABSTRACT

Masonry is the most emblematic construction typology in Portugal. However, the simplicity of use of reinforced concrete and an excessive apprehension on the seismic resistance of masonry led to its disuse as structural solution. Recently, some actions have been promoted to reanimate the building with structural masonry, namely developing efficient and seismic-resistant modern masonry systems and performing viability studies. Here, the possibilities of construction with unreinforced masonry in Portugal are evaluated, namely to build in elevation and with architectural boldness. Furthermore, the use of two commercial computer codes for seismic design of masonry buildings is potentiated.

142 mm

1. INTRODUÇÃO

Os edifícios tradicionais portugueses foram basicamente construídos com fachadas e empenas em alvenaria de pedra e/ou tijolo de barro, e com paredes de compartimentação em tabique. Na zona de Lisboa, na sequência do decreto anti-sísmico do Marquês de Pombal, as paredes incorporaram estruturas de madeira para suportar as acções dinâmicas dos sismos, ainda que a tradição se tenha vindo a perder à medida que o sismo de 1755 foi sendo esquecido. A opção por utilização da pedra ou do tijolo na construção das paredes baseava-se sobretudo na nobreza de utilização do edifício, e também na existência local de materiais.

Por outro lado, em inícios do século XX as técnicas de construção baseadas no uso do betão e do aço como materiais estruturais popularizaram-se na Europa. A utilização do betão armado viria a ser particularmente fomentada após o advento da 2.^a Guerra Mundial, dadas as grandes possibilidades de construção com este material, sobretudo em termos de rapidez e altura. Em Portugal, este material que tinha apenas sido utilizado em construções importantes, viria a assumir grande relevo de utilização, dada a popularidade que adquirira junto da comunidade de projectistas nas grandes cidades, e também por influência de práticas construtivas trazidas pelos emigrantes portugueses.

Já sem qualquer influência externa, uma vez que noutros países continuou-se a construir com alvenaria resistente, em finais do século XX todos os novos edifícios portugueses eram construídos em betão armado. Foi desta forma criada em Portugal uma nova tradição de construção resistente, em betão armado, que viria a fazer esquecer a construção com alvenaria. Isto, independentemente de factores como a altura dos edifícios, os recursos locais, a economia e o ambiente.

A modernização dos processos de produção de unidades artificiais de alvenaria (vulgo tijolos ou blocos), que se reflecte em materiais com elevadas propriedades funcionais e mecânicas, associada à necessidade de construir com sustentabilidade, tem vindo a justificar esforços para regenerar a construção com alvenaria resistente em Portugal. Um dos principais entraves para o uso de alvenaria resistente é o reduzido estado de conhecimento nacional sobre o comportamento sísmico desta tipologia, em particular relativamente às abordagens de verificação da segurança.

Neste particular, interessa encontrar referenciais de conhecimento que permitam dotar a comunidade nacional de projectistas com conceitos e ferramentas modernos para a concepção estrutural de edifícios em alvenaria. Este referencial pode encontrar-se particularmente em Itália, onde o grande espólio monumental e a tradição de construção com alvenaria resistente, permitiu o desenvolvimento de ferramentas sofisticadas para a análise e dimensionamento destas estruturas.

2. PROJECTO DE EDIFÍCIOS EM ALVENARIA SIMPLES

Em Portugal, o cálculo sísmico para a generalidade das estruturas é tradicionalmente baseado no confronto local dos esforços elásticos reduzidos pelo factor de comportamento da estrutura, contra os seus esforços resistentes. Esta metodologia é demasiado conservadora no caso do projecto de estruturas em alvenaria. Por outro lado, recentemente têm sido desenvolvidas metodologias de análise e dimensionamento de estruturas baseadas no seu desempenho global em deformação, as quais permitem explorar a reserva de capacidade não-linear das estruturas, nomeadamente pela consideração da sua capacidade de deformação cíclica inelástica e de dissipação de energia.

O EC8 [1] preconiza o cálculo sísmico através de métodos que considerem a resposta linear ou não-linear das estruturas, não sendo no entanto definidos procedimentos claros para a análise sísmica de estruturas em alvenaria. A experiência de outros países tem vindo a demonstrar a adequabilidade de uma análise estática não-linear (pushover), baseada na resposta em deformação lateral do edifício.

2.1 Software disponível

Em Itália foram recentemente desenvolvidos, por cooperação entre o meio académico-científico e a indústria, dois programas para cálculo sísmico de edifícios em alvenaria: o *3Muri* e o *ANDILWall*. Estes programas realizam uma verificação de segurança baseada no desempenho em deformação do edifício, confrontando o deslocamento permitido com aquele necessário face à actuação do sismo de cálculo (Fig. 1). O cálculo no *3Muri* [www.3muri.com] é baseado em análise pushover, simulando a resposta cinemática do conjunto de macro-blocos em que é discretizado o edifício (Fig. 2a). A mesma filosofia é implementada pelo motor de cálculo do *ANDILWall* [www.crsoft.it/andilwall], o *SAM II*, com a diferença de que este programa simula a resposta de um assemblado de barras equivalente ao conjunto de paredes do edifício (Fig. 2b). Embora ambos modelos considerem um conjunto de elementos deformáveis ligados pontualmente por elementos rígidos, o elemento do *3Muri* considera graus de liberdade internos que lhe conferem um carácter de bidimensionalidade.

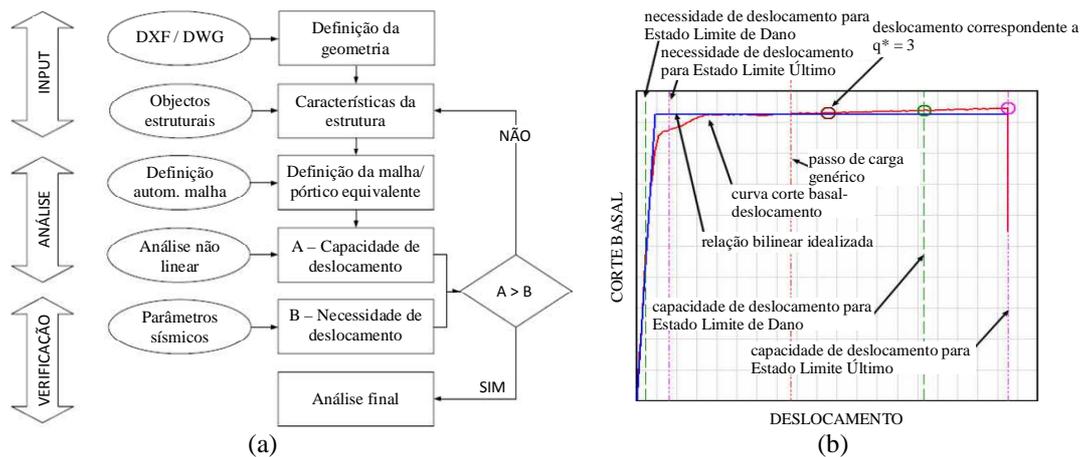


Figura 1 - Análise estática não-linear (pushover): (a) fluxograma e (b) curva de capacidade

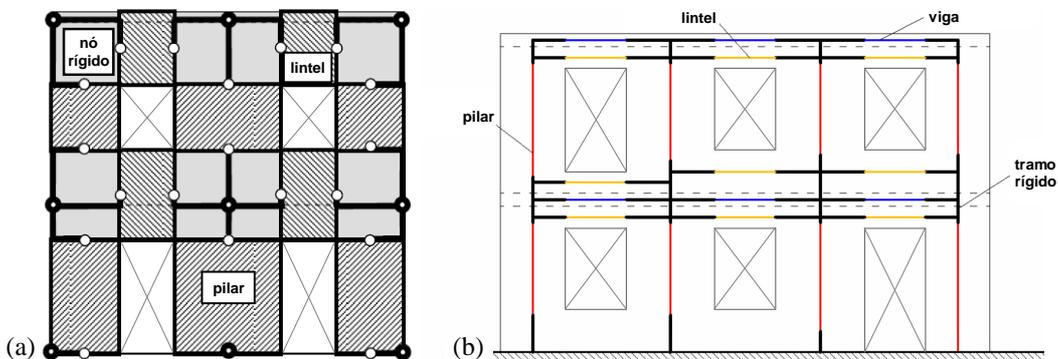


Figura 2 - Exemplificação da modelação adoptada nos programas (a) *3Muri* e (b) *ANDILWall*

2.2 Estudo sobre a possibilidade de construção em altura

Para discutir as possibilidades de construção com alvenaria simples em Portugal Continental foram feitas simulações para avaliação da segurança sísmica de edifícios com 1 a 3 pisos, no programa *3Muri*. As configurações dos edifícios alvo de análise são mostradas na Figura 3, nomeadamente um módulo de 1 andar, e edifícios de 2 e 3 pisos para construção em banda. Os edifícios foram modelados em alvenaria de tijolo “cBloco” [2] com assentamento por faixas (Fig. 4). Face ao tipo de unidades e aparelho da alvenaria, e de encontro às cláusulas regulamentares aplicáveis do EC6 [3], as resistências características à compressão e ao corte sob compressão nula foram reduzidas de 50%. As propriedades dos materiais da alvenaria são apresentadas na Tabela 1.

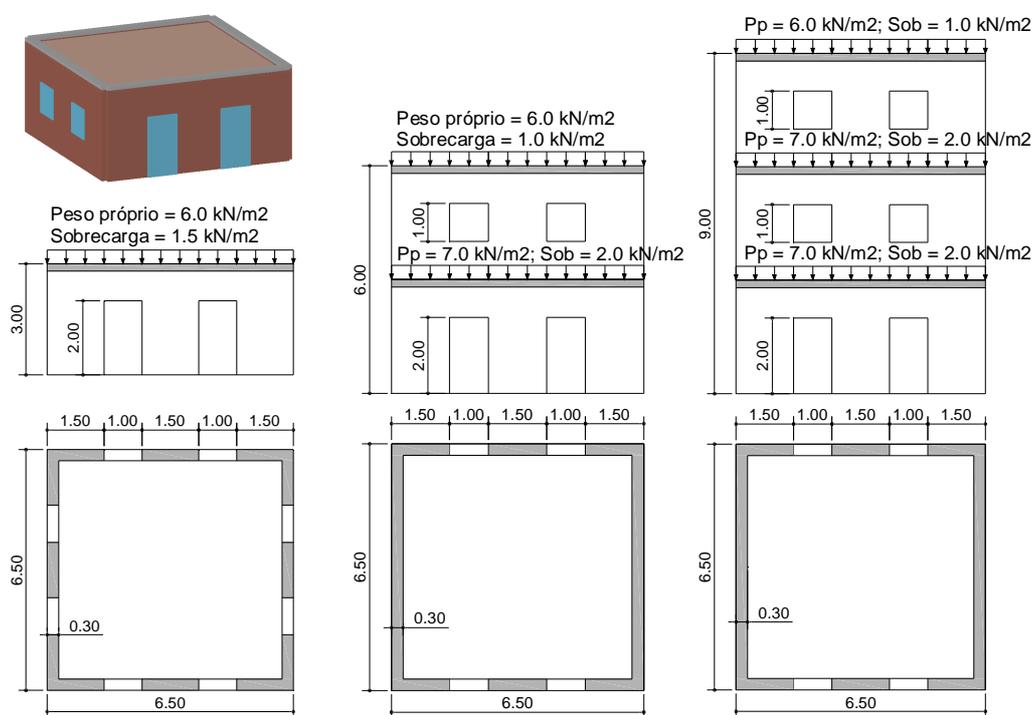


Figura 3 - Configurações de edifícios estudadas com 1, 2 e 3 pisos

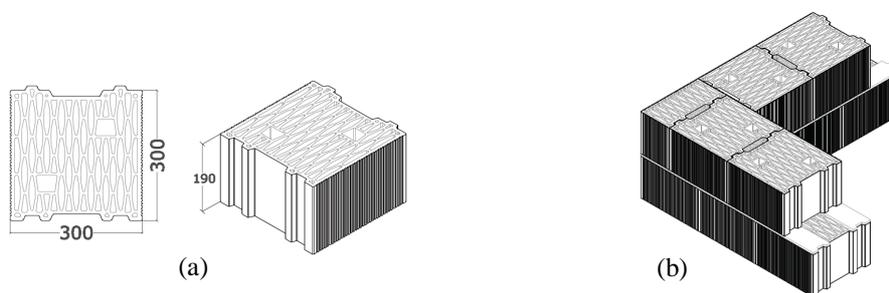


Figura 4 - Sistema “cBloco”: (a) peça base e (b) aparelho

Tabela 1 - Propriedades dos materiais da alvenaria de tijolo

UNIDADES:	
Tipo segundo o EC6	Blocos cerâmicos do Grupo 2
Resistência à compressão, f_b	12.00 MPa
ARGAMASSA:	
Tipo segundo o EC6	M10
ALVENARIA:	
Peso volúmico, γ	17.0 kN/m ³
Resistência característica à compressão, f_k	2.56 MPa
Resistência característica pura ao corte, f_{vk0}	0.15 MPa
Módulo de elasticidade, E	2560 MPa
Módulo de distorção, G	1024 MPa

Na Figura 5 ilustra-se a resposta última em termos de deformação e dano dos 3 edifícios estudados, onde se observa que o mecanismo por flexão composta é predominante, apenas se detectando plastificação por corte no edifício de 3 pisos, em lintéis adjacentes à laje de pavimento do segundo piso. Para este edifício é ainda evidenciada a localização do dano à esquerda da linha diagonal

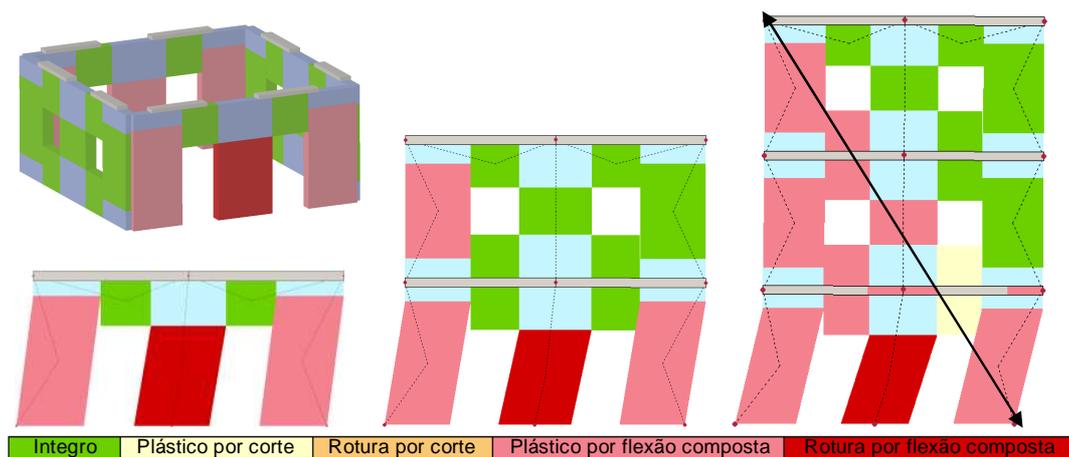


Figura 5 - Deformada e dano últimos nos edifícios

Com base nos requisitos para resistência aos sismos impostos pela norma italiana NTC 2008 [4], e adoptando os parâmetros sísmicos definidos no Anexo Português ao EC8, foi avaliada, recorrendo ao *3Muri*, a possibilidade geográfica de construção dos edifícios estudados em Portugal Continental, a qual é ilustrada nos mapas da Figura 6. Saliente-se que o Anexo Português ao EC6 parece limitar excessivamente a utilização de alvenaria simples em Portugal, e que a robustez das unidades é um factor essencial a considerar. Para os 3 edifícios avaliados foi calculado um índice da segurança sísmica nas várias zonas sísmicas de Portugal Continental, o qual é apresentado na Figura 7.

Tal índice, que possui o significado de um factor de segurança adicional em relação ao valor necessário para a zona em questão, foi calculado como a média da razão entre a aceleração horizontal limite de colapso e a correspondente ao espectro definido na solicitação para estado limite último, entre as 12 análises possíveis – 2 sentidos x 2 tipos de distribuição de forças em altura

(uniforme e triangular) x 3 possibilidades para a excentricidade (positiva, negativa e nula) – na direcção menos resistente do edifício.

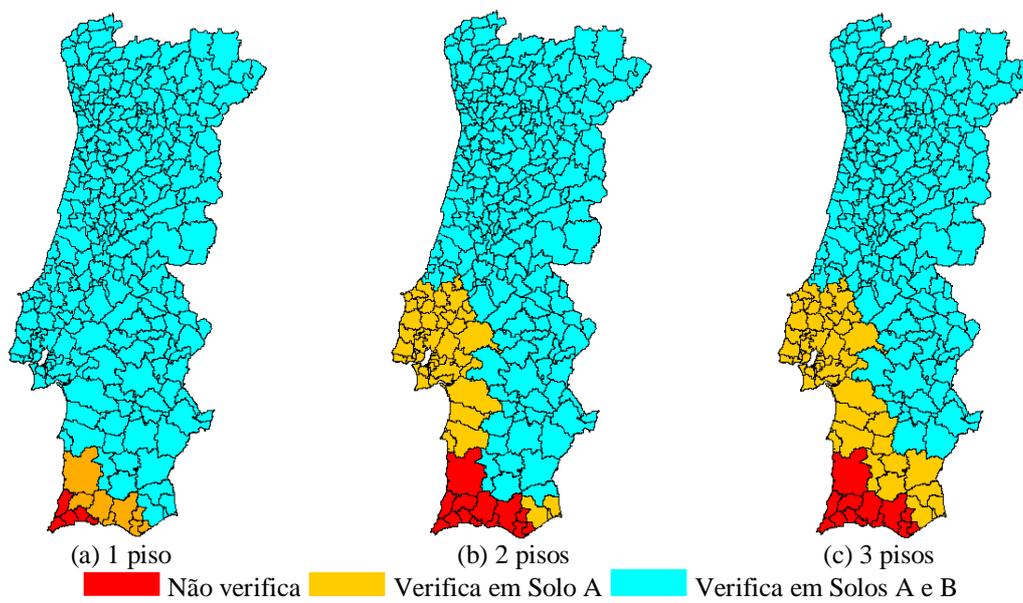


Figura 6 - Mapeamento da possibilidade de construção com alvenaria simples

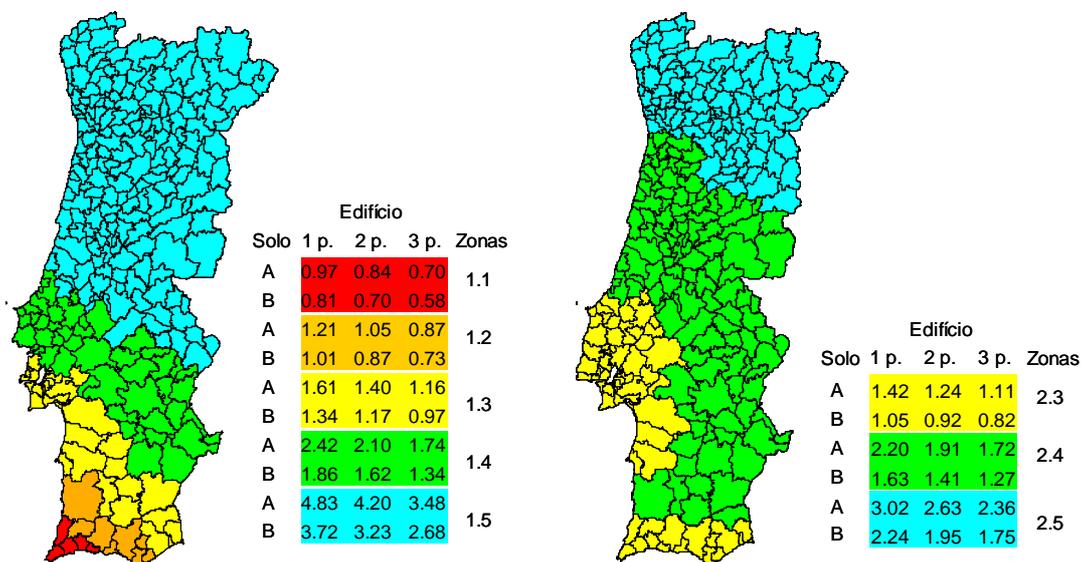


Figura 7 - Índices de segurança nas zonas sísmicas de Portugal Continental

2.3 Estudo de caso real

A possibilidade de construção em Portugal com edifícios resistentes em alvenaria ficou já demonstrada na Secção 2.2, para edifícios com plantas regulares. Adicionalmente, para comprovar

as possibilidades arquitectónicas da alvenaria resistente, apresenta-se o caso de estudo de uma moradia na Mealhada (Fig. 8), da autoria do Arqt.º José Machado, ao qual não se colocaram quaisquer restrições de desenho.



Figura 8 - Projecto de arquitectura de moradia, da autoria do Arqt.º José Machado

Neste caso, procurou-se uma modulação do edifício ao nível do bloco (Fig. 9), seleccionando um aparelho que permita o mínimo desperdício e a possibilidade de incorporar armaduras em treliça, tanto horizontal como verticalmente (Fig. 10). Isto foi conseguido através da colocação alternada de pares de blocos e de meios-blocos, que permite obter dimensões múltiplas de 20 cm. Trata-se de um sistema inovador em desenvolvimento em Portugal [5] e que permite responder às prescrições do Anexo Nacional ao EC6. As propriedades dos materiais da alvenaria são apresentadas na Tabela 2.

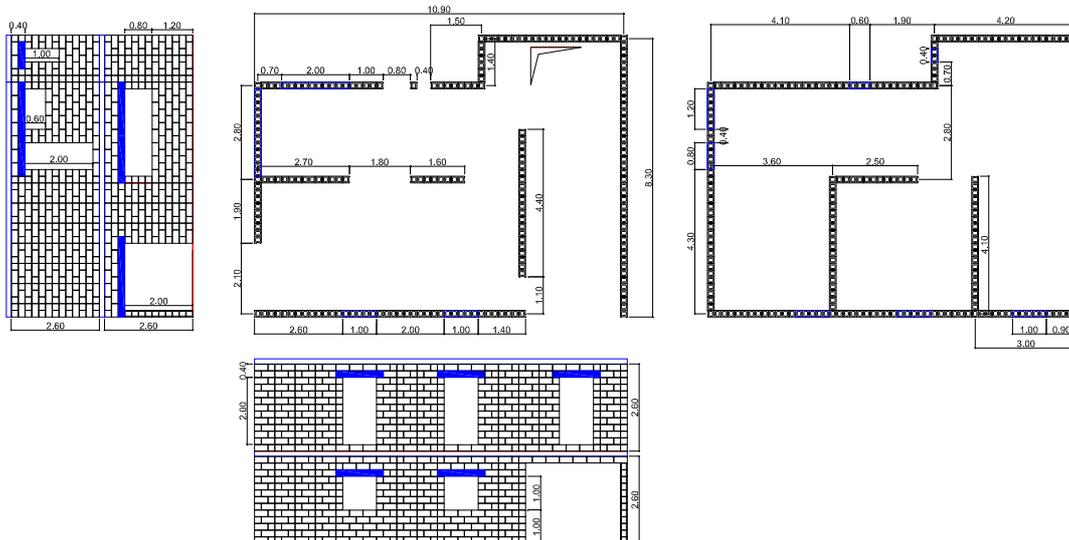


Figura 9 - Projecto em alvenaria estrutural da moradia estudada

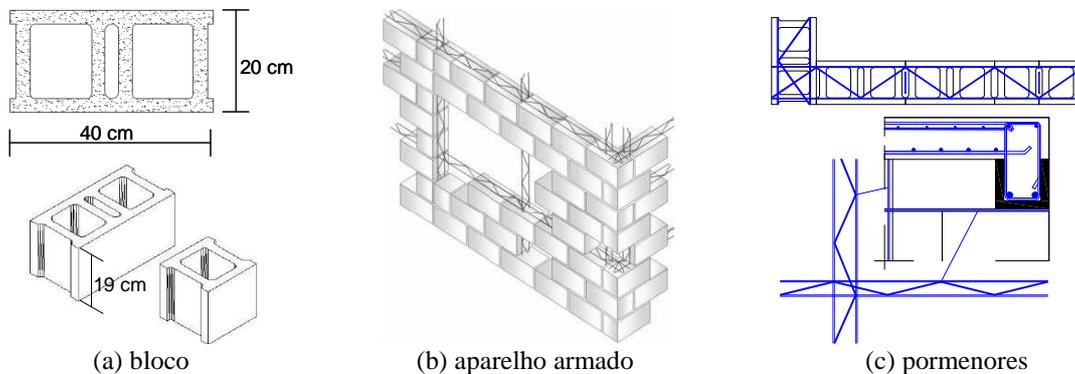


Figura 10 - Sistema de alvenaria integrado com blocos de betão e armadura treliçada

Tabela 2 - Propriedades dos materiais da alvenaria de blocos

UNIDADES:	
Tipo segundo o EC6	Blocos de betão do Grupo 2
Resistência à compressão, f_b	11.77 MPa
ARGAMASSA:	
Tipo segundo o EC6	M10
ALVENARIA:	
Peso volúmico, γ	15.0 kN/m ³
Resistência característica à compressão, f_k	5.00 MPa
Resistência característica pura ao corte, f_{vk0}	0.20 MPa
Módulo de elasticidade, E	5000 MPa
Módulo de distorção, G	2000 MPa

O cálculo sísmico foi efectuado no programa *ANDILWall/SAM II*, apresentado na Secção 2.1. Na Figura 11 são apresentados o modelo 3D do edifício, gerado a partir do input geométrico, e aquele de barras gerado automaticamente pelo *SAM II*. Neste último modelo podemos identificar os painéis-pilar a castanho-escuro, os lintéis a castanho-claro, as vigas-lintel a azul, e os tramos que simulam as zonas rígidas a negro.

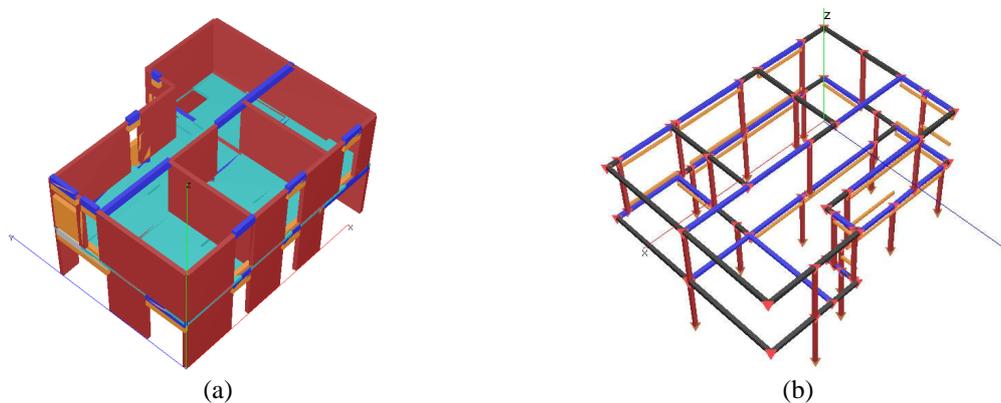


Figura 11 - Modelos (a) 3D e (b) de barras do edifício

Admitindo um Terreno B para o sítio na Mealhada (Zonas Sísmicas 1.5 e 2.4), a partir do Anexo Português ao EC8 foram identificados os parâmetros sísmicos a introduzir no programa, nomeadamente as acelerações de cálculo do terreno ($a_g \cdot S$ de 0.65 e 1.49 m/s^2) e os períodos espectrais para as 2 zonas. A verificação da segurança é largamente satisfeita, ainda que de forma menos folgada para a Acção sísmica Tipo 2, cujos resultados se apresentam na Figura 12.

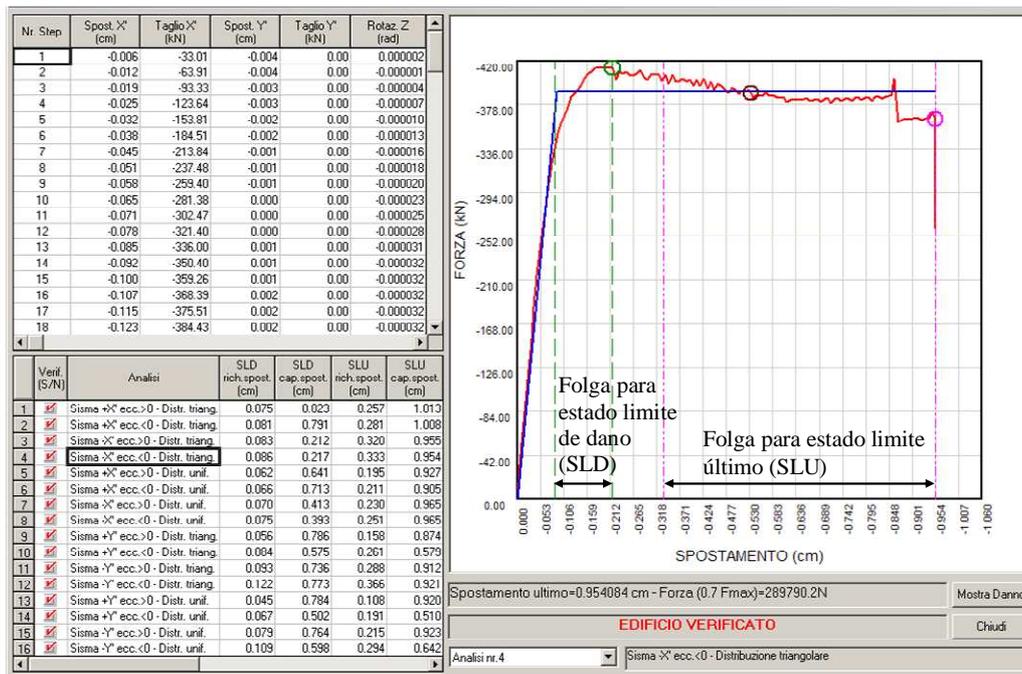


Figura 12 - Quadro de verificação da segurança para o sismo próximo (Tipo 2) da Mealhada

As simulações realizadas relativamente ao comportamento do edifício evidenciam a conveniência de evitar zonas sismo-frágeis. A detecção destas zonas pode ser feita via análise da deformada ou avaliação do dano (Fig. 13). A possibilidade de identificação destas zonas permite proceder a medidas que melhorem o comportamento, tais como o reforço com armaduras. Isto é exemplificado na Figura 13c, onde é identificada a zona mais vulnerável do edifício, com paredes muito abertas no piso-térreo e irregulares no piso elevado.

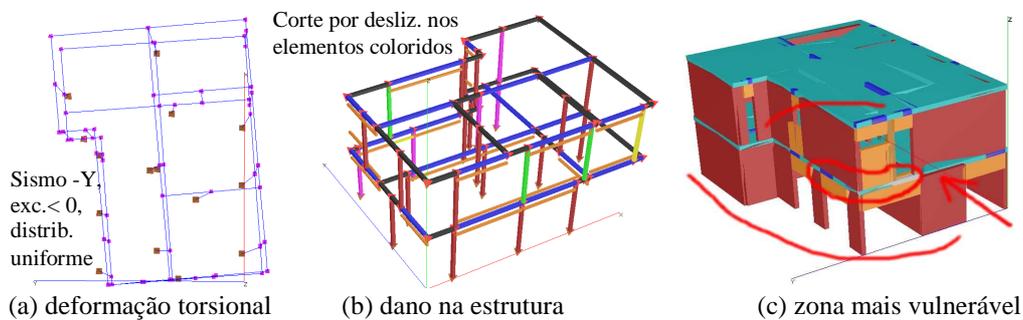


Figura 13 - Aspectos do comportamento em deformação e dano do edifício

3. CONCLUSÕES E REFLEXÃO

O custo considerável das paredes de alvenaria em edifícios e as elevadas propriedades mecânicas e modulares dos sistemas de alvenaria modernos convidam à construção com alvenaria resistente, dado que para além da função típica de enchimento as paredes podem constituir o sistema resistente. Para além da elevada qualidade de construção obtida com esta tipologia, estas estruturas apresentam vantagens económicas, construtivas, funcionais e ambientais. A possibilidade de construção de edifícios em alvenaria simples foi demonstrada para edifícios regulares até 3 pisos em grande parte do território português, e igualmente comprovada para um caso com arrojado arquitectónico. Para o seu projecto sísmico, existem no mercado programas de cálculo amigáveis e amplamente validados.

Face às evidências, parecem estar reunidas as condições necessárias para a retoma da construção de edifícios de pequeno a médio porte com alvenaria resistente, numa vertente moderna. Recomenda-se, desta forma, a todos os intervenientes no processo de desenvolvimento do edificado nacional, nomeadamente legisladores, donos de obra, projectistas e empreiteiros, a ponderação da utilização desta tipologia, tendo em conta as exigências para um desenvolvimento sustentável.

4. AGRADECIMENTOS

Este artigo resultou de estudos efectuados no âmbito dos Projectos “DISWall: Developing Innovative Systems for Reinforced Masonry Walls” e, “SINALES: Desenvolvimento de um Sistema Industrializado para Alvenaria Estrutural” e “cBloco: Dimensionamento Estrutural”, financiados respectivamente pela Comissão Europeia e pela Agência de Inovação, em colaboração com as empresas Costa & Almeida, Maxit e NAC, respectivamente.

5. REFERÊNCIAS

- [1] IPQ 2010. NP EN 1998-1, Eurocódigo 8 – Projecto de estruturas para resistência aos sismos, Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. CT 115 (LNEC), Março 2010.
- [2] Lourenço, P.B. *et al.* 2008. *cBloco: Manual de dimensionamento estrutural*. ISBN 978-989-20-1404-3.
- [3] CEN 2005. EN 1996-1-1:2005: Eurocode 6 – Design of masonry structures, Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Novembro de 2005, Bruxelas.
- [4] NTC 2008. Norme tecnica per le costruzioni, D.M. del 14/1/2008. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Roma (em italiano).
- [5] Vasconcelos, G. *et al.* 2007. “Alvenaria armada: Soluções inovadoras em Portugal”. *Paredes de Alvenaria: Inovação e Possibilidades Actuais*, Universidade do Minho e LNEC, 103-128.



RUI MARQUES
Doutorando
ISISE, DEC-UMinho
Mestre em Projecto de Estruturas e Geotecnia
Investigador sobre análise sísmica de alvenaria, com cerca de 20 publicações
marquesmnc@sapo.pt



PAULO B. LOURENÇO
Professor Catedrático
ISISE, DEC-UMinho
Doutorado em Engenharia Civil
Especialista em alvenaria histórica e moderna, com mais de 500 publicações
pbl@civil.uminho.pt