

ALVENARIA ARMADA: PANORAMA INTERNACIONAL E DIMENSIONAMENTO PARA FECHAMENTO DE GRANDES ESPAÇOS



Paulo B. LOURENÇO
Professor Catedrático
Universidade do Minho
Guimarães

SUMÁRIO

O presente artigo aborda brevemente a evolução da alvenaria estrutural, das linhas de pressão ao funcionamento conjunto com paredes de contraventamento. Para a alvenaria estrutural moderna, discute-se a aplicação da alvenaria simples, alvenaria armada e alvenaria confinada num contexto de sismicidade baixa a elevada, apresentando soluções bem sucedidas em diferentes países, bem como desenvolvimentos com potencial em curso. Para o caso das paredes de fechamento apresenta-se a metodologia de dimensionamento a adoptar e aplicações em Portugal.

1. INTRODUÇÃO

A ausência de regulamentos e normas para alvenaria, para além das motivações tecnológicas e arquitectónicas, constituíram até muito recentemente uma razão importante para a não utilização da alvenaria como um material estrutural em alguns países. Neste momento, existem regulamentos aprovados a nível europeu pelo que os projectistas possuem ferramentas adequadas para o dimensionamento em alvenaria estrutural, ver [1].

A utilização da alvenaria nos últimos 10.000 anos decorreu com inovações moderadas até ao século XX, baseadas no princípio que a alvenaria possui muito baixa resistência a esforços de tracção. Esta forma de construir traduziu-se em edifícios com paredes de alvenaria espessas e

pavimentos geralmente em madeira ou betão armado (a partir do segundo terço do século 20). O dimensionamento baseado em métodos gráficos ou cálculos simples, como paredes em consola (ou tipo muro de gravidade), e sem recurso a paredes de contraventamento, conduziu a espessuras crescentes na direcção da base, sendo o expoente desta tipologia estrutural o famoso edifício Monadnock em Chicago, com 16 pisos e espessura na base das paredes de 1.82m [2], ver Figura 1.

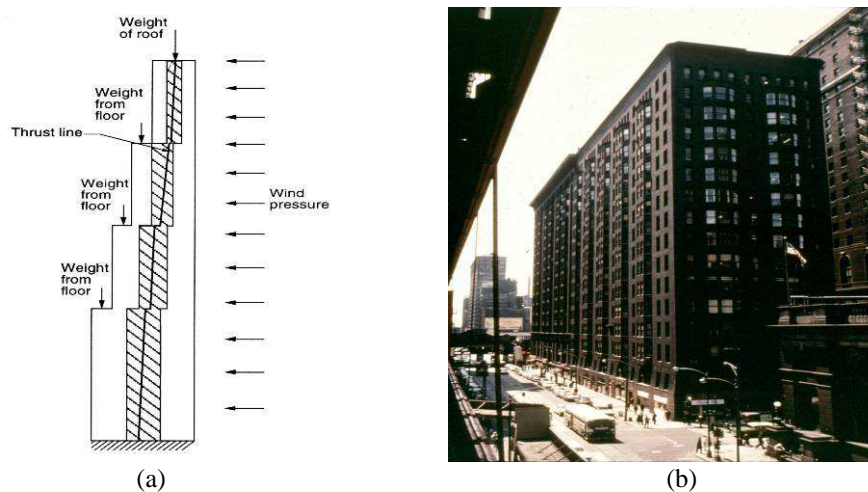


Figura 1 : Alvenaria tradicional (não armada) e dimensionada para esforços de compressão:
 (a) acções sobre uma parede exterior (peso próprio, sobrecarga e vento) e respectiva linha de pressões; (b) Edifício Monadnock em Chicago, EUA

2. SOLUÇÕES CORRENTES NO CONTEXTO INTERNACIONAL

Apenas nos anos 1950-60, foi introduzido em diversos países uma concepção de edifícios baseada em paredes de contraventamento, em que as paredes longitudinais, as paredes transversais e as lajes resistem em conjunto às acções horizontais. A vantagem deste princípio é que as paredes são utilizadas em compressão e corte, sendo possível realizar edifícios com elevado número de pisos com alvenaria simples e paredes de espessura moderada, em zonas de muito baixa sismicidade. O dimensionamento destes edifícios era apoiado em programas de investigação experimental de grande dimensão e numa análise estrutural sólida, semelhante à adoptada para estruturas em betão armado ou metálicas. Os exemplos apresentados na Figura 2 incluem edifícios com altura comparável ao edifício Monadnock mas com espessuras de paredes entre 0.15 e 0.30m.

Face aos elevados danos que ocorreram em sismos reais, em zonas de elevada sismicidade, desde há muito que foram tentadas soluções de alvenaria compósitas em que a madeira providenciava resistência à tracção. Em Portugal, o tristemente célebre terramoto de 1755 conduziu a perdas económicas e de vidas humanas inaceitáveis, e permitiu desenvolver o sistema de construção da gaiola pombalina, ver Figura 3.

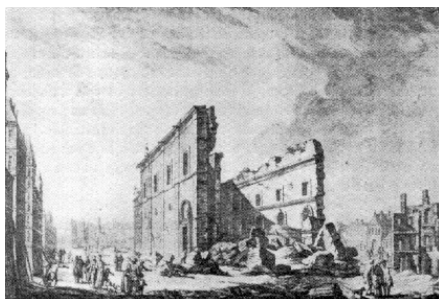


(a)

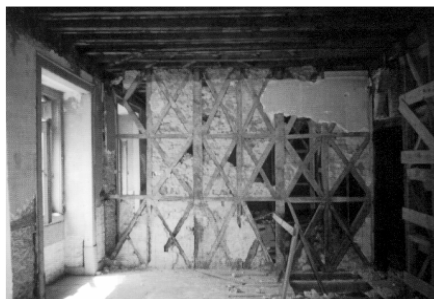


(b)

Figura 2 : Alvenaria moderna (não armada) e dimensionada para esforços de compressão e corte: (a) edifício de 12 pisos; (b) edifício de 16 pisos



(a)



(b)

Figura 3 : Alvenaria “armada”: (a) imagem da destruição no terramoto de 1755; (b) o novo sistema composto com paredes de alvenaria-madeira

Com o tempo, foram propostas outras soluções, incluindo por exemplo tirantes, barras de ferro nas juntas ou cavilhas nas unidades de alvenaria, com o objectivo de aumentar o desempenho da alvenaria quando sujeita a acções sísmicas elevadas. No entanto, o facto dos sismos ocorrerem em várias zonas do globo com períodos de retorno muito longos, a falta de conhecimento técnico e científico, as restrições financeiras dos donos de obra, a ausência de regulamentos e normas, e o poder devastador dos sismos de elevada magnitude traduziram-se em resultados inaceitáveis em zonas sísmicas. No início do século XX, 3 terramotos de magnitude considerável, ver Figura 4, contribuíram para a assumpção empírica que as construções em alvenaria não são seguras para as acções sísmicas, tendo as mesmas passado a ser substituídas, nestas zonas, por estruturas de betão armado e metálicas.

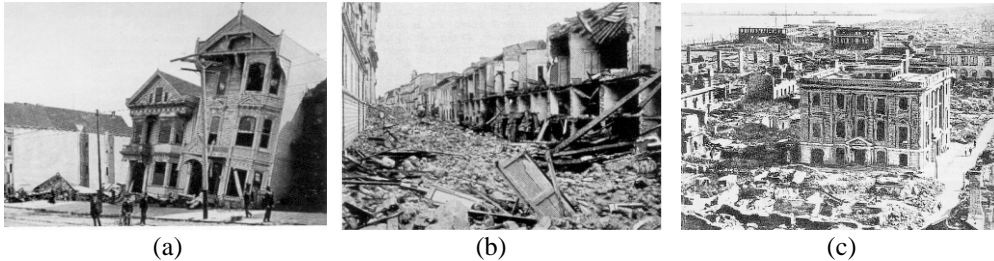


Figura 4 : Imagens dos efeitos devastadores de sismos: (a) São Francisco, EUA (1906); (b) Messina, Itália (1908); (c) Tóquio, Japão (1923)

Em países situados em zonas sísmicas, a solução encontrada foi utilizar alvenaria simples apenas para edifícios de pequeno porte e desenvolver sistemas de alvenaria que incluam armadura para edifícios de porte moderado a elevado, ver Figura 5. Como soluções possíveis, referem-se as soluções de alvenaria armada e confinada, a discutir nas próximas secções.

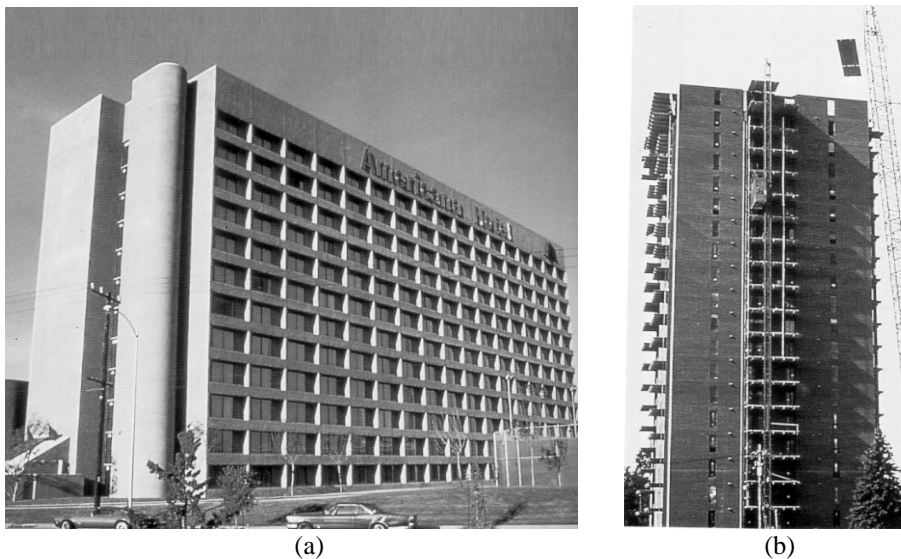


Figura 5 : Alvenaria moderna (armada) e dimensionada para esforços de compressão, corte e tracção: (a) edifício de 12 pisos; (b) edifício de 28 pisos

2.1. Alvenaria simples (não-armada)

No panorama europeu, as soluções em alvenaria estrutural simples representam cerca de 15 a mais de 50% da construção nova de edifícios de habitação, incluindo países com sismicidade muito baixa (por exemplo Alemanha, Países Baixos ou Noruega) e países com sismicidade elevada, como Itália. Uma solução corrente passa pela utilização de unidades para alvenaria com espessura elevada na envolvente, para cumprir os requisitos térmicos. A Figura 6 apresenta detalhes da construção em alvenaria simples moderna. Salienta-se como aspecto particularmente relevante que é necessário dispor de sistemas completos de construção incluindo blocos de diferentes formas e soluções para pavimentos e lajes, ver Figura 7.

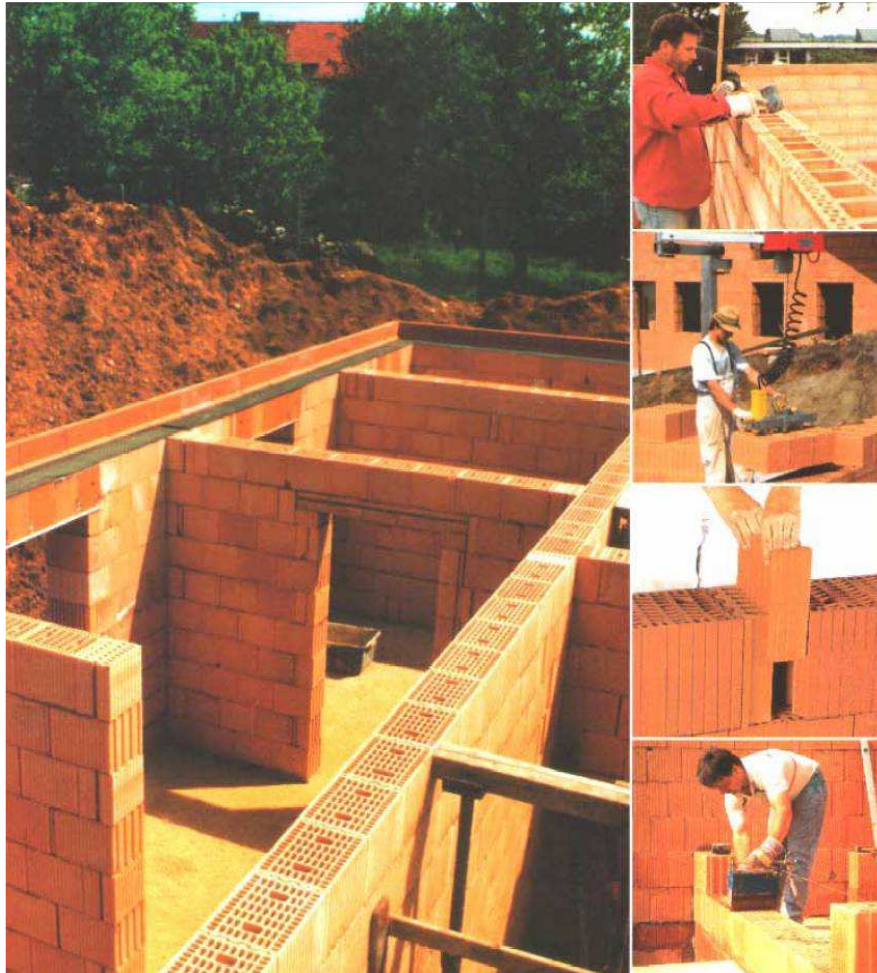
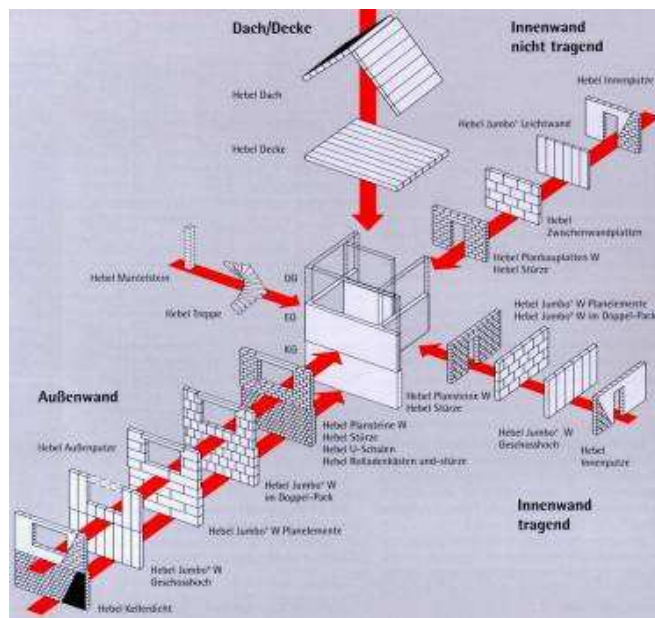


Figura 6 : Detalhes da construção moderna em alvenaria cerâmica estrutural na Alemanha

Salienta-se que as soluções apresentadas, típicas de países com sismicidade baixa, são ainda utilizadas em Itália com diversos requisitos adicionais, nomeadamente quanto à robustez das unidades de alvenaria (resistência elevada e percentagem de furação moderada) e à presença de vigas-cinta nas lajes. A Figura 8 apresenta exemplos de projectos italianos, onde é possível verificar a combinação de paredes resistentes (mais espessas) com paredes divisórias (menos espessas), tal como é corrente noutras construções. Salienta-se que o dimensionamento de estruturas de alvenaria simples à acção sísmica não possui ainda amplo consenso a nível europeu. Em particular, a utilização de métodos elásticos com os coeficientes de comportamento do Eurocódigo 8 conduz, geralmente, à impossibilidade de verificação de segurança, a resultados distintos dos utilizados nos métodos simplificados previsto no mesmo Eurocódigo e a resultados distintos da realidade experimental observada em ensaios de mesa sísmica, ver [3] para mais detalhes.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 7 : Alvenaria moderna simples: (a) sistemas integrados para a construção; (b) unidades de betão celular autoclavado; (c) unidades de silico-cálcario; (d) unidades cerâmicas; (e) unidades de betão leve

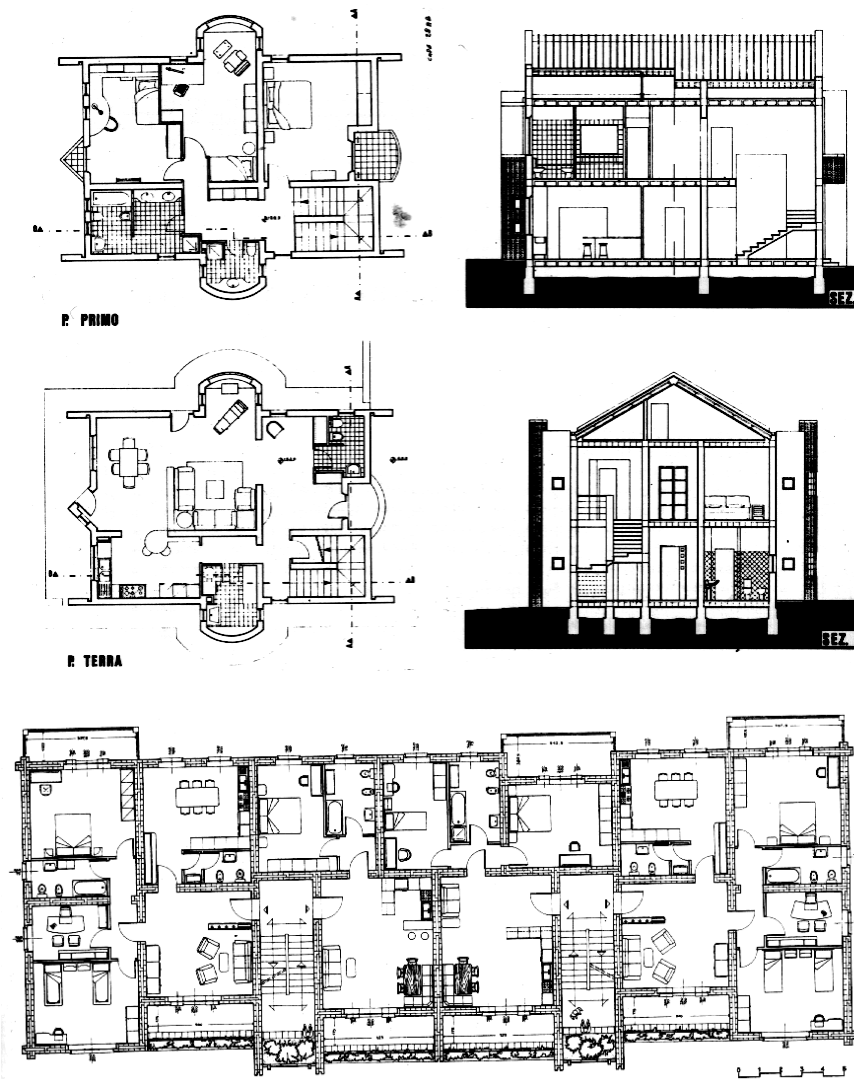


Figura 8 : Alvenaria moderna simples: Exemplos de projectos em Itália

2.2. Alvenaria armada

A alvenaria armada surgiu em diversos países como uma resposta ao deficiente desempenho da alvenaria simples às acções horizontais elevadas. Apresentam-se abaixo algumas soluções com sucesso de mercado em diferentes países e inovações recentes em fase de desenvolvimento. É corrente a combinação de paredes resistentes com lajes alveoladas ou pré-lajes, que reduzem significativamente a cofragem e o tempo de execução.

Nos últimos 30 a 40 anos, a alvenaria armada é uma solução atractiva e eficiente do ponto de vista de custo-benefício para sistemas construtivos na generalidade dos edifícios em zonas

sísmicas e não-sísmicas da América do Norte, incluindo por exemplo hotéis, edifícios residenciais, escolas, edifícios comerciais ou armazéns. A solução corrente passa pela utilização de cintas em betão armadas horizontalmente e blocos de duas células preenchidos por *grout* e armadura vertical, ver Figura 9.

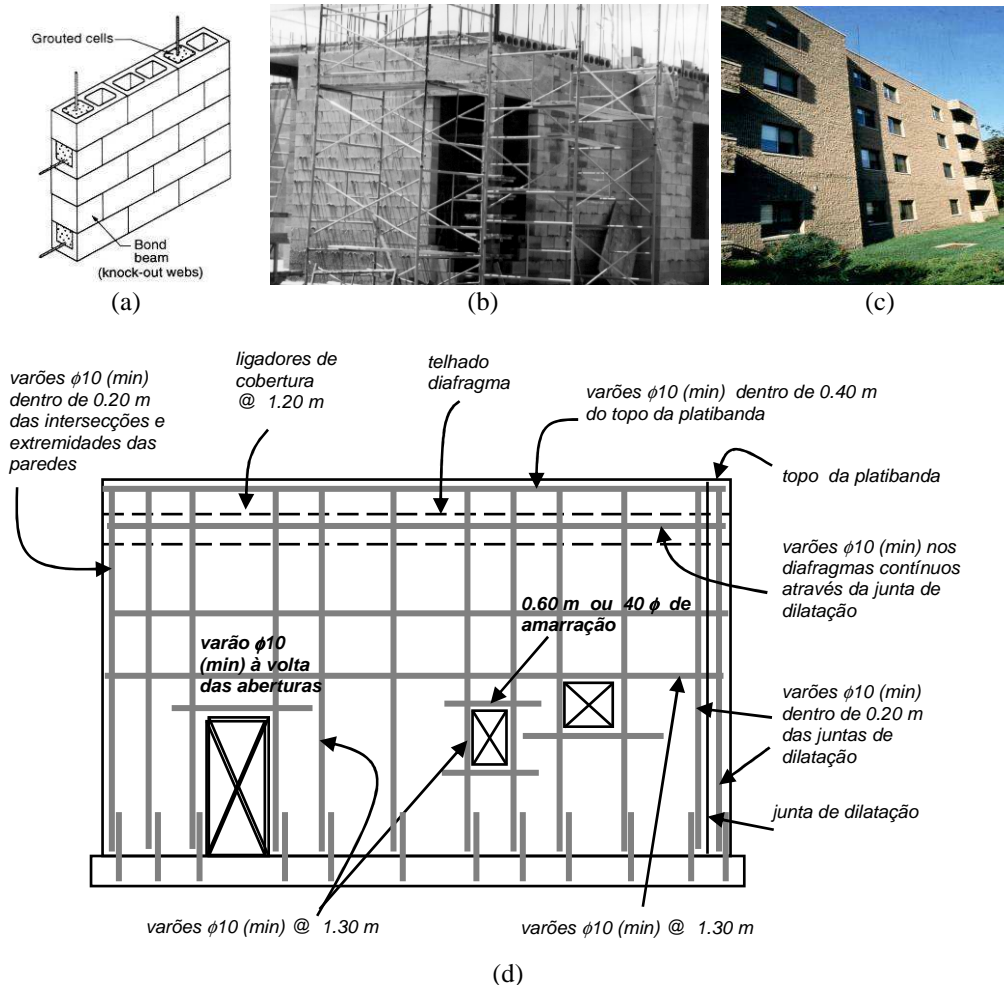
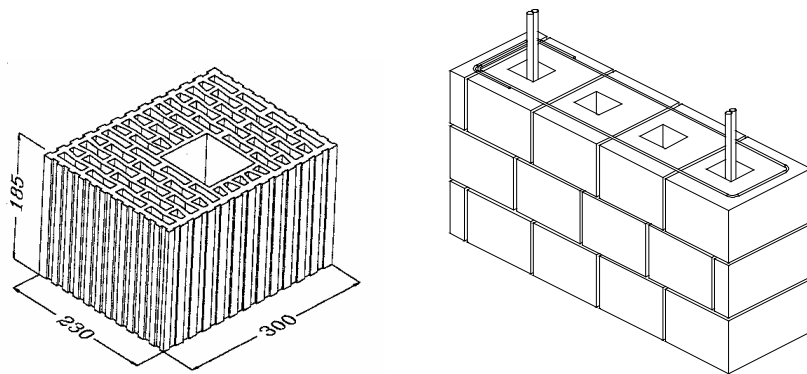


Figura 9 : Alvenaria moderna armada (solução típica americana). Exemplos de: (a) blocos e armadura; (b) execução de uma parede; (c) edifício terminado; (d) armadura numa parede com aberturas

Nos últimos 20 a 30 anos, foi desenvolvido um sistema de alvenaria armada em Itália incorporando blocos com um furo de grandes dimensões para colocação de armadura vertical e armadura corrente horizontal (com cintas fechadas), utilizando a mesma argamassa para as juntas de assentamento e para o preenchimento do furo, ver Figura 10. Foi ainda construído um edifício protótipo em alvenaria para comparação com um edifício semelhante em betão armado (com alvenaria de preenchimento), e diversos modelos para ensaio em mesa sísmica. A

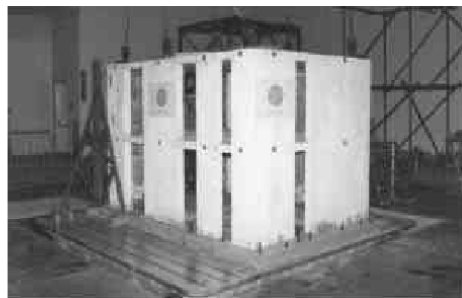
adequação do sistema proposto foi demonstrada pelos ensaios e protótipo mas a solução de alvenaria armada conheceu sucesso moderado em Itália, em contraste com o relativo sucesso da solução de alvenaria simples para edifícios de pequeno porte que se mantém até ao presente. Um dos aspectos críticos do sistema parece ser o controlo de qualidade do preenchimento do furo, bem como a respectiva aderência e protecção contra a corrosão dos varões.



(a)



(b)



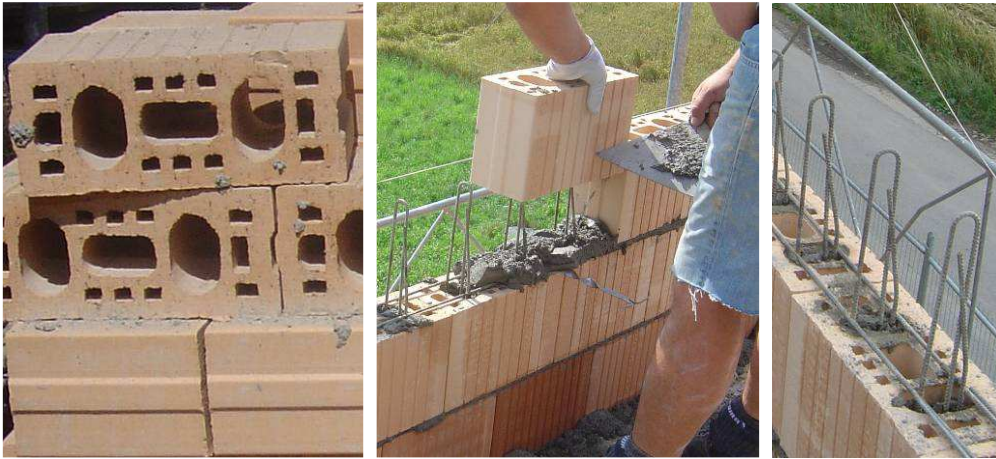
(c)

Figura 10 : Alvenaria moderna armada (solução típica italiana). Exemplos de: (a) blocos e armadura; (b) edifício protótipo; (c) ensaios em mesa sísmica [4]

Nos últimos 15 a 20 anos, foi ainda desenvolvido um sistema de alvenaria armada na Suíça incorporando blocos com dois furos de grandes dimensões para colocação de um sistema de armadura protegido contra a corrosão e complexo que, simultaneamente realiza a armadura vertical e horizontal, utilizando também a mesma argamassa para as juntas de assentamento e para o preenchimento do furo, ver Figura 11. O sistema é utilizado com frequência para todos os tipos de edifício, em soluções até médio porte (por exemplo 5 pisos).



(a)



(b)



(c)

Figura 11 : Alvenaria moderna armada (solução típica suíça com Murfor RE®). Exemplos de:
(a) blocos e armadura em laboratório; (b) execução do sistema em obra; (c) edifícios de
pequeno e médio porte.

Nos últimos 15 a 20 anos, foi também desenvolvido um sistema de alvenaria armada em Espanha incorporando armaduras treliçadas protegidas contra a corrosão, horizontalmente e verticalmente [5]. Este sistema foi originalmente desenvolvido como alternativa aos sistemas habituais utilizados em paredes não-resistentes de grande dimensão, baseados em cintas e montantes em betão armado, ver Figura 12. O sistema foi validado para utilização estrutural em Portugal, sendo os resultados preliminares particularmente positivos em termos de comportamento e facilidade de execução com unidades de alvenaria existentes no mercado, ver Figura 13 e [6,7] para detalhes.

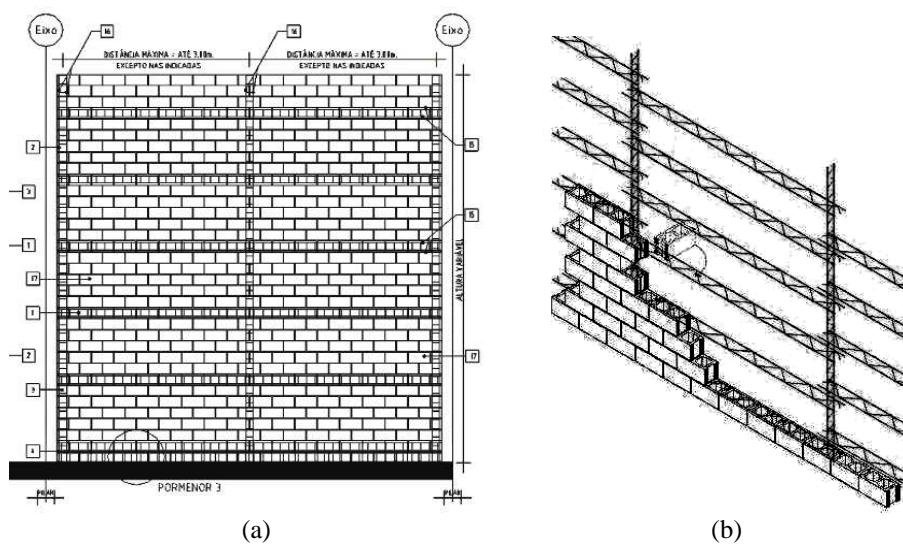


Figura 12 : Alvenaria moderna armada (solução típica espanhola com Murfor®). Exemplos de: (a) parede de alvenaria não resistente com cintas e montantes em betão armado; (b) parede não resistente alternativa com sistema de armaduras verticais e horizontais em treliça.

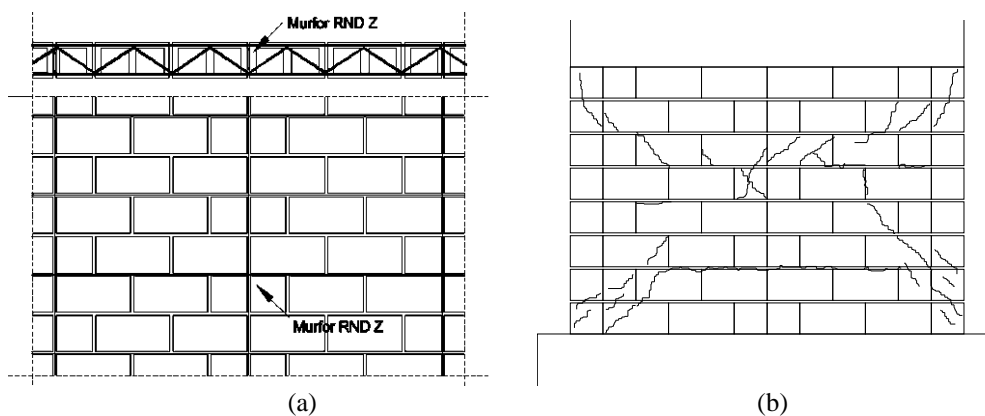


Figura 13 : Alvenaria moderna armada (solução em desenvolvimento na Universidade do Minho em colaboração com a empresa Costa & Almeida, Lda): (a) solução adoptada para as armaduras verticais e horizontais; (b) padrão de fendilhação em paredes de corte submetidas a ações cíclicas [8].

Finalmente, no âmbito do mesmo projecto de investigação [6], refere-se o desenvolvimento de uma solução em curso na Alemanha, para responder ao recente aumento da acção sísmica neste país. Esta solução contempla blocos cerâmicos de duas células, a preencher com (micro-)betão auto-compactável, ver Figura 14. O objectivo é colocar armaduras verticais no interior das juntas e armaduras horizontais em entalhes apropriados, permitindo a betonagem das paredes em simultâneo com as lajes e o funcionamento dos materiais envolvidos em conjunto (bloco, betão e armadura).

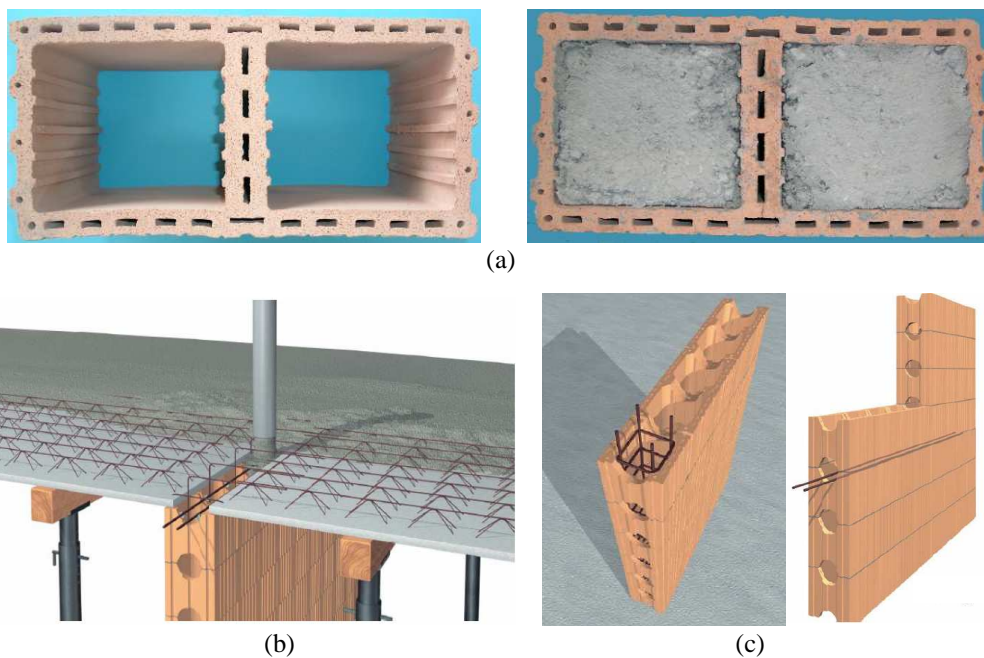


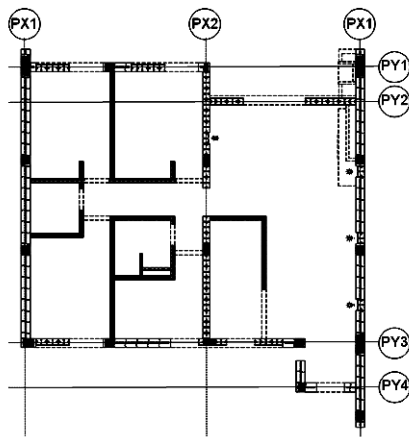
Figura 14 : Alvenaria moderna armada (solução em desenvolvimento na Alemanha): (a) bloco de alvenaria com furos de grande dimensão para preenchimento com betão auto-compactável; (b) sistema de paredes e laje a betonar em conjunto; (c) detalhes da armadura [6].

2.3. Alvenaria confinada

A alvenaria confinada é um sistema em que montantes e cintas de pequena dimensão e ligeiramente armados envolvem as paredes de alvenaria, tendo em vista essencialmente proporcionar à alvenaria uma resistência acrescida ao corte e resistência à tracção, bem como uma maior capacidade de dissipação de energia e maior ductilidade para acções horizontais. Em Portugal existem alguns exemplos de aplicação de soluções em alvenaria confinada, com apoio de engenharia e dimensionada como tal à luz da moderna normativa europeia, ver Figuras 14 a 16. Salienta-se que existem aspectos relevantes para o projecto que importa clarificar, nomeadamente a influência da armadura de junta, a influência do preenchimento da junta vertical ou as expressões a adoptar para o dimensionamento a acções combinadas. Por esta razão, concluiu-se recentemente um projecto de investigação na Universidade do Minho, em colaboração com a empresa Maxit, financiado pela Agência de Inovação [7].



(a)



(b)

Figura 15 : Alvenaria moderna confinada com blocos de betão leve: (a) esquadra da GNR de Ourique [1]; (b) conjunto habitacional no Algarve [9].



Figura 16 : Alvenaria moderna confinada com blocos cerâmicos de furação vertical: residência em Ílhavo. Fotografias gentilmente cedidas por F. Pagaimo.

3. APLICAÇÕES NO FECHAMENTO DE GRANDES VÃOS: UMA HISTÓRIA DE SUCESSO EM PORTUGAL

As paredes de edifícios devem satisfazer diversas exigências funcionais, salientando-se a segurança, a estanquidade à água da chuva, o conforto termohigrométrico e acústico, a durabilidade e a adaptação a movimentos. A solução para a conformidade destas exigências num único elemento construtivo é de resolução complexa, uma vez que as exigências não são consideradas simultaneamente pelos intervenientes envolvidos (arquitecto, engenheiro, construtor, fabricante de materiais, etc.). Refere-se em particular que o desempenho das paredes depende dos sistemas estruturais e de fundações adoptados para o edifício, sendo habitual que as anomalias estejam associadas a um comportamento deficiente de vigas, lajes e fundações, por retracção, fluência, movimentos térmicos, deformações excessivas e assentamentos do terreno.

Face à situação de diversas anomalias em paredes de enchimento e à experiência dos países europeus, a utilização da alvenaria armada nas juntas deve ser preferida à alvenaria simples, particularmente no caso das paredes envolventes. O custo da introdução de armadura nas paredes para controlo de fendilhação na estrutura é inferior a 0.05% do valor da construção (admitindo uma parede de alvenaria cada 6.0 m, um pé-direito de 2.4 m, um afastamento da armadura de 0.50 m e um valor da construção de 1500 €/m²), o que representa um valor marginal face ao impacto da fissuração tradicional em paredes. No caso habitual, trata-se da colocação de armaduras em treliça com 4 a 5 mm de diâmetro, a cada 0.40 ou 0.50 m, com 2 a 3 fiadas consecutivas na parte inferior da parede.

Em Portugal, as aplicações mais espectaculares decorreram recentemente em panos de paredes divisórias com grandes dimensões. Inúmeras construções, nomeadamente estádios, igrejas, salas de espectáculos ou centros comerciais, exigem divisórias de dimensões apreciáveis. As paredes de alvenaria representam a solução tradicional, com vantagens funcionais relativamente a soluções leves alternativas.

3.1. Aplicação a casos correntes

Ao colocar armadura nas juntas de alvenaria é possível definir paredes com uma capacidade significativa de resistência à tracção. Este novo material compósito, alvenaria estrutural, permite, por um lado, evitar a rigidez de execução e concepção da alvenaria tradicional e, por outro lado, realizar uma construção sem fissuras. Nos casos correntes de controlo de fendilhação e garantia de ductilidade das paredes, de acordo com a normativa europeia, a área da armadura não deve ser inferior a 0.03% e o espaçamento vertical não deve exceder 600 mm.

Como exemplo, para uma parede com a espessura de 0.15 m, a armadura mínima é dada por $A_{s, \min} = 0.15 \times 0.03\% = 0.45 \text{ cm}^2/\text{m}$. Se adoptarmos treliças com varões de diâmetro ϕ , igual a 4 mm, necessitamos de armaduras afastada a uma distância d , igual a 0.50 m,

$$A_s = \pi \times \phi^2 / 4 \times (2 \text{ varões}) / d = \pi \times 0.4^2 / 4 \times 2 / 0.50 = 0.50 \text{ cm}^2/\text{m} > A_{s, \min} \quad (1)$$

A armadura a colocar será então uma RND/Z.4-100, cada 0.50 m, onde RND indica “Round”, Z indica galvanizado, 4 indica o diâmetro do varão (em mm) e 100 indica o afastamento entre varões (em mm). Se a altura dos blocos for de 0.25 m, isto significa cada 2 juntas, mas se a altura dos blocos for igual a 0.20 m, isto significa alternar a colocação cada duas juntas com cada três juntas (ou seja cada 2.5 juntas), ver Figura 17.

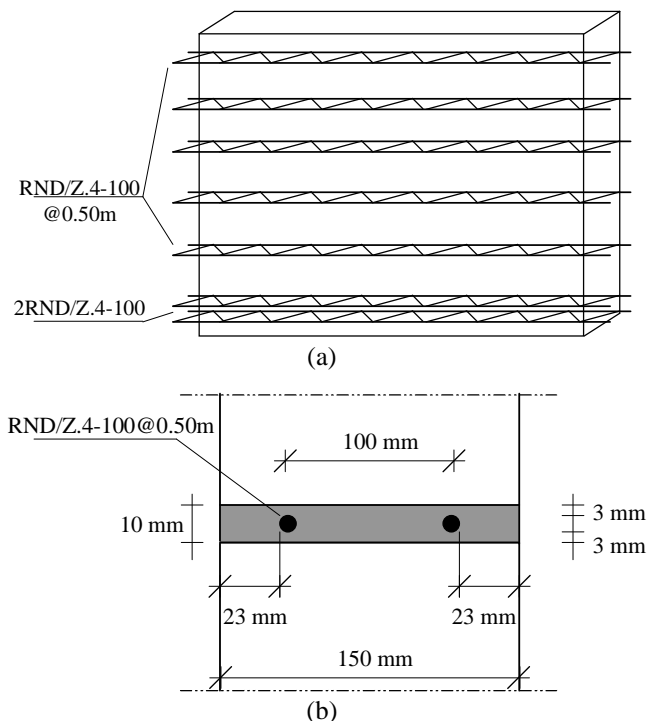


Figura 17 : Armadura para controlo de fendilhação numa parede com a espessura de 0.15 m:
(a) alçado da parede; (b) pormenor da junta, em secção transversal.

O afastamento dos varões longitudinais adoptado é de 100 mm, o que permite um recobrimento da armadura até à face da alvenaria igual 23 mm, se a junta for faceada com o bloco. Este valor é superior ao mínimo regulamentar de 15 mm. O recobrimento de argamassa abaixo e acima das armaduras colocadas é de 3 mm, superior ao mínimo regulamentar de 2 mm. Salienta-se ainda a colocação de duas camadas de armadura na base da parede (a calcular em função do vão), para permitir o desenvolvimento do efeito de arco no caso de deformação do suporte. A alvenaria armada com treliças nas juntas suporta deformações impostas, suporta flexão vertical e suporta flexão horizontal.

3.2. Aplicação a casos correntes

A construção de grandes panos em alvenaria exige atenção especial, tendo em vista a competitividade da solução (custo e prazo de execução), a segurança e o desempenho em serviço (fendilhação). Apresentam-se em seguida, alguns exemplos recentes de realizações.

3.2.1. Caracterização das acções

As paredes de alvenaria não estrutural encontram-se submetidas a acções do plano apenas devidas ao seu peso próprio. As paredes de alvenaria possuem uma rigidez muito elevada para flexão no seu plano. Em consequência, as paredes são incapazes de acompanhar a deformação das lajes, conduzindo a fenómenos de fendilhação conhecidos, tais como os representados na Figura 18a. As anomalias correntemente observadas estão associadas à deformação da laje superior (que se apoia na parede divisória) e à deformação da laje inferior (que mobiliza a resistência à tracção da parede divisória). Na Figura 18b, apresenta-se um esquema adequado para evitar estas anomalias, promovendo: (a) a separação entre a parede e a laje superior, com recurso à interposição de um material deformável (por exemplo, poliestireno expandido); (b) a separação entre a parede e a laje inferior, com recurso à interposição de uma barreira de estanquidade (por exemplo, uma membrana em PVC); (c) a colocação de armadura de junta generalizada, para controlo de fendilhação, e na base, para resistir ao peso próprio da parede. A armadura na base deve ser dimensionada, admitindo a flexão da parede entre apoios como uma viga ou viga-parede, em função da relação vão / altura da parede.

Relativamente às acções para fora do plano, sugere-se a consideração do valor característico regulamentar para a pressão dinâmica do vento w_k .

3.2.2. Estádio do Campeonato Europeu de Futebol 2004 (Euro2004)

Na Figura 19 apresentam-se exemplos de alvenaria armada em três estádios construídos para o Euro2004. Trata-se de soluções de elevado desempenho e competitivas, face à utilização tradicional de reforços horizontais e verticais com espaçamento reduzido. A armadura de junta é introduzida na argamassa em simultâneo com a construção da parede, não conduzindo praticamente a alterações no processo de construção tradicional de alvenaria.

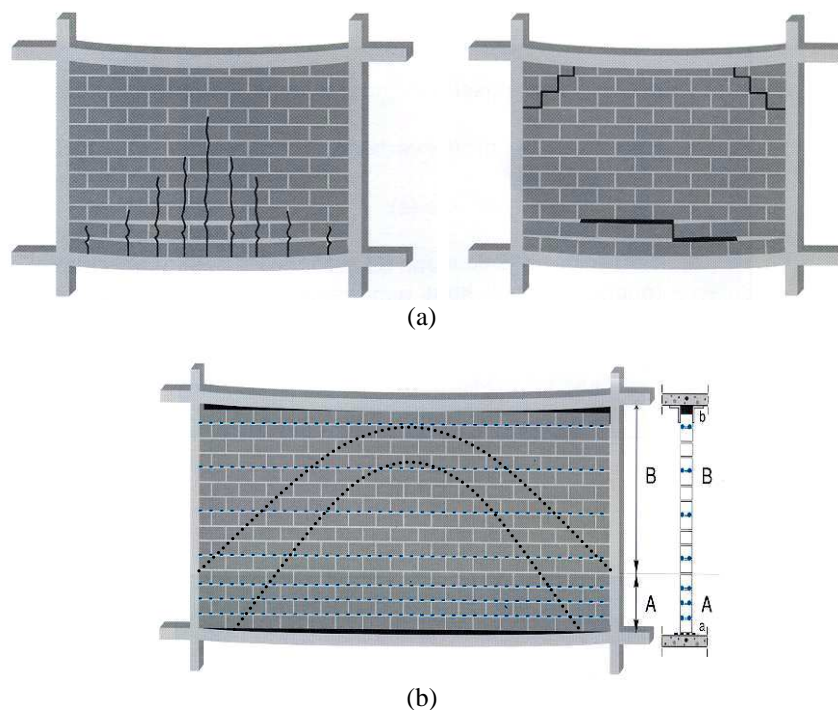


Figura 18 : Comportamento das paredes divisórias: (a) anomalias correntes associadas à deformação excessiva das lajes; (b) solução para evitar anomalias e efeito de arco entre os apoios, para o qual é necessário calcular armadura na base da parede.

Detalha-se a seguir as soluções adoptadas no novo estádio do Sporting Clube de Portugal. Os materiais utilizados são os seguintes:

- Blocos em betão $50 \times 20 \times 20$ - Grupo 3 (EC6) e resistência normalizada à compressão de 7.3 MPa. Junta de assentamento com 1.5 cm e argamassa traço 1:4 (em peso), com cimento 42,5 (Classe M6);
- Armadura de junta Murfor galvanizada, com 2 varões de 5 mm e afastamento de 0.15 m (RND/Z.5-150);
- Pilaretes realizados com betão da classe C16/20 e armadura S500.

As paredes das instalações sanitárias possuem um vão de 10.40 m e uma altura de 4.40 m, com aberturas para as portas de acesso às mesmas. A solução de execução prevista inicialmente incluía uma cinta e um montante aparente, bem como uma cantoneira e ferrolhos, para realizar a ligação destes elementos da parede à estrutura de contorno em betão armado. Na Figura 20a ilustra-se a solução adoptada, com recurso a armadura de junta. As vantagens da solução alternativa adoptada são: material homogéneo e resistente à tracção; dispensa de bloco U na viga-cinta e bloco duas células no montante, dispensa de reforços de betão armado. Daí decorre maior rapidez de execução e maior racionalidade da construção. Na Figura 20b ilustra-se o modelo de cálculo adoptado para as acções horizontais.



(a)



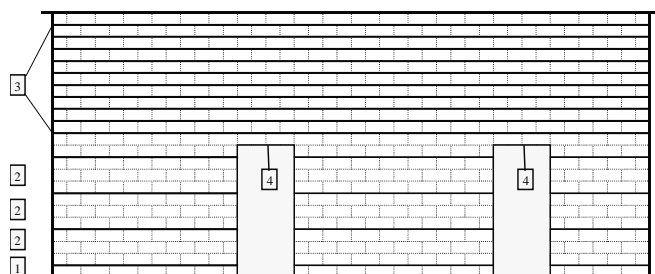
(b)



(c)

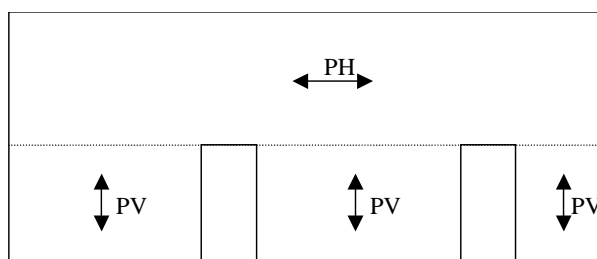
Figura 19 : Imagens e detalhes dos estádios do Euro 2004 com soluções de armadura de junta Murfor®: (a) Sporting; (b) Benfica; (c) Braga.

Para os panos de parede com elevado desenvolvimento em planta (superiores a 30 m), a solução proposta baseou-se na colocação de montantes de betão armado inseridos em blocos de duas células. Atendendo a que se utilizou armadura de junta, foi possível aumentar significativamente a separação entre os montantes. Foram calculados painéis “tipo”, indicando-se o vão máximo que cada solução consegue vencer. Em função destes resultados, a obra foi preparada, analisando o vão livre de cada painel e otimizando a solução face a esse mesmo vão livre (i.e. entre paredes transversais ou pilares).



Legenda: 1 - Uma armadura RND/Z.5-150 na base da parede; 2 - Uma armadura RND/Z.5-150 cada 3 fiadas (cada 0.645 m); 3 - Dez armaduras RND/Z.5-150, 4 - Dois ganchos LHK/S 170

(a)



(b)

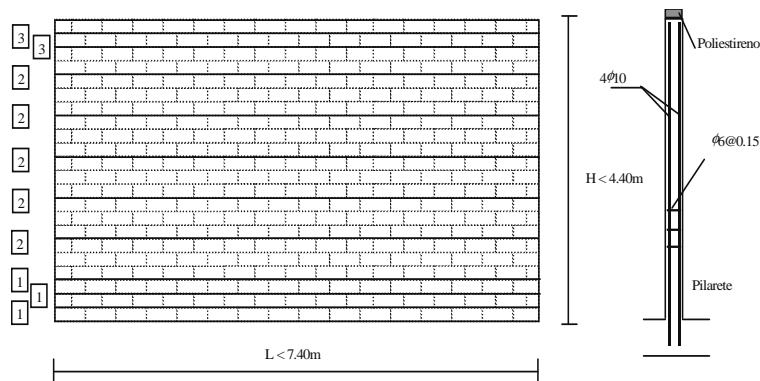
Figura 20 : Paredes de acesso às instalações sanitárias: (a) solução alternativa adoptada e (b) modelo de cálculo.

Foram utilizadas as seguintes soluções tipo (altura máxima das paredes $h < 4.40$ m), ver também Figura 21:

- Espaçamento montantes até 7.4 m, sem apoio no topo;
Armadura de junta (em geral): RND/Z.5-150, cada 3 fiadas (0.645 m). Armadura na base: 3 fiadas consecutivas. Montantes ($4\phi 16 + \phi 6 @ 0.15$)
- Espaçamento montantes até 7.4 m, com apoio no topo;
Armadura de junta (em geral): RND/Z.5-150, cada 3 fiadas (0.645 m). Armadura na base: 3 fiadas consecutivas. Armadura no topo: 2 fiadas consecutivas. Montantes ($4\phi 10 + \phi 6 @ 0.12$)
- Espaçamento montante até 9.0 m, com apoio no topo.
Armadura de junta (em geral): RND/Z.5-150, cada 2 fiadas (0.43 m). Armadura na base: 4 fiadas consecutivas. Armadura no topo: 2 fiadas consecutivas. Montantes ($4\phi 10 + \phi 6 @ 0.12$)

3.2.3. Análise comparada de custos

Num centro comercial de grandes dimensões, as paredes foram realizadas com blocos em betão $50 \times 20 \times 20$ cm, com vãos correntes de 12.0 m e alturas correntes de 5.80 m. As anomalias em construções semelhantes resultaram na prescrição de paredes de alvenaria fortemente armadas. A solução prevista originalmente contemplava montantes com $4\phi 10$ e cintas de $\phi 6 @ 20$ afastados no máximo de 3.0 m e cintas com igual armadura colocadas cada 5 fiadas (ou 1.20 m). Adicionalmente, foram previstos ferros embebidos na laje, a cada 0.40 m.



Legenda: 1 - Três armaduras RND/Z.5-150 na base da parede; 2 - Uma armadura RND/Z.5-150 cada três fiadas (cada 0.645m); 3 - Duas armaduras RND/Z.5-150 no topo da parede

Figura 21 : Exemplo de uma das soluções tipo realizadas no estádio do Sporting.

A solução prevista contemplava uma viga-cinta de $0.20 \times 0.20 \text{ m}^2$, com $A_{st} = 4\phi 10$ e $A_{st} = \phi 6@20$ cada 1.20 m. Desta forma, o custo adicional da viga-cinta por m^2 de parede, relativamente a uma parede corrente, pode ser estimado em $2.61 \text{ kg} \times 0.78\text{€}$ ($0.65\text{€} \times 1.20$, face à dobragem e amarração) + $0.0198 \text{ m}^3 \times 99.0\text{€}$ (betão C20/25, S4, agregado máximo 12.5 mm) = $4.0 \text{ €} / \text{m}^2$. O montante vertical era idêntico à viga-cinta, cada 3.00 m. O custo adicional é de $1.6 \text{ €} / \text{m}^2$ de parede. Tem ainda de ser considerado o custo da colocação dos ferros embebidos na laje e o custo adicional dos blocos de alvenaria tipo lintel (bloco em U) e tipo montante (bloco de 2 células), que se vai admitir igual a $2.0 \text{ €} / \text{m}^2$.

A alternativa proposta, semelhante às soluções adoptadas nos estádios do Euro2004, conduz a um custo de apenas $2.8 \text{ €} / \text{m}^2$ de parede. Nestes valores não se incluem os ganhos de produtividade significativos com a solução alternativa, que são da ordem de 1 para 2 (alternativa proposta vs. solução prevista), e vão ser admitidos iguais $0.45 \text{ h} / \text{m}^2$ de oficial ($10.5 \text{ €} / \text{h}$) e $0.27 \text{ h} / \text{m}^2$ de servente ($8.0 \text{ €} / \text{h}$). Estes valores conduzem a uma poupança adicional igual a $-6.9 \text{ €} / \text{m}^2$ de parede. De acordo com os valores referidos, para 20.000 m^2 de parede, a alternativa proposta conduz a uma economia igual a $[(4.0 + 1.6 + 2.0) - (2.8 - 6.9)] \text{ €} / \text{m}^2 \times 20.000 \text{ m}^2 = 234.000 \text{ €}$, sendo a parcela mais significativa associada ao ganho de produtividade.

4. CONCLUSÕES

No presente artigo apresentam-se soluções de alvenaria armada com historial de sucesso em diversos países e soluções inovadoras com desenvolvimento em curso. A armadura para juntas de alvenaria apresenta potencialidades significativas no que respeita ao controlo de anomalias em paredes e ao desenvolvimento de soluções inovadoras para alvenaria de fechamento, apresentando-se realizações importantes recentes.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projectos SINALES – “Desenvolvimento de um sistema industrial para alvenaria estrutural” – IDEIA-70-00130-2004 da Agência de Inovação, DISWALL – “Development of innovative systems for reinforced masonry walls” – COOP-CT-2005-018120 da Comissão Europeia e “Soluções inovadoras para paredes de alvenaria não resistentes” – PTDC-ECM-68188-2006 da Fundação para a Ciência e Tecnologia.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Lourenço, P.B. - “Concepção e projecto para alvenaria” em *Paredes de Alvenaria: Situação Actual e Novas Tecnologias*. Ed. por P.B Lourenço e H. de Sousa, Universidade do Minho e FEUP, 2002, p. 77-110. Disponível em www.civil.uminho.pt/masonry.
- [2] Sinha, B. - “Development and potencial of structural masonry” em *Paredes de Alvenaria: Situação Actual e Novas Tecnologias*. Ed. por P.B Lourenço e H. de Sousa, Universidade do Minho e FEUP, 2002, p. 1-16. Disponível em www.civil.uminho.pt/masonry.
- [3] Magenes, G. - “Masonry building design in seismic areas: Recent experiences and prospects from a European standpoint” em *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Ed. por M. Koller e D. Giardini, Suíça, 2006, keynote 9. Disponível em <http://www.ecees.org>.
- [4] Modena, C., da Porto, F., Valluzzi, M.R., “Reinforced and rectified clay blocks masonry”, em *Sísmica 2004*, Universidade do Minho e SPES, 2004, p.155-177. Disponível em www.civil.uminho.pt/masonry.
- [5] Adell, J.M. *La Fábrica Armada*. Editorial Munilla-Leria, 2000. 368 pp.
- [6] Mosele, F., da Porto, F., Modena, C., di Fusco, A., di Cesare, G., Vasconcelos, G., Haach, V., Lourenço, P.B., Beer, I., Schmidt, U., Brameshuber, W., Scheufler, W., Schermer, D., Zilch - “Developing innovative systems for reinforced masonry walls” em *7th International Masonry Conference*, BMS, 2006, CD-ROM. 6 pp.
- [7] Vasconcelos, G., Gouveia, J.P., Haach, V.G., Lourenço, P.B. - “Alvenaria armada: Soluções Inovadoras em Portugal” em *Paredes de Alvenaria: Inovação e Possibilidades Actuais*. Ed. por P.B Lourenço et al., Universidade do Minho e LNEC, 2007.
- [8] Haach, V.G., Vasconcelos, G., Lourenço, P.B. - “Cyclic behaviour of truss type reinforced concrete masonry walls” em *Sísmica 2007*, FEUP e SPES, 2007. No prelo.
- [9] Gouveia, J.P., Lourenço, P.B., Fontes de Melo, A. - “Alvenaria estrutural: Aplicação a um caso de estudo” em *4as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, LNEC, Lisboa, 2006, CD-ROM. 11 pp.