

Alvenaria Estrutural: Novo Processo Construtivo

António Morais

Engenheiro, Professor Associado da F.A.U.T.L.

ajmorais@fa.utl.pt

Introdução

Com o presente artigo pretende-se contribuir para a divulgação em Portugal da tecnologia alvenaria estrutural na construção de edifícios. A publicação da norma europeia sobre estruturas de alvenaria EC6 abriu um novo caminho à indústria da construção, ao permitir recuperar tecnologicamente um processo construtivo muito antigo, mas que apresenta muito interesse para o mercado da construção civil, face ao seu potencial de facilidade construtiva associado à competitividade do seu custo.

Em Portugal, esta tecnologia tem sido muito pouco empregue e é vista pela comunidade técnica dos engenheiros projectistas com pouca capacidade estrutural e portanto de uso muito restrito, de aplicação a edifícios de pequeno porte.

Esta visão restrita do potencial da alvenaria armada colide com a sua vasta utilização nos Estados Unidos, Inglaterra e Brasil, onde se construíram edifícios de grande porte, com mais de dez pisos, que atestam a capacidade desta tecnologia, quando correctamente utilizada e empregue.

O nível de desenvolvimento dos regulamentos e códigos de alvenaria estrutural daqueles países refuta a imagem que em Portugal esta tecnologia ainda possui. Portugal começa a dar os primeiros passos neste domínio e espera-se para breve a publicação da regulamentação portuguesa sobre alvenaria estrutural por parte do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Sobre a história da alvenaria estrutural

A alvenaria estrutural é uma das mais antigas formas de construir edifícios desenvolvida pelo homem. A alvenaria nas suas diversas modalidades é conhecida e utilizada profundamente desde os primórdios da história humana. Muitas construções e de vulto perduram e mantêm-se estáveis há milénios. Com a sua presença e manutenção actual validam as capacidades resistentes deste sistema estrutural, no suporte das acções actuantes, e conseqüentemente forçam-nos a alterar o modo e receio como ainda olhamos para as potencialidades da alvenaria estrutural.

Os povos primitivos desenvolveram processos e formas construtivas em função dos materiais e da tecnologia de fabrico que tinham ao seu alcance. Face à sua natural disponibilidade, sem necessidade de fabrico, o bloco de pedra foi o material de utilização mais vulgar de que a humanidade dispôs no início da sua história. Sobrepondo blocos de vários tamanhos sobre blocos, sem utilizar qualquer elemento cimentício a ligar as pedras, o homem construía as suas edificações num processo construtivo que denominamos de alvenaria. As pedras de menor dimensão preenchiam os espaços (vazios) formados pelas pedras de maiores dimensões.

Trata-se em termos classificativos de **alvenaria simples com junta não preenchida**, hoje em dia ainda muito utilizada nalgumas regiões do mundo menos desenvolvidas. Por vezes, as pedras estão revestidas por um elemento cimentício, à base de cal, gesso ou cimento. A textura da face exterior apresenta-se por vezes tratada com revestimento de elementos de barro cozido, ou mesmo pétreos, mas de dimensão uniforme.

A seguir à utilização da pedra natural, nas regiões onde esta não existia, o homem desenvolveu a técnica da fabricação artificial do tijolo de barro, argila ou mesmo lodo, o conhecido adobo, no início seco ao sol e posteriormente em forno. Construções com recurso a tijolos são conhecidas com mais de 10 000 anos, na Babilónia, Suméria, Egipto, lémen, Turquia, etc.

A civilização romana desenvolveu técnicas construtivas com recurso à pedra e aos tijolos, quer do ponto de vista da concepção de sistemas estruturais, quer dos processos construtivos que teve que criar, para edificar obras de vulto e dimensão muito apreciável, em termos de altura. Os romanos no entanto preferiam o uso da pedra, relativamente ao tijolo, mas unicamente pela sua maior durabilidade química.

Os egípcios construíram a pirâmide de Khufu cerca de 2700 anos de Cristo com 147 metros de altura. Até 1907 tratou-se da obra de maior altura construída pela humanidade, sendo neste ano ultrapassada pelo Singer Building em Nova Iorque, com 206 m.

As catedrais góticas são um bom exemplo de obras em alvenaria estrutural com junta não preenchida, que suportam de forma correcta e apropriada as acções, designadamente as sísmicas, e que ainda hoje estão a funcionar, ou seja de pé.

No norte de Portugal, construir com recurso à usualmente designada cantaria em granito é um sistema construtivo de utilização e saber tradicional e popular, ainda hoje muito utilizado.

Este património construído, que chegou até aos nossos dias, contraria e refuta o receio e desconfiança da comunidade científica na capacidade estrutural da alvenaria estrutural. Muitas destas obras estão edificadas em zonas sísmicas e suportaram diversos sismos ao longo da sua vida. O arrojo de algumas destas obras, no que à altura e esbelteza dos seus elementos construtivos diz respeito, é a prova provada que importa alterar a perspectiva de dúvida com que a comunidade científica e profissional, em especial em Portugal, olha este sistema estrutural. As universidades têm aqui um papel importante a desempenhar na desmistificação deste preconceito estrutural.

Porquê o declínio na utilização da alvenaria estrutural?

Importa desde já clarificar que a utilização da alvenaria estrutural é uma solução hoje em dia corrente na construção civil em países como Estados Unidos, Canadá, Austrália, Nova Zelândia, Brasil e Inglaterra. Estes países, apoiados em forte investigação, já há várias dezenas de anos que regulamentaram a construção da alvenaria estrutural e tiram partido das vantagens económicas que esta transporta em si.

Infelizmente, Portugal não acompanhou a evolução da indústria de construção civil ocorrida nestes países relativamente à alvenaria estrutural (note-se, conforme referido acima, que ainda hoje não existe qualquer regulamentação sobre esta matéria no nosso país).

A construção em alvenaria, embora de utilização muito antiga, sofreu no tempo uma evolução tecnológica muito lenta. É de algum modo estranho que sendo a alvenaria um sistema construtivo muito simples, não impondo grande tecnicidade na sua aplicação, nem requerendo trabalhadores com especial formação, durante muito tempo não foi estudado o seu comportamento estrutural, estático e dinâmico. Isto apesar da teoria e técnica construtiva ter sofrido grandes avanços e progressos a partir dos anos de 1700 com a formulação das teorias de Young, Euler e Coulomb, entre outros, que permitiram, com o apoio da experimentação, o desenvolvimento da moderna teoria de cálculo à ruptura (método dos estados limites).

Em nossa opinião, muito do atraso no desenvolvimento tecnológico e da relutância dos projectistas em recorrerem às soluções em alvenaria estrutural residem na **dificuldade** do tratamento analítico das estruturas em alvenaria. Apesar da sua aparente simplicidade, é muito mais complexa a análise de uma estrutura de alvenaria do que o tratamento analítico de um pórtico ou de uma laje. Isto porque muitas das hipóteses tradicionais da Teoria da Elasticidade não são de aplicação fácil a um **material heterogéneo composto** de dois elementos distinto, junta e bloco. Difícil por conseguinte de modelar com os modelos disponíveis até há uma década atrás.

Os modelos de análise estrutural de alvenarias são muito recentes e ainda de pouca aplicação prática por parte da comunidade projectista, necessitando ainda de evoluir na elaboração de critérios e métodos de projecto e dimensionamento simples e eficazes.

A complexidade da análise estrutural somente foi ultrapassada com o desenvolvimento da capacidade dos computadores que permitiram o advento de soluções informáticas mais poderosas, com recurso ao método dos elementos finitos. A elaboração de programas de cálculo apropriados permitiu ultrapassar a dificuldade de modelar a fenomenologia estrutural presente na alvenaria. Hoje em dia já é possível analisar estruturalmente uma estrutura de alvenaria.

O pouco interesse do mundo académico no estudo e investigação do tratamento analítico da alvenaria estrutural está associado a esta dificuldade existente na abordagem mecânica desta matéria.

Esta incapacidade analítica de análise mecânica do comportamento da alvenaria, ao limitar a investigação e por arrasto condicionar a produção de métodos de análise consistentes e actuais, dentro da filosofia dos estados limites, **impediu a elaboração de regulamentos e códigos** relativos ao projecto e construção de edifícios em alvenaria estrutural.

A inexistência de regulamentos e códigos relativos à alvenaria estrutural, que disciplinem e orientem os projectistas no dimensionamento das estruturas de alvenaria constituiu em nossa opinião a principal razão do grande entrave à sua utilização. Com efeito, face ao mundo jurídico-administrativo que a humanidade desenvolveu, não é possível projectar edifícios em alvenaria estrutural, por ausência de regulamento. Nem as autarquias licenciam, nem os projectistas arriscam conceber projectos com este sistema estrutural, dado o **vazio** legal.

Como a decisão de elaborar regulamentos técnicos é pressionada, e precedida, sempre por estudos de suporte, realizados pelo sector académico e de investigação, facilmente se compreende que, dada a estagnação universitária existente nesta matéria, as autoridades competentes não tenham produzido a legislação apropriada de enquadramento da actividade de edifícios em alvenaria estrutural. Face a este condicionalismo, a própria tradição e saber, de construir em cantaria de granito, se perdeu.

Constatamos assim, face ao exposto anteriormente, que a razão da não utilização deste sistema estrutural não é devida a incapacidade mecânica, mas sim à falta de regulamentação e ao não ensino e investigação do funcionamento da alvenaria estrutural. Nas licenciaturas de engenharia civil existem cadeiras sobre análise e dimensionamento de estruturas de betão armado e aço, mas ainda está ausente a disciplina alvenaria estrutural.

Obviamente que o aparecimento do betão e do subsequente betão armado ajudou à menorização da alvenaria estrutural, retirando-lhe competitividade face ao novo material emergente. Trata-se de um material mais resistente e económico às acções horizontais. Com este novo material, a partir de um certo número de pisos, os edifícios em alvenaria estrutural deixaram de ser competitivos em termos económicos.

A maior simplicidade e facilidade de análise e tratamento analítico, deste material, permitiram e possibilitou uma evolução e desenvolvimento mais rápido dos métodos de análise e dimensionamento por parte da comunidade investigadora. Esta facilidade e rapidez de desenvolvimento, acompanhou de perto as novas concepções formuladas, conceptualmente, para o dimensionamento de estruturas, a filosofia do método dos estados limites e a da verificação da segurança. Idêntico processo de consequências face à alvenaria estrutural ocorreu com o material aço.

Acresce que o material betão armado, face às suas características, permitiu o desenvolvimento de técnicas e meios de produção de fabricação em série, com ganhos de qualidade e quantidade controlada, no fabrico dos elementos de betão armado, quando comparados com as técnicas então existentes na construção de obras de alvenaria estrutural.

É inegável que as soluções em betão armado têm outras potencialidades em termos de formas, tão do agrado dos arquitectos, permitindo outra liberdade criadora no projecto dos espaços, relativamente aos edifícios concebidos em alvenaria estrutural. A comunidade dos arquitectos não morre de amores por este sistema estrutural.

O processo de projectar em alvenaria estrutural contém algumas especificidades no campo estrutural condicionadoras da solução global espacial e geométrica do edifício, como veremos de seguida. Uma estrutura reticulada em betão armado, ou mesmo aço, apresenta para o arquitecto uma versatilidade que o leva a esquecer-se em regra na fase de projecto de considerar e contemplar uma estrutura. O sentimento sempre presente é que o engenheiro logo resolve. Com alvenaria estrutural já não é assim. A concepção arquitectónica está intimamente ligada e dependente da solução de alvenaria estrutural considerada.

Com soluções de estruturas reticuladas, os aspectos formais libertam-se e são os determinantes no projecto de um edifício, mas em alvenaria estrutural, os aspectos tecnológicos e construtivos ganham importância e têm que ser tratados em pé de igualdade com os relativos à forma. Esta depende e é função da solução estrutural em alvenaria. Por conseguinte também a classe dos arquitectos contribuiu para a secundarização e abandono do recurso da solução alvenaria estrutural.

Sintetizando, temporalmente, o colapso da alvenaria como material estrutural começou a ocorrer nas décadas de vinte e trinta do século XX, com a introdução de regulamentos nos países da Europa para as estruturas de betão armado.

A alvenaria reduziu a sua utilização em edifícios unicamente à função de compartimentação e delimitação dos espaços.

O que é a alvenaria estrutural?

Alvenaria estrutural é um conceito de estrutura, onde as próprias paredes de delimitação do espaço da edificação desempenham igualmente em **simultâneo** a função de suporte e estabilidade do edifício, para todas as acções ocorrentes.

As paredes de alvenaria dos edifícios, historicamente, com o aparecimento e desenvolvimento das estruturas reticuladas de betão armado e aço, deixaram de assegurar a estabilidade das edificações, passando esta função a ser desempenhada por uma estrutura **autónoma** e individualizada.

Para ser competitiva, nos países desenvolvidos, a alvenaria terá que ser encarada como uma solução construtiva que contempla as funções estruturais, compartimentação, estéticas, térmicas, acústicas, de resistência ao fogo e de impermeabilização à água e humidade.

Convém notar e assentar, em termos de conceito, que num edifício, a alvenaria desempenha **sempre** as funções de delimitação do espaço, de protecção aos agentes externos (água, humidade, térmica, acústica). Se além destas funções assegurar a estabilidade e resistência do edifício, dizemos então que a alvenaria é também **estrutural**. Com este sistema estrutural, o pavimento terá sempre que ser realizado com laje de funcionamento estrutural ortotrópico (duas direcções principais de redistribuição das cargas horizontais), assentando em todo o seu perímetro nas paredes de alvenaria. Cria-se uma caixa tridimensional de elementos estruturais.

A característica tipológica marcante deste sistema construtivo é assim a presença de elementos verticais contínuos em malha ortogonal, ou seja, perpendiculares entre si, criando células em planta. Definem **uma unidade estrutural**, constituída pela associação em planta de paredes segundo a direcção x e segundo a direcção y. O conjunto das paredes verticais segundo duas direcções perpendiculares associadas às lajes de pisos forma a unidade estrutural **cúbica**, tridimensional. Do ponto de vista da concepção dos espaços, em termos de projecto, o edifício é erigido pela repetição desta unidade estrutural.

Esta **tridimensionalidade** do sistema é a sua característica essencial. A concepção arquitectónica tem que a contemplar, porque na sua ausência o sistema não funciona do ponto de vista estrutural. O espaçamento entre paredes perpendiculares, ou seja, o seu comprimento, não pode ultrapassar determinado valor e a ligação entre paredes tem que ser eficaz, mediante mecanismos apropriados que garantam uma efectiva solidarização (ganchos, conectores, ligadores, grelhas, etc.).

Do ponto de vista económico, vários investigadores têm demonstrado as virtualidades da solução alvenaria estrutural face ao betão armado e aço, para uma certa classe de edifícios.

J. Rei, no seu estudo comparativo presente na tese de mestrado no IST, conclui que para edifícios de pequeno e médio porte a alvenaria é competitiva no plano económico, quando comparada com as soluções tradicionais de betão armado. De igual modo, Tauil, na USP, Brasil, demonstra que a construção em alvenaria armada tem uma redução de custos na ordem dos **25%**, relativamente à construção tradicional de betão armado. Igual conclusão obteve J. Abrantes no seu relato presente à SIMATEC, Lisboa, em 1985. A poupança associada à maior rapidez de construção torna este sistema muito competitivo para uma certa franja de edifícios.

Outra vantagem desta solução construtiva é a relacionada com o custo do equipamento construtivo, que é mais baixo. Como não há produção de betão, as máquinas necessárias para produção e bombagem de argamassa e calda de cimento (grout) são mais simples, menos potentes, logo de menor preço. Por acréscimo, não é necessário recorrer a sistemas de andaimes exteriores.

Em desvantagem está a necessidade de fiscalizar a obra em contínuo, pelo que se impõe a necessidade de um inspector em permanência na obra. Note-se que este inspector não pode ser o tradicional fiscal de obras. Impõe-se a necessidade desta função ser assegurada por um técnico engenheiro civil com formação própria e específica em alvenaria estrutural.

O desenvolvimento da alvenaria estrutural tem vindo a processar-se na generalidade dos países face ao seu potencial económico. A entrada em vigor nesses países de regulamentação própria tem facilitado a implementação da alvenaria estrutural. A Europa deu igualmente passos nesse sentido ao regulamentar este sistema estrutural, mediante a publicação do eurocódigo **EC6**, complementado pelas partes do eurocódigo EC8 que à alvenaria estrutural dizem respeito. Esta atitude de reconhecimento das potencialidades da alvenaria estrutural, assumida pela União Europeia, vai necessariamente induzir estudos e investigação por parte da comunidade académica e de investigação portuguesa. É somente uma questão de tempo.

O eurocódigo 6 estabelece os fundamentos para o projecto e construção em alvenaria estrutural, executada com blocos de forma regular, assentes com argamassa de areia natural ou britada. O eurocódigo distingue três classes de blocos individuais, em função de determinadas características, associadas principalmente à percentagem e dimensão de furação presente em cada bloco. Os materiais possíveis de utilização para a materialização de cada bloco individual são cerâmicos, sílico-calcáreos, de betão, betão celular autoclavado e de pedra natural.

Os blocos artificiais podem conter furação vertical ou horizontal, de preferência vertical porque permite armar ou pré-esforçar a alvenaria nesta direcção, conferindo-lhe outra capacidade de trabalho relativamente à flexão na direcção perpendicular ao seu plano, potenciando o seu desempenho quer às acções sísmicas, quer às acções perpendiculares à parede.

Já existe regulamentação europeia relativa a este sistema, importa agora que os industriais produtores invistam no **desenvolvimento** de blocos e soluções construtivas de aplicação deste sistema estrutural. A comunidade universitária tem aqui um papel importante a desempenhar e um vasto campo de intervenção possível.

A alvenaria estrutural é sempre constituída no mínimo por dois elementos distintos com intervenção na fenomenologia estrutural: **o bloco individual e a junta**. A junta pode ou não ser preenchida por um material cimentício, em geral a argamassa.

O desempenho da alvenaria às acções horizontais depende muito da **carga vertical** que sobre ela actua. Embora pareça um paradoxo, quanto maior for a acção vertical actuante sobre a parede, maior será a sua capacidade resistente às acções horizontais, designadamente sísmicas; daí a razão da considerável espessura das paredes e arcos da construção antiga em alvenaria.

Na evolução do papel estrutural das alvenarias, com a finalidade de dotar a alvenaria com maior capacidade resistente, em especial às acções horizontais sísmicas, recorreu-se à introdução de armaduras na alvenaria, surgindo assim a alvenaria armada. A inserção da armadura pode ser horizontal, no seio da argamassa da junta, e/ou na direcção vertical.

O efeito da presença das armaduras não é tanto o aumento da resistência, pouco significativo, mas sim a **ductilidade** que fornece à alvenaria, em especial a capacidade de suportar ciclos alternados de carga, sem degradação rápida da sua rigidez. Em cálculos por nós efectuados, concluímos que o aumento de resistência, em termos de esforços, não ultrapassa os 15%, face à alvenaria simples.

A alvenaria tem um funcionamento deficiente para esforços de tracção, mesmo para a alvenaria armada, pelo que a **geometria da concepção formal** é aqui o elemento fundamental; condição necessária e suficiente para se atingirem níveis apropriados de resistência em especial às acções sísmicas.

Investigações por nós efectuada, cujos resultados constam da nossa tese de doutoramento, mostram que as paredes de alvenaria que trabalham por flexão não apresentam a fiabilidade estrutural de resistência aos sismos, que supostamente seria expectável.

Conforme se mostrou no trabalho referido, contrariamente ao que é assumido usualmente, a parede de alvenaria, quando em trabalho de flexão, não entra em ruptura na zona traccionada, mas sim na zona comprimida. Entra aqui em acção a fenomenologia mecânica desenvolvida pelo conjunto bloco mais a junta argamassada.

Dado que o bloco e a argamassa têm deformabilidades diferentes, distintos módulos de elasticidade, então, os dois materiais têm que compatibilizar as suas deformações; igualá-las. Face a esta necessidade resulta um estado de tensão **biaxial** para os dois materiais. Mesmo para cargas verticais, o bloco fica sujeito a tensão de compressão na direcção vertical e a tensão de tracção na horizontal. A argamassa fica sujeita somente a tensões de compressão, quer na direcção vertical, quer na horizontal.

A parede, quando em flexão segundo o seu próprio plano, do lado traccionado da flexão, diminui a tensão vertical de compressão, diminuindo por conseguinte nesse lado traccionado a tensão de tracção horizontal. Mas do lado comprimido da flexão, ocorre algo diferente. A tensão vertical que é de compressão aumenta; força então maior trabalho de compatibilização com a argamassa, ou seja, **aumenta a tensão de tracção horizontal**, potenciando-se assim a ruptura. Não é assim linear que a parede de alvenaria aumente a sua capacidade resistente com a capacidade de trabalhar por flexão, quando está carregada segundo o seu plano com acções horizontais.

Todos os edifícios têm um sistema específico para resistir a **acções laterais horizontais** e posterior transferência destas para a fundação. Basicamente temos, no plano vertical, três tipos de sistemas para produzir este trabalho: paredes de corte, pórticos, treliças.

Face aos resultados encontrados, e referidos acima, para as paredes de alvenaria é aconselhável uma utilização de paredes com funcionamento preferencial **por corte**, em alternativa ao modo de trabalho por flexão. Daí o recurso preferencial a paredes de corte em edifícios de alvenaria estrutural.

A concepção formal do edifício tem que ser realizada de modo a contemplar a existência de tais paredes com funcionamento por corte. Isto condiciona o comprimento e altura das paredes no desenho da planta arquitectónica. Segundo cálculos por nós efectuados, o quociente altura versus comprimento **não deve ultrapassar a unidade**, para que se consiga o funcionamento desejado por corte.

Em termos classificativos, e de modo geral, podem-se considerar seis tipos de soluções estruturais em que intervêm as alvenarias:

- > Alvenaria simples – constituídas por elementos solidarizados por argamassa e que apresentam comportamento muito pouco dúctil. A estabilidade às acções horizontais é essencialmente assegurada por gravidade (peso);
- > Alvenaria parcialmente armada – constituída por elementos solidarizados por argamassa e por varões de aço dispostos na vertical e na horizontal para assegurar capacidade de trabalho à flexão e ductilidade à parede no seu modo de funcionamento por corte; mas a disposição destas armaduras não é contínua, concentrando-se a sua disposição em determinados pontos da alvenaria, resultando numa parede de alvenaria com um esqueleto de armaduras;
- > Alvenaria totalmente armada – neste caso, relativamente ao anterior, a distribuição da armadura é contínua e uniforme em toda a alvenaria, quer na horizontal, quer na vertical;
- > Alvenaria confinada – constituída por troços de alvenaria simples delimitados por montantes de betão armado, dispostos estes segundo espaçamentos regrados e em determinadas localizações específicas do edifício;
- > Alvenaria pré-esforçada – constituída por alvenaria simples que é pré-esforçada através de varões colocados no seu interior, fornecendo assim carga vertical artificial do exterior, de modo a aumentar a resistência ao corte e por conseguinte a capacidade de suportar acções horizontais;
- > Alvenaria de preenchimento – panos de alvenaria inseridos no interior do plano de um pórtico, preenchendo-o e travando-o.

Conclusão

Com este artigo pretende-se contribuir para a divulgação em Portugal do sistema alvenaria estrutural, enunciando as suas vantagens essenciais quando comparado com os sistemas tradicionais de construção de edifícios.

Do exposto concluímos que de momento não existem óbices regulamentares à sua utilização, face à recente publicação do eurocódigo 6 pela União Europeia relativa ao emprego desta solução construtiva.

As vantagens do sistema para classes de edifícios de médio porte, com arquitectura regular e repetitiva são a sua maior rapidez de execução e por conseguinte menor custo, tornando-as competitivas face às soluções tradicionais de betão armado.

Os equipamentos a utilizar na execução das obras são de tecnicidade menor que os necessários utilizar em obras de betão, pelo que a rapidez e menor custo associados potenciam a competitividade deste sistema construtivo.

Cumprindo com os requisitos do regulamento, o sistema construtivo tem a adequada capacidade de suportar acções sísmicas, garantido que esteja no desenho arquitectónico a solução tridimensional de paredes com funcionamento estrutural por corte.

Importa agora que os industriais invistam no desenvolvimento da pré-fabricação de blocos apropriados ao sistema e normalizem as soluções construtivas necessárias à sua correcta utilização.