

Técnicas de reforço sísmico

Techniques for seismic strengthening

Aníbal Costa⁽¹⁾, António Arêde⁽²⁾, Alexandre Costa⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidade de Aveiro, ⁽²⁾ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Abstract

This chapter focuses on the description of several techniques used for reinforcing old masonry buildings of Faial Island, Azores, typically made of poor fabric and/or of regular block geometry. In first place the various causes of observed damage are described and analysed first as found in that island after the earthquake, leading to the identification of the main strengthening strategies. For each type of damage, a suitable solution is proposed, bearing in mind the two basic intervention lines related to damage of the whole structure and damage of structural parts or elements.

1. Generalidades e enquadramento

A ocorrência contínua de sismos no Arquipélago dos Açores afecta as construções existentes, principalmente as de alvenaria de pedra de pior qualidade (nomeadamente as das freguesias rurais) ficando estas mais desligadas e fissuradas, mesmo que estes sismos sejam de baixa ou moderada intensidade. A duração do sismo, o número de réplicas adicionais e a existência da importante componente vertical são factores de degradação que originam danos permanentes que podem incluir desconexões, fissuras e desaprumos, etc., que, quando associados entre si,, reduzem a resistência global e aceleram os processos de deterioração. Se não forem colmatados, estes

danos permanentes podem induzir o colapso décadas depois do sismo, dado que as desconexões (entre as paredes da fachada e as interiores, por exemplo), os desaprumos e as fissuras produzidas nas várias construções em resultado dos sismos ocorridos ao longo dos séculos e da falta de manutenção associada, poderão ser a causa principal do processo de decadência que conduz ao colapso dessas construções, (Crocì, 1998).

Afortunadamente, em muitas situações isto normalmente reduz a rigidez global da estrutura de forma que o período natural aumenta e assim são induzidas menores forças sísmicas na construção (em consonância com o espectro de resposta). No entanto, no caso das construções existentes no Arquipélago Açoriano esta descida da frequência própria pode trazer problemas de ressonância, principalmente para a componente vertical do sismo, prejudicando ainda mais o seu comportamento estrutural e dando origem ao colapso das paredes.

Por outro lado há outros efeitos (assentamentos de fundações, variações de temperatura, acção da água, etc.), cujas causas se manifestam ao longo dos tempos e que podem introduzir tensões adicionais nos elementos estruturais e não estruturais, mesmo que estes não apresentem fendas ou outros sinais de dano visíveis.

A inevitabilidade da ocorrência de sismos deverá ser uma razão adicional para a necessidade de uma intervenção de reforço que assegure as exigências de

segurança. Neste caso a intervenção deverá englobar sempre o reforço das construções, porque só assim será possível dotá-las de uma adequada resistência aos sismos que, para além de acautelar a salvaguarda de pessoas e bens, preservem a memória do parque edificado para as gerações futuras.

2. Caracterização das construções

2.1 Introdução

O tipo de danos que aparece nas diversas construções tem normalmente características semelhantes que decorrem do processo construtivo e dos materiais tradicionalmente usados. Para a definição das técnicas de reforço a usar é assim indispensável o conhecimento dos danos normalmente associados a cada tipo de construção tal como descrito em (Costa *et al.*, 2008).

O comportamento global de uma construção depende em grande parte da sua constituição e das ligações entre os seus elementos constituintes. As ligações entre paredes, pavimentos e telhados são essenciais para a sua resistência global pois condicionam quer o nível de tensão quer o nível de deformação.

No caso das estruturas de alvenaria de pedra, os pavimentos e as coberturas devem estar bem ligados às paredes para funcionarem como apoio destas ao longo da altura da construção e devem apresentar ductilidade suficiente para assegurar alguma dissipação da energia. Além disso, a função dos pavimentos e das coberturas, no caso geral de pavimentos rígidos, é a de distribuir as forças aplicadas à construção pelos elementos estruturais resistentes proporcionalmente à rigidez que apresentam no seu plano. No caso da construção tipicamente açoriana, com pavimentos e coberturas de madeira, a sua rigidez no próprio plano é bastante reduzida pelo que o contributo destes elementos será pouco eficaz na distribuição das forças horizontais. Nestas condições, as forças originadas pelo sismo serão essencialmente absorvidas pelas

paredes e serão forças distribuídas em altura e proporcionais à massa das paredes, sendo essencial o apoio das paredes ao longo da altura para melhorar o seu comportamento, fundamentalmente para a acção fora do plano.

O comportamento global da estrutura perante a acção sísmica é influenciado também pelas possíveis excentricidades existentes entre o centro de rigidez e o centro de massa. A posição destes dois centros é muito condicionada pela arquitectura da construção, mas (felizmente) a maior parte das construções açorianas, nomeadamente as mais antigas, são bastantes regulares em planta e altura. No caso das construções mais modernas e no caso das mais antigas que entretanto foram sujeitas a alterações, esta situação de regularidade já não é tão frequente pelo que nestes casos poderão ocorrer fenómenos de torção muito desfavoráveis à estabilidade estrutural.

2.2. Características da acção sísmica

O tipo de sismo próximo que normalmente afecta as ilhas dos Açores possui características de duração, magnitude e frequência predominante que interferem claramente com o tipo de construção (forma, tipologia, sistema construtivo, materiais constituintes, etc.) e por isso afecta estruturas mais rígidas (moradias, edifícios de dois a três pisos e principalmente construções em alvenaria). Este tipo de sismo caracteriza-se por magnitudes entre 5 e 6 na escala de Richter, com duração em torno dos 10 segundos e frequência predominante entre 2 e 3 Hz para as componentes horizontais. Para além disso regista ainda outra característica importante, que é o facto de possuir uma componente vertical com valores da aceleração próximos do das componentes horizontais e com uma frequência predominante elevada (entre 6 a 7 Hz), o que para as construções de alvenaria e de terra é normalmente muito desfavorável.

2.3. Características das construções

O comportamento global de uma construção depende muito dos sistemas construtivos e dos materiais constituintes usados na sua execução. Se a construção remonta a um período anterior ao século XX, na maioria dos casos está-se em presença de uma estrutura realizada por paredes de alvenaria no exterior e no interior por uma estrutura essencialmente de madeira (Figura 1). Em alguns casos, ao nível da cave ou do rés-do-chão poderá apresentar, no interior, paredes ou arcos de alvenaria para realizar a estrutura resistente. Muitas vezes estas situações só aparecem em casas nos centros históricos de cidades e normalmente associadas a casas "ricas". Outras vezes a estrutura interior apresenta pilares de pedra ou de madeira, que dão apoio às "trolhas" (vigas principais em madeira), que por sua vez recebem os barrotes para realizarem o soalho de madeira.

O tipo de alvenaria de pedra que se pode encontrar na construção açoriana é essencialmente o seguinte:

- Alvenaria de pedra irregular: construídas com pedras de vários tipos e tamanhos (basalto, arenito, tufa, etc.) e em várias formas, colocadas aleatoriamente, executada de diferentes maneiras e usando como ligante argamassas com várias características, normalmente realizadas com barro ou outros materiais e em grande quantidade (Figura 2).
- Alvenaria de pedra com junta seca: ocorrendo frequentemente nas ilhas do Faial e do Pico, são usualmente constituídas por pedras de dimensões regulares em paredes que se caracterizam por não terem juntas argamassadas (Figura 3).
- Alvenarias de duas folhas: realizadas com duas paredes de revestimento exteriores com a cavidade resultante enchida de material de pior qualidade (Figura 4).



Figura 1
Construções em alvenaria de pedra no exterior e estrutura de madeira no interior.

- Alvenaria de pedra de boa qualidade: bastante regular, frequentemente de pedras com arestas retilíneas ou faces paralelas e com resistência adequada (Figura 5).

As construções mais recentes, finais do século XX, são realizadas em alvenaria de blocos confinada por pilares de betão armado, distribuídos ao longo da construção materializando montantes verticais e por vigas de betão armado que constituem cintas horizontais, realizadas ao nível das fundações, lajes e cobertura (Figura 6).

Resumindo, pode concluir-se que a maior parte das paredes de alvenaria de pedra nas ilhas do Faial e do Pico, consistem essencialmente em paredes de duas folhas, revestidas ou não com argamassa, e com pedra de melhor qualidade nas ombreiras, padieiras (vergas), cunhais, cornijas, etc. O interior destas paredes é normalmente constituído por pedras pequenas, solo e outros materiais, sendo geralmente



Figura 2 – Construções em alvenaria de pedra irregular (tipo 1).



Figura 3 – Construções em alvenaria de pedra com junta seca (tipo 2).



Figura 4 – Construções em alvenaria de pedra de duas folhas (tipo 3).

de má qualidade. Na parte interior as padieiras ou vergas são realizadas em madeira (Figura 7).

Importa salientar que os revestimentos aplicados nas paredes desempenham um papel importante no comportamento estrutural, podendo, quando devidamente executados, contribuir de um modo importante para o bom desempenho estrutural das construções. Por outro lado, quando não devidamente executados, podem fissurar facilmente, em nada não contribuindo para o comportamento estrutural e podendo (eventualmente) prejudicar esse mesmo comportamento.

2.4. Comportamento global e danos observados no pós-sismo

Após a ocorrência de um sismo, as paredes de alvenaria podem apresentar um vasto tipo de danos e de deformações, dependentes quer do sismo quer das próprias características das construções (Costa *et al.*, 2008).

Nas construções em alvenaria as características dos danos estão relacionadas estritamente com o tipo de alvenaria empregue nessa construção, em concordância com a classificação descrita na secção anterior. Observa-se assim os seguintes tipos de danos:

- Nas alvenarias de pedra irregular (tipo 1): sendo a argamassa de má qualidade, em cada bloco individual geram-se forças de inércia durante o sismo que excedem a resistência da argamassa, sendo as pedras puxadas para fora do plano e podendo dar origem a desaprumos das paredes ou até a colapsos de toda a parede (Figura 8 a);
- Nas alvenarias de pedra com junta seca (tipo 2): a não existência de argamassa origina que a resistência das paredes se baseie, essencialmente, no atrito entre as pedras, o que dá origem a colapsos generalizados (Figura 8 b).
- Nas alvenarias de duas folhas (tipo 3): neste tipo de alvenaria largamente heterogénea, existe a possibilidade de haver uma separação entre as

folhas e o núcleo menos resistente, o que pode levar ao colapso das paredes e por consequência da construção (Figura 9 a);

- Nas alvenarias de pedra de boa qualidade (tipo 4): como esta alvenaria é bastante regular a sua resistência é boa e não haverá danos desde que o atrito entre os blocos não seja excedido. Para além do valor da resistência limite de atrito pode ocorrer o deslocamento relativo entre pedras ou mesmo o colapso (Figura 9 b);
- Nas alvenarias de blocos de cimento, com pilares e vigas cintas de betão armado: as fendas normalmente seguem as juntas da argamassa e geralmente tem um comportamento estrutural satisfatório (Figura 10).

A existência da componente vertical do sismo, que induz uma excitação ao nível das fundações das paredes transferida ao longo da sua altura, dá origem a um agravamento dos danos, levando a que as paredes de alvenaria do tipo 1, 2 e 3 tenham grandes problemas de comportamento estrutural. A componente vertical do sismo também agrava o comportamento estrutural das alvenarias tipo 4, já que ao aliviar o peso da parede e por consequência a compressão, diminui a resistência ao deslizamento dos blocos.

Nos edifícios remodelados, que têm estruturas mistas de paredes de alvenaria de pedra e pilares de betão armado, são as paredes que absorvem a maior percentagem das forças horizontais, pois os pilares não contribuem significativamente para a resistência ao sismo devido à sua baixa rigidez horizontal. Portanto as construções que foram reforçadas com estruturas porticadas de betão armado independentes da estrutura de alvenaria de pedra, que em algumas situações ficaram pelo exterior da construção e noutros casos pelo interior, são soluções mistas com um comportamento que se pode vir a verificar danoso num próximo sismo (Figura 11). Situação diferente é a que existe nas construções remodeladas em que



Figura 5 – Construções em alvenaria de pedra de boa qualidade (tipo 4).



Figura 6 – Construções em alvenaria de blocos de cimento.



Figura 7 – Padieiras (vergas) em madeira.



Figura 8 – Danos em estruturas de alvenaria de pedra a) do tipo 1 b) do tipo 2.



Figura 9 – Danos em estruturas de alvenaria de pedra a) do tipo 3 b) do tipo 4.



Figura 10 – Fendas em paredes constituídas por alvenaria de blocos de cimento.

as estruturas porticadas foram criadas com alvenaria de blocos de cimento e montantes e cintas em betão armado. Nestes casos a rigidez destas estruturas já depende da espessura das paredes introduzidas, pois será, essencialmente a espessura que condicionará a distribuição de esforços, função da rigidez das novas paredes.

Os primeiros estudos de Leonardo Da Vinci no século XVI, indicavam como fundamental na resistência aos sismos que as vigas dos pavimentos ultrapassassem a espessura da parede e ficassem ancoradas na face exterior. Subjacente a esta ideia estava a noção clara de que as vigas dos pisos devem estar bem ancoradas caso contrário podem deslocar-se dos seus apoios causando o derrube do piso. Por outro lado devem contribuir para a estabilidade da parede assegurando uma boa ligação do piso à parede, para que esta possa encontrar aí um ponto de apoio.

De notar ainda que as aberturas das janelas e portas existentes nas fachadas dos edifícios alteram muito o comportamento estrutural da fachada. A existência destas aberturas faz com que a parede funcione por painéis (porção de parede entre pisos e entre aberturas) que são os elementos estruturais resistentes às acções horizontais. Assim, a acção sísmica, exercendo-se paralela e/ou perpendicularmente ao plano da parede, é responsável por diferentes tipos de danos ou estragos conforme a direcção de actuação. No caso de actuar paralelamente à parede poder-se-ão verificar fendas diagonais conforme se observa na Figura 12 a. Quando a acção sísmica actua perpendicularmente ao plano das paredes produz-se nestas paredes um efeito de arco dando origem a que estas se comportem, muitas vezes, como uma escora transversal. Caso as ligações das paredes com as paredes vizinhas ou mesmo com as lajes sejam insuficientes podem ocorrer situações gravosas e irreversíveis para a segurança da estrutura (Figura 12 b). Este fenómeno pode ser evitado com a aplicação de tirantes ligando paredes opostas, ou com a correcta ligação do piso às paredes, ou ainda com

a rigidificação do piso. Nesta situação também é frequente que as padieiras (ou vergas) das portas e janelas e guarnições destes vãos se desloquem para fora do seu plano.

Neste contexto realça-se que os cantos das paredes são particularmente sensíveis à acção do sismo nas duas direcções e que, empenas compridas sem travamento tendem a deformar-se na direcção normal à parede aparecendo problemas de instabilidade que podem conduzir ao colapso (ver Figura 12 b).

O tipo de cobertura típica da construção açoriana não é favorável a um bom comportamento das construções. Tal como se observa na Figura 13 a), o tecto é constituído por varas que se unem no ponto central do telhado e apoiam no frechal (barrote de madeira visível na Figura 13 b) que por sua vez apoia no tirante e muitas vezes apoia ao longo da parede. Mais ou menos regularmente espaçados existem uns tirantes, visíveis igualmente na Figura 13 a, que apoiam nas paredes exteriores e dão apoio ao frechal. Neste tipo de cobertura, quando o tirante deixa de funcionar ou quando as ligações entre varas, frechal e tirante não são efectivas, geram-se forças horizontais que empurram a parede para fora do plano na sua parte superior; torna-se por isso indispensável a absorção destas forças com elementos de reforço. Além disso, este tipo de cobertura não confere uma boa ligação entre esta e a parede num dos pontos mais importantes desta parede, criando-se uma zona extremamente vulnerável para a parede (veja-se na Figura 13 b onde a viga de madeira que realiza o tirante está simplesmente apoiada na parede).

Este problema dos apoios da parede é ainda mais grave para as paredes de empena já que estas, nos casos normais, não têm elementos que se apoiem nelas, dificultando assim a criação de travamentos. Tratando-se de elementos que se encontram soltos, na maioria dos casos acabam por ter grandes danos.

Quando existem arcos e abóbadas que materializam a estrutura principal da construção, o movimento dos apoios é quase sempre o factor que gera os



Figura 11 – Construção remodelada com estrutura de alvenaria de pedra e estrutura poticada de betão armado pelo interior.



Figura 12 – Danos em estruturas de alvenaria de pedra provocados por acções sísmicas paralelas ao plano da parede a) e perpendiculares ao plano da parede b).



Figura 13 – Cobertura típica açoriana.

maiores danos ou é a causa de colapso, movimento este que pode ser amplificado devido à componente vertical da acção sísmica. Esta componente, tem ainda outro efeito de redução da carga nos apoios, já que compensa parcialmente o peso próprio e contribui assim para o escorregamento das pedras nas juntas.

De acordo com o exposto fica claro que a análise dos danos verificados após a ocorrência de um sismo permite extrair ensinamentos sobre os procedimentos a adoptar no futuro, para que esses tipos de danos possam ser minorados ou até evitados. Dado que o sismo de 9 de Julho de 1998 nos Açores (Ilhas do Faial, Pico e S. Jorge) afectou muitas construções de alvenaria de pedra (Figuras 14 e 15), da observação dos danos pode sintetizar-se os seguintes problemas neste tipo de construções (Neves *et al.*, 2008):

- Falta de rigidez, resistência e homogeneidade das paredes devido ao processo construtivo existente que traz problemas acrescidos resultantes do tipo de sismo característico dos Açores (sismo próximo, com grande componente vertical e alta frequência);
- Falta de travamento das paredes;
- Falta de apoios ao longo da altura;
- Falta de rigidez dos pisos de madeira; Inadequada solução construtiva das coberturas, que não travam as paredes e dão origem à presença de forças horizontais na zona mais crítica da parede;
- Existência de descontinuidades verticais e horizontais, que dão origem a forças sísmicas maiores nas zonas de ligação.

3. Técnicas de reforço

3.1. Generalidades

As acções sísmicas são frequentemente as acções mais gravosas que actuam numa construção. Não só devido à grandeza das forças envolvidas mas espe-

cialmente porque, muitas vezes, as estruturas não são projectadas para ter em conta a presença das forças horizontais (Croci, 1998).

A decisão e a escolha de medidas preventivas ou de reforço devem ser o resultado de uma conjugação entre a investigação e a experiência dos projectistas que trabalham na Engenharia Sísmica. Em primeiro lugar, deve-se avaliar a segurança presente e depois os níveis esperados ou que podem ser alcançados como resultado da intervenção; a análise matemática, especialmente com respeito ao comportamento sísmico de construções antigas é (com frequência) apenas parcialmente fidedigna; a análise teórica deverá ser sempre complementada com a observação do comportamento da estrutura no local e ao longo do tempo, devendo ser realizada por pessoal qualificado e com muita experiência prática (Croci, 1998). Por outro lado, deve-se ter sempre presente que, muitas vezes, as intervenções em construções são um compromisso entre a execução de um pequeno trabalho de conservação, tentando não interferir com o conceito original da construção, e a necessidade de uma intervenção de reforço para assegurar as exigências de segurança. No caso dos Açores a intervenção deverá sempre englobar o reforço das construções, porque só assim será possível dotar as construções de uma adequada resistência aos sismos e, para além de preservar a memória do parque edificado para as gerações futuras, garantir a salvaguarda de pessoas e bens. Por isso o trabalho deve ser determinado e levado a cabo a partir de um bom conhecimento das construções existentes, dos materiais constituintes e das técnicas específicas e tecnologias que eram originalmente usadas, procurando-se assegurar a segurança estrutural das construções intervencionadas.

Estas medidas, que têm que assegurar continuidade adequada e conexões entre todos os elementos estruturais principais da construção, podem seguir duas vias alternativas, nomeadamente: *i)* melhorar o comportamento estrutural ou *ii)* reduzir os efeitos



Figura 14 – Danos em estruturas de alvenaria na Ilha do Faial, Açores.



Figura 15 – Danos em construções de alvenaria na Ilha do Faial, Açores.

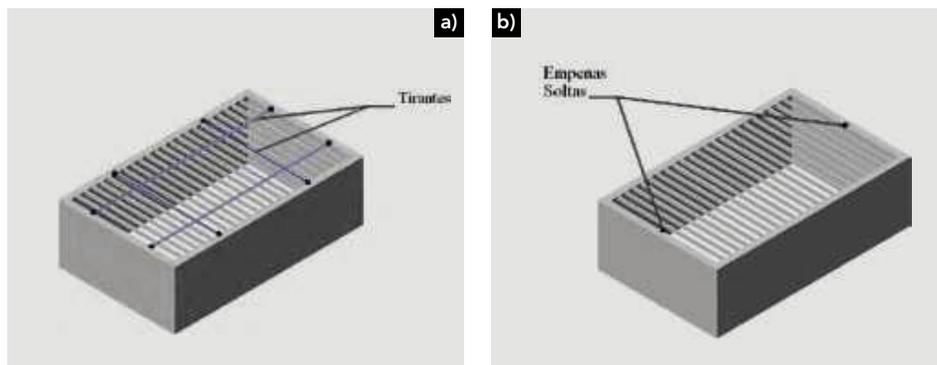


Figura 16 – Utilização de tirantes para ligar paredes.



Figura 17 – Utilização de tirantes para ligar paredes, implementada na Ilha do Faial, na sequência do sismo de 1927.



Figura 18 – Cantoneira usada em toda a envolvente da construção para assegurar a ligação entre todas as paredes e entre as paredes e as vigas dos pisos (barrotes).

sísmicos. Esta última via pode passar pela introdução de sistemas de isolamento sísmico ou de sistemas adicionais de dissipação de energia, enquanto que a primeira via se centra mais na melhoria das características dos materiais, elementos estruturais e suas ligações para acomodarem as exigências sísmicas com suficiente ductilidade. Embora, teoricamente, as duas vias possam resultar em melhorias de segurança equivalentes, do ponto de vista prático, frequentemente a opção de “melhorar o comportamento estrutural” não só é mais fidedigna como também é mais fácil de implementar.

Refira-se ainda que as técnicas de reforço em construções podem ser essencialmente de dois tipos, nomeadamente as preventivas ou as interventivas. As primeiras referem-se às técnicas a usar para prevenir, evitar ou atenuar os danos e o colapso e as segundas correspondem às técnicas de intervenção a realizar após a ocorrência dos danos. Qualquer uma destas técnicas passa essencialmente por duas metodologias de intervenção: actuação ao nível global da construção e/ou intervenção ao nível dos elementos estruturais.

3.2. Técnicas de intervenção ao nível global da construção

Em construções em que a resistência global está em causa a estratégia de reforço a adoptar deverá consistir em eliminar os danos detectados, passando por uma interpretação prévia dos mesmos, de modo a ser possível identificar de uma forma clara as causas que os originaram. Naturalmente, a principal origem dos danos nas construções dos Açores, é devida aos sismos, mas os danos surgem devido a uma série de causas, que interessa interpretar, para que o reforço se torne efectivo e para que aquando da ocorrência de um novo sismo, a construção não sofra danos.

Muitas das construções existentes nos Açores apresentam deficiências na resistência aos sismos devendo ser uma obrigação de todos os intervenien-

tes no processo da construção que nas operações de manutenção ou de conservação sejam realizadas obras de reforço que as dotem das necessárias condições de segurança.

Nas construções açorianas o reforço global deverá consistir nos seguintes aspectos básicos:

- assegurar a continuidade dos diversos elementos estruturais (nestes casos paredes, pisos e coberturas);
- garantir as conexões (ligações) entre esses elementos.

No âmbito da primeira técnica, a introdução de tirantes ao nível dos pisos (Figura 16) tem vindo a ser utilizada de uma forma regular na Ilha do Faial, havendo ainda exemplos da sua aplicação na sequência do sismo de 1926 (Figura 17). Tais tirantes permitem ligar os panos de parede de alvenaria opostos e são mesmo fundamentais no caso das empenas soltas, i.e., das paredes orientadas na direcção dos vigamentos que dão apoio ao soalho.

Dentro da mesma linha a introdução de apoios das paredes nos pavimentos ou nas coberturas é uma técnica relativamente simples de implementar e que pode ser realizada de diversas maneiras: através de cantoneiras que ligam os pavimentos à parede (Figura 18); através da rigidificação do piso de madeira no seu plano, recorrendo a peças diagonais de madeira ligadas por chapas metálicas (Figura 19); colocando peças metálicas a ligar as vigas de madeira às paredes (Figura 20).

Na sequência do sismo de 1998 nos Açores foram também adoptadas outras formas de ligar os elementos estruturais tais como a introdução de treliças metálicas ao nível do pavimento (Figura 21).

Frequentemente a colocação desses tirantes poderá envolver problemas estéticos e arquitectónicos, que terão de ser equacionados e resolvidos no projecto ou na altura da execução. Uma solução possível, principalmente para monumentos (igrejas em particular) será a utilização de uma estrutura de

cobertura, em que o tirante é realizado pela própria asna de cobertura (Figura 22) concebido de forma adequada para o efeito (Costa *et al.*, 2008).

A segunda técnica de reforço global, visando garantir as conexões (ligações) entre os diversos elementos estruturais, pode passar por ligar paredes opostas conferindo-lhes apoios ao longo da sua altura (Figura 23) de forma a obrigá-las a funcionar em conjunto.

Esta técnica que foi usada em algumas obras de reforço de igrejas no Faial e no Pico, tem como objectivo coser as paredes umas às outras, ligando-as nos pontos mais críticos. Na mesma linha apresenta-se na Figura 24 uma ilustração esquemática de um procedimento semelhante mas em que a ligação se faz através de cantoneiras (Figuras 25 e 26) que são introduzidas nas intersecções entre as paredes e de conectores metálicos (varões roscados) que atravessam as paredes (eventualmente) reforçadas com reboco armado.

Em conclusão, pode-se referir que, normalmente, as técnicas de reforço global a usar consistem em: assegurar as ligações entre paredes opostas, obrigando-as a trabalhar em conjunto e conferindo-lhes apoios ao longo da sua altura; garantir o funcionamento correcto de todas as conexões estruturais e melhorar a capacidade de resistência à tracção dos diversos elementos estruturais nas zonas críticas.

3.3. Técnicas de intervenção ao nível do elemento estrutural

Muitas das construções existentes apresentam rigidez e resistência adequadas aos sismos, mas alguns elementos estruturais poderão não apresentar as necessárias características de rigidez, resistência ou ductilidade. Estes elementos podem ser reabilitados usando diferentes técnicas, que deverão ser fáceis de implementar e económicas, devendo ser cuidadosamente escolhidas em função do objectivo a atingir. No caso de reforço sísmico esse objectivo poderá

Figura 19
Apoios das paredes ao longo da sua altura [21].



Figura 20
Ligação das vigas de madeira às paredes de alvenaria.





Figura 21 – Estrutura metálica para assegurar a ligação entre todas as paredes da construção.

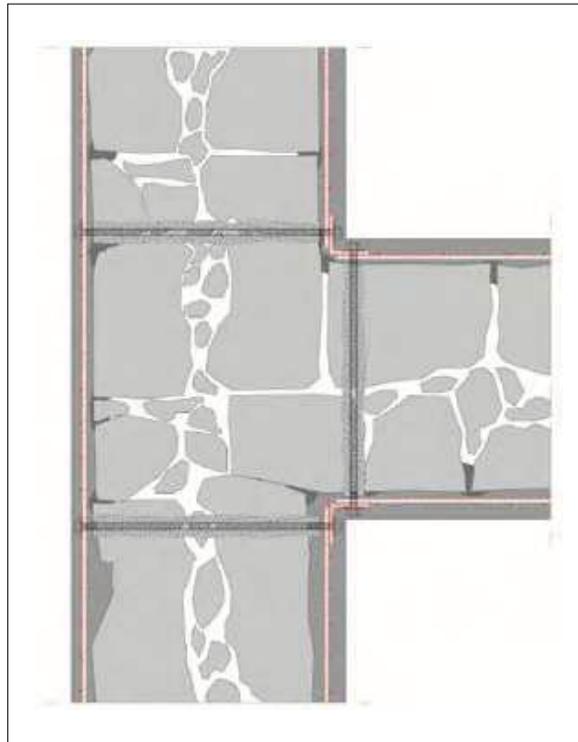


Figura 22 – Tirante realizado através da asna de cobertura.

Figura 23
Utilização de tirantes para ligar paredes.



Figura 24
Ligações entre elementos estruturais.



passar por aumentar a rigidez e/ou resistência ou

melhorar o seu comportamento estrutural de modo a proporcionar-lhe melhores capacidades dissipativas envolvendo o aumento da ductilidade.

3.3.1. Materiais

A reparação e/ou reforço de estruturas requer em geral a utilização de alguns materiais especiais e diferentes dos adoptados na realização de construções novas ou a associação destes com alguns mais convencionais. Os materiais mais usados são os seguintes:

- Resinas
- Argamassas
- Armaduras de Reforço
- Betão projectado
- Aços de pré – esforço
- Fibras de carbono ou de vidro

Um dos materiais mais utilizado é a resina epoxídica, que é aplicada em injeções de fendas para melhorar a ligação de betões ou argamassas com idades diferentes, ou como base para a realização de argamassas especiais.

Em reparação de estruturas geralmente adoptam-se argamassas frequentemente comercializadas na



Figura 25
Ligações entre elementos estruturais.



Figura 26
Esquemas de ligação entre paredes.

forma de argamassas prontas, micro - betões com baixa retracção ou até mesmo expansivos (com o objectivo de garantir a sua permanente ligação aos materiais a reparar) e de alta resistência.

A inclusão de armaduras de reforço sob a forma de perfis metálicos standard (L, U, I, etc) lâminas de aço, malhas de aço electrosoldadas, estribos, cintas e varões longitudinais é muito comum no reforço de

estruturas, nomeadamente quando estas apresentam deficiências de áreas de armadura em elementos estruturais.

Quando as zonas a reparar são extensas a utilização do betão projectado poderá ter grande interesse, sempre que seja possível a sua aplicação. O betão projectado é um processo de lançamento contínuo de betão sob pressão. Este sistema é muito adequado

para o restauro e reparação de grandes superfícies, nomeadamente estruturas danificadas por agentes agressivos químicos ou pelo fogo.

A sua utilização baseia-se em três factores principais: *i*) a excelente aderência entre este betão de inertes finos, o aço e o betão existente (quando devidamente aplicado em superfícies preparadas) assegura a completa interacção entre as duas partes do elemento reparado; *ii*) a melhoria das características de resistência devido a grande compactação e a reduzida relação água/cimento; *iii*) o facto de poder ser projectado em qualquer superfície (vertical, inclinada ou em tectos) com o mínimo de cofragens.

No caso das estruturas de alvenaria os materiais a melhorar são: a argamassa que pode ser consolidada ou fortalecida, por exemplo, através de injeções de resinas epoxídicas; a alvenaria que pode ser melhorada de modo a evitar-se a separação das pedras e de paredes de revestimento em alvenaria dupla, podendo para o efeito ser usadas injeções e em alguns casos também barras adicionais de reforço para assegurar conexões adequadas entre as paredes. É sempre importante verificar se as estruturas interiores de madeira se encontram em boas condições e se as suas ligações à alvenaria são efectivas.

3.3.2. Técnicas

Tal como referido, no caso das estruturas de alvenaria as técnicas estão associadas ao melhoramento do comportamento da argamassa e das paredes de alvenaria. Uma técnica que tem sido bastante usada nos Açores na sequência do sismo de 1998 consiste na aplicação de redes de aço (preferencialmente inox) em ambas as faces da parede, sendo estas ligadas por conectores metálicos, para realizar os chamados "travadores" das paredes de alvenaria, conforme se indica esquematicamente na Figura 27. Esta técnica de reforço foi testada *in situ*, na freguesia de Cedros, Faial, Açores (Costa, 2002) e testada em laboratório, com ensaios experimentais realizados em paredes originárias também do Faial, Açores, (Costa, *et al.*, 2005b), (Figuras 28 e 29).

De acordo com ensaios realizados foi possível obter um acréscimo superior a 50% na capacidade resistente das paredes reforçadas com esta técnica de reboco armado (Costa *et al.*, 2005b).

Naturalmente, a utilização destas malhas de aço nas alvenarias de pedra que realizam os arcos, as ombreiras e as prumadas verticais e horizontais, deverá ser restringida e usada de forma cuidada de modo a permitir que a pedra continue à vista. Nestes casos torna-se necessário usar elementos metálicos que "cozam" esses cantos ou que cruzem as paredes em sentido oblíquo para permitirem a ligação das malhas.

Uma outra técnica consiste na injeção do interior da parede, de modo a haver um preenchimento dos vazios internos da parede e uma homogeneização do material (Figura 30).

3.4. Reforço das fundações

Durante a ocorrência de um sismo, as fundações devem ser capazes de evitar assentamentos diferenciais verticais devidos aos movimentos do terreno e também qualquer movimento horizontal relativo devido às acelerações, dado que todos estes movimentos geram tensões adicionais que são prejudiciais ao desempenho estrutural.

O comportamento das fundações pode ser melhorado usando técnicas como: consolidação do solo de

Figura 27
Reforço da paredes de alvenaria com malhas de aço inox.

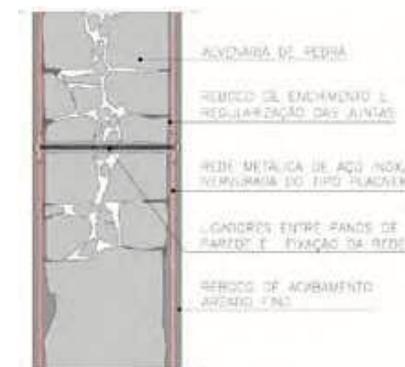




Figura 28
Reforço da paredes de alvenaria com malhas de aço inox.



Figura 29
Reforço de paredes de alvenaria com malha de aço inox.

fundação, aumento da largura das fundações (Figura 31) e aumento da capacidade resistente através da utilização de elementos auxiliares de suporte como micro-estacas ou estacas.

Em todas as situações de reabilitação e reforço é indispensável uma inspeção ao estado real das fundações e em função do observado prescrever uma solução adequada.

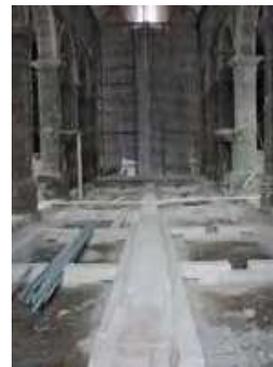
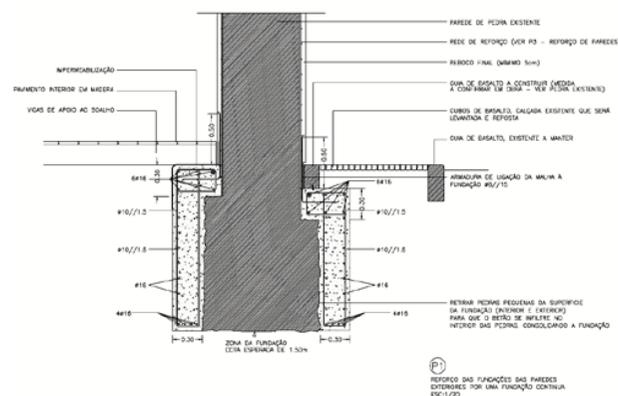
4. Considerações finais

Intervir em construções tradicionais na sequência de eventos sísmicos deve envolver uma atitude de compromisso entre o reforço para assegurar as exi-



Figura 30
Injecções em paredes de alvenaria de pedra.

Figura 31
Reforço de fundações.



gências de segurança aos sismos e a preservação da memória do edificado existente que importa transmitir às gerações futuras. Para tal torna-se necessário um bom conhecimento dos materiais existentes e das técnicas tradicionais de construção, já que é fundamental para uma adequada percepção do funcionamento das estruturas de alvenaria de pedra quando solicitadas pela acção sísmica como é o caso de grande parte das construções das ilhas Açorianas.

Com base nestas premissas, procurou-se neste trabalho evidenciar que a intervenção em estruturas tradicionais de alvenaria de pedra nos Açores pode, e deve, garantir uma adequada continuidade e ligação entre os diversos elementos estruturais, envolvendo actuação tanto ao nível global da construção como ao nível dos seus elementos constituintes.

A apresentação de técnicas de reforço efectivamente aplicadas no processo de reconstrução do pós-sismo de 1998 nas ilhas do Pico, Faial e S. Jorge, algumas delas sujeitas a experimentação e/ou análises numéricas, pensa-se poder contribuir para transmitir a mensagem de que, com devidos cuidados e intervenções fundamentadas, é possível compatibilizar o parque construído tradicional das ilhas Açorianas com a realidade inexorável da recorrência sísmica que as afecta.

O sucesso desta pretensão entra no entanto em conflito com diversas questões sócio-culturais, das quais o receio das populações face ao desempenho das construções de pedra durante a ocorrência de sismos assume por certo maior relevo. Resulta daqui que, só será possível preservar a paisagem arquitétonica tradicional, no respeito pela sua autenticidade e das demais características físicas validadas ao longo de décadas e séculos (tais como aspectos de comportamento higrotérmico), se for encetado um esforço das entidades competentes em procurar salvaguardar as construções tradicionais existentes em vez de as substituir liminarmente por novos tipos de construção, porventura menos adaptados a outras realidades físicas das ilhas, que a curto prazo poderão evidenciar outros tipos de problemas que as novas existências construtivas já vão deixando observar na ilha do Faial.

Agradecimentos

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) que apoiou a realização deste estudo através do Programa Plurianual.

Alexandre Aníbal Meira Guimarães da Costa agradece o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (Bolsa SFRH/BD/38138/2007).