



João Almeida Lares

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Reutilização de elementos provenientes da demolição de edifícios antigos na reabilitação de construções

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Fernando Farinha da Silva Pinho, Prof. Doutor, Faculdade
de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Carlos Chastre Rodrigues
Arguente: Prof.^a Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues
Vogal: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

“Copyright” João Almeida Laires, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Para a realização deste Mestrado contei com o precioso apoio de algumas pessoas a quem gostaria de expressar o meu sincero agradecimento, a algumas das quais de forma especial:

Ao meu orientador, Professor Fernando Pinho, por toda a sua disponibilidade, orientação e apoio ao longo do trabalho, bem como por todos os ensinamentos prestados e pela amizade demonstrada.

Ao Engenheiro Duarte Abecasis (*OZ Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda.*), aos Engenheiros Luís Mateus e Joel Claro (*Monumenta, Conservação e Restauro do Património Arquitectónico, Lda.*) e ao Engenheiro Pedro Ribeiro (*A2P Consult, Estudos e Projectos, Lda.*) agradeço a disponibilidade, o apoio, os elementos fornecidos e os conhecimentos transmitidos que possibilitaram a realização deste trabalho.

Agradeço ao Sr. Mário Moreira (*Terrassena, Recuperação e Restauro de Casas Antigas, Lda.*), ao Sr. João Oliveira (*Velharias de Janas*) e ao Arquitecto João Sobral (*João Brandão . Margarida Gomes, Arquitectos, Lda.*) pelos elementos e informações fornecidos, bem como pelo esclarecimento de dúvidas, disponibilidade e apoio numa fase inicial e importante do trabalho.

Ao Sr. Mário Barbosa (*Tecniwood-Soluções*), ao Sr. Pedro Mendonça e Sr. Mário Ferreira (*Grupo Carmo*), ao Sr. Claudio André Freire e Sr.^a Ana Paula Coutinho (*JULAR, Madeiras, S.A.*), à Sr.^a Manuela Antunes (*Demolições e Construções de José da Silva Antunes, Lda.*), ao Sr. António Silva (*António dos Santos Silva, Lda.*), ao Sr. João Sousa (*Urmal, Joaquim Duarte Urmal & Filhos, Lda.*), Sr. Rui Paulo (*Mármore Vitório, Lda.*), ao Sr. António Batalha (*Durapedra, Rochas Ornamentais e Construção, Lda.*) e ao Sr. António Gomes (*António Luís Reis Gomes Antiguidades, Lda.*) agradeço todo o apoio e os elementos fornecidos que tornaram este trabalho possível.

Agradeço ao Sr. Dr. Marco Loja e ao Sr. Presidente da Câmara Municipal de Santarém, Sr. Dr. Francisco Moita Flores, à Sr.^a Conservadora Gabriela Cordeiro e ao Sr. Director do Palácio Nacional de Mafra, Sr. Dr. Mário Pereira dos Santos, ao Sr. Dr. José Miguel e à Sr.^a Directora do Museu de Arte Popular, Sr.^a Dr.^a Andreia Galvão e à Sr.^a Dr.^a Maria do Céu Alves pelo auxílio nas visitas às obras de reabilitação referidas neste trabalho, pelos conhecimentos transmitidos e pelos elementos fornecidos.

Ao meu amigo de curso, Gonçalo Faria por todo apoio e informação disponibilizada.

A todos os meus amigos, pela amizade, incentivo e força que me deram ao longo deste percurso.

Às pessoas mais importantes da minha vida, ao meu irmão Pedro e aos meus pais por tudo, pelo amor, paciência e dedicação incondicionais. A eles devo-lhes tudo.

RESUMO

Na presente dissertação faz-se a descrição das soluções construtivas de fundações, paredes, pavimentos e coberturas de edifícios antigos de alvenaria de pedra e também das principais anomalias que ocorrem nestes elementos construtivos.

Adicionalmente, faz-se um levantamento das principais técnicas de reabilitação estrutural ao nível das paredes, pavimentos e coberturas dos edifícios antigos de alvenaria de pedra, bem como a identificação e avaliação das técnicas de reabilitação que poderão incorporar os resíduos de demolição provenientes do edifício a reabilitar, preferencialmente, ou de outros edifícios antigos com a mesma tipologia construtiva. A avaliação é feita tendo em vista aspectos de natureza económica e ambiental.

O tema tratado no presente trabalho surge no âmbito da temática da construção e reabilitação sustentável de edifícios. O segmento da reabilitação no sector da construção tem vindo a ter cada vez mais importância em Portugal. No entanto, esta área ainda carece de desenvolvimento comparativamente com outros países da União Europeia. Em virtude da evolução das preocupações ambientais da população, do rápido crescimento da demolição de edifícios e consequentemente do aumento dos resíduos de demolição, é necessário procurar soluções que promovam a reabilitação de edifícios antigos de forma sustentável.

As matérias-primas para a produção dos materiais de construção não são hoje um recurso em abundância como sucedia no passado. Face a este problema é cada vez mais urgente desenvolverem-se meios para otimizar os recursos e reduzir a necessidade de matérias-primas. Assim, a recuperação dos materiais provenientes da demolição em edifícios a reabilitar e a sua posterior reutilização afigura-se como uma importante solução no contexto da reabilitação sustentável de edifícios antigos.

Palavras-chave: edifícios antigos; técnicas de reabilitação; resíduos de demolição; reutilização.

ABSTRACT

This dissertation presents the description of the constructive solutions of foundations, walls, floors and roofs of ancient stone masonry buildings and also the principal anomalies that occur in these building elements.

A comprehensive revision was also performed concerning the principal structural rehabilitation techniques at the level of the walls, floors and roofs of ancient stone masonry buildings. Additionally, it identifies and evaluates rehabilitation techniques which might incorporate demolition waste, originated preferably from the building to be rehabilitated, or from other ancient buildings with the same constructive typology. The evaluation was achieved taking into account aspects of economical and environmental nature.

The topic addressed in this work comes under the theme of sustainable construction and rehabilitation of buildings. In Portugal, the importance of rehabilitation in the construction sector has significantly increased in recent years. However, this area still needs further development compared with other European Union countries. Due to the evolution of environmental awareness among citizens, the rapid growth of building demolition, and consequently the increase of demolition waste, it is necessary to find effective solutions that promote the rehabilitation of ancient buildings in a sustainable manner.

The availability of resources used for the production of construction materials has decreased in comparison with the abundance verified in the past. Facing this growing issue it is urgent to develop ways to optimize resources and reduce the overall demand of raw materials for construction. Therefore, the reutilization of demolition waste in the rehabilitation of ancient buildings may have an important role in the context of sustainable rehabilitation.

Key-words: ancient buildings, rehabilitation techniques, demolition waste, reutilization.

ÍNDICE DO TEXTO

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

1.1	Motivação e enquadramento do tema	1
1.2	Objectivos	2
1.3	Organização do trabalho	3

Capítulo 2 - FUNDAÇÕES E PAREDES DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

2.1	Introdução	5
2.2	Soluções construtivas de paredes e fundações de edifícios antigos.....	5
2.2.1	Fundações.....	5
2.2.2	Paredes resistentes	6
2.2.3	Paredes divisórias ou de compartimentação.....	8
2.2.4	Caixilharias.....	9
2.3	Anomalias em paredes e fundações de edifícios antigos	9
2.3.1	Anomalias em fundações	9
2.3.2	Anomalias em paredes resistentes	10
2.3.3	Anomalias em paredes divisórias ou de compartimentação	14
2.3.4	Anomalias em caixilharias	15
2.4	Técnicas de reabilitação estrutural de fundações e paredes de edifícios antigos de alvenaria de pedra	15
2.4.1	Considerações gerais.....	15
2.4.2	Técnicas de reabilitação	17
2.4.3	Associação de técnicas de reabilitação.....	19

Capítulo 3 - PAVIMENTOS E COBERTURAS DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

3.1	Introdução	21
3.2	Soluções construtivas de pavimentos e coberturas de edifícios antigos	21
3.2.1	Pavimentos	21
3.2.2	Coberturas	25

3.2.3	Escadas.....	28
3.3	Anomalias em pavimentos e coberturas de edifícios antigos.....	29
3.3.1	Anomalias em pavimentos	29
3.3.2	Anomalias em coberturas.....	34
3.3.3	Anomalias em escadas	37
3.4	Técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos e coberturas de edifícios antigos de alvenaria de pedra.....	37
3.4.1	Considerações gerais.....	37
3.4.2	Técnicas de reabilitação	38
 Capítulo 4 - UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO NA REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS ANTIGOS		
4.1	Introdução	57
4.2	Resíduos de demolição com possibilidade de utilização na reabilitação estrutural de edifícios antigos de alvenaria de pedra	57
4.3	Reabilitação estrutural de fundações e paredes.....	58
4.3.1	Técnicas de reabilitação com reutilização de materiais antigos	58
4.3.2	Estimativa de custos.....	59
4.3.3	Avaliação económica, ambiental e patrimonial da reutilização de resíduos de demolição	65
4.4	Reabilitação estrutural de pavimentos e coberturas.....	68
4.4.1	Técnicas de reabilitação com reutilização de materiais antigos	68
4.4.2	Estimativa de custos.....	69
4.4.3	Avaliação económica, ambiental e patrimonial da reutilização de resíduos de demolição	80
4.5	Exemplos de Obras de Reabilitação	82
4.5.1	Considerações gerais.....	82
4.5.2	Obras com incorporação de resíduos de demolição na reabilitação.....	83
4.5.3	Obras sem aproveitamento de resíduos de demolição	86

Capítulo 5 - CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1	Síntese final.....	89
5.2	Conclusões e comentários finais	90
5.3	Desenvolvimentos futuros	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		93
ANEXOS.....		101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática de fundações de edifícios antigos.....	6
Figura 2.2 – Paredes resistentes de alvenaria de pedra	7
Figura 2.3 – Elementos de cantaria no contorno duma abertura de janela.....	8
Figura 2.4 – Fendilhação de parede por assentamento de fundação – caso em Loulé (Centro Ambiental da Pena).....	10
Figura 2.5 – Desagregação de alvenaria “fraca”.....	11
Figura 2.6 – Esmagamento localizado de parede na zona de apoio duma asna de madeira.....	12
Figura 2.7 – Fendilhação de paredes.....	13
Figura 2.8 – Representação esquemática das fendilhações mais usuais em paredes divisórias e respectivas causas.....	15
Figura 2.9 – Substituição e reconstrução de elementos em paredes de alvenaria de pedra.....	18
Figura 3.1 – Pavimento de madeira	23
Figura 3.2 – Representação esquemática de ligações com ferrolhos metálicos	24
Figura 3.3 – Tarugamento em pavimento de madeira.....	24
Figura 3.4 – Representação esquemática de estrutura em asna simples	25
Figura 3.5 – Estrutura e ligações em coberturas de madeira	27
Figura 3.6 – Pormenor de apoio de asna em cachorro de pedra	28
Figura 3.7 – Caixa de escadas inserida no sistema anti-sísmico da gaiola pombalina.....	29
Figura 3.8 – O caruncho e a deterioração da madeira.....	31
Figura 3.9 – Pavimento de madeira deteriorado pelo ataque de fungos de podridão junto a parede exterior	32
Figura 3.10 – Elemento de madeira deteriorado por ataque de térmitas.....	32
Figura 3.11 – Abaulamento excessivo da cobertura	35
Figura 3.12 – Linha de asna de madeira deteriorada por ataque de fungos de podridão	35
Figura 3.13 – Rotura de apoio de asna em parede	36
Figura 3.14 – Fenda de secagem na linha duma asna de madeira	36
Figura 3.15 – Reforço (localizado) por fixação de novas peças de madeira às antigas	39
Figura 3.16 – Representação esquemática do reforço (no comprimento da viga) por aumento de secção com novas peças de madeira (em corte transversal)	40
Figura 3.17 – Representação esquemática dum exemplo de introdução de novos elementos a substituir elementos degradados (em planta).....	41

Figura 3.18 – Representação esquemática de empalmes em elementos de madeira com diferentes tipos de ligadores	42
Figura 3.19 – Aplicação de empalmes em estruturas de madeira utilizando ligadores metálicos e ligadores em madeira	42
Figura 3.20 – Representação esquemática de empalmes colados em elementos de madeira	43
Figura 3.21 – Representação esquemática do reforço numa linha de asna com parafusos de porcas e cintas metálicas em aço inox	43
Figura 3.22 – Representação esquemática do reforço metálico embebido na madeira.....	44
Figura 3.23 – Colocação de vigas paralelas às existentes	44
Figura 3.24 – Colocação de viga transversal ao vigamento do pavimento	45
Figura 3.25 – Reforço por colocação de dois níveis de perfis metálicos sob as vigas.....	46
Figura 3.26 – Substituição de vigas num pavimento de madeira	47
Figura 3.27 – Representação esquemática da execução de corte da zona degradada e realização de prótese com “argamassa epoxídica”.....	49
Figura 3.28 – Execução de corte da zona degradada e realização de prótese de madeira.....	49
Figura 3.29 – Representação esquemática do reforço com barras horizontais.....	50
Figura 3.30 – Representação esquemática do reforço com barras inclinadas	50
Figura 3.31 – Representação esquemática do reforço através dum treliça com barras de compósito FRP (corte longitudinal)	51
Figura 3.32 – Representação esquemática dum solução de empalme de peças de madeira com barras de aço e cola epoxídica.....	51
Figura 3.33 – Representação esquemática do reforço (em zona de apoio) com chapas de aço ou materiais compósitos FRP no interior da secção e com cola epoxídica	52
Figura 3.34 – Escoras de madeira a suportar as vigas dum pavimento.....	53
Figura 3.35 – Representação esquemática de frechal de madeira apoiado em cachorro de pedra.....	54
Figura 3.36 – Representação esquemática de cantoneira metálica fixada à parede.....	55
Figura 3.37 – Representação esquemática de frechal de betão armado para apoio de vigamento.....	55
Figura 3.38 – Representação esquemática do reforço através de empalme colado com cintas metálicas e cavilhas de aço inox numa linha de asna	56
Figura 3.39 – Representação esquemática do reforço numa linha de asna através de empalme com parafusos e cavilhas de aço em orifícios inclinados.....	56
Figura 4.1 – Estância de materiais com resíduos de demolição em Camarate (Loures)	60
Figura 4.2 – Elementos de cantaria no contorno de janelas	61
Figura 4.3 – Vigas de madeira antigas numa estância de materiais em Camarate (Loures)	70
Figura 4.4 – Representação esquemática das soluções propostas nos Cenários C e D (corte transversal)	71

Figura 4.5 – Execução de pavimento elevado de madeira em obra de reabilitação (Edifício na Rua Mouzinho da Silveira)	71
Figura 4.6 – Vigas de madeira de <i>Pinus sylvestris</i>	72
Figura 4.7 – Custo das vigas de madeira novas e antigas disponíveis no mercado	75
Figura 4.8 – Representação esquemática dos pavimentos propostos pelos Cenários C e D	77
Figura 4.9 – Obra de reabilitação estrutural na cobertura da Casa de Santa Maria	83
Figura 4.10 – Obra de reabilitação estrutural num edifício na Rua Victor Cordon	84
Figura 4.11 – Intervenção estrutural a fundações da Igreja do Convento de S. Francisco em Santarém.....	85
Figura 4.12 – Intervenção na estrutura de suporte de madeira do carrilhão da Torre Sineira Sul.....	87
Figura 4.13 – Intervenção na estrutura de madeira existente no Museu de Arte Popular	88
Figura I.1 – Representação esquemática da injeção da alvenaria da fundação.....	106
Figura I.2 – Representação esquemática do recalçamento dum fundação em alvenaria.....	107
Figura I.3 – Representação esquemática do confinamento e alargamento dum fundação em alvenaria.....	107
Figura I.4 – Representação esquemática do reforço de fundações com estacas.....	108
Figura I.5 – Injeção de caldas	109
Figura I.6 – Refechamento das juntas.....	110
Figura I.7 – Representação esquemática de pregagem (corte vertical).....	112
Figura I.8 – Representação esquemática de pregagens costura (secção transversal).....	112
Figura I.9 – Representação esquemática do reforço de alvenaria com recurso à técnica do reticulado cimentado (corte vertical).....	113
Figura I.10 – Representação esquemática de conectores (corte vertical).....	114
Figura I.11 – Confinamento transversal de paredes através de conectores	114
Figura I.12 – Confinamento transversal contínuo	115
Figura I.13 – Tirantes de reforço aplicados pelo exterior	116
Figura I.14 – Reboco armado em parede de alvenaria de pedra.....	117
Figura I.15 – Aplicação de encamisamento em paredes de alvenaria de pedra.....	118
Figura I.16 – Representação esquemática do reforço com pré-esforço na Torre do Relógio em Santarém.....	119
Figura I.17 – Reforço de zona de fendas com faixas de material compósito FRP	120
Figura I.18 – Gateamento de fenda com grampo de aço.....	120
Figura II.1 – Representação esquemática do reforço (localizado) por fixação de elementos metálicos à madeira antiga.....	124
Figura II.2 – Procedimento de aplicação de fibras de vidro em vigas de madeira.....	125

Figura II.3 – Representação esquemática da reconstrução da parte superior de vigas com a cola epoxídica (corte transversal).....	125
Figura II.4 – Representação esquemática da aplicação de tirantes pré-esforçados para reforço estrutural	126
Figura II.5 – Representação esquemática de injeção de resinas epoxídicas em fendas.....	127
Figura II.6 – Representação esquemática de injeção de resinas epoxídicas em fendas com varões de material compósito FRP	128
Figura II.7 – Representação esquemática da introdução de parafusos para reparação de fendas	129
Figura II.8 – Representação esquemática da reparação de fendas por cintagem em linha de cobertura....	129
Figura II.9 – Representação esquemática do reforço de perna de asna mediante a colocação de um tirante de aço (inferiormente).....	130
Figura II.10 – Representação esquemática de reforço com tirantes metálicos em asnas de madeira.....	130
Figura II.11 – Representação esquemática da consolidação do encontro entre perna e linha numa asna de madeira com recurso a prótese de “argamassa epoxídica” e varões de aço ou compósitos FRP.....	131
Figura II.12 – Representação esquemática do reforço num encontro entre perna e linha de asna mediante a introdução de placas de aço inox	132
Figura II.13 – Representação esquemática da reparação de um nó de ligação através de injeção de cola epoxídica.....	132

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Classificação dos RCD de acordo com a Portaria nº 209/2004.....	2
Quadro 2.1 – Fases da intervenção num edifício antigo	16
Quadro 2.2 – Técnicas de reabilitação estrutural em fundações com possibilidade de aplicação em conjunto.....	20
Quadro 2.3 – Técnicas de reabilitação estrutural em paredes com possibilidade de aplicação em conjunto.....	20
Quadro 3.1 – Tipos de madeira mais utilizados em pavimentos e coberturas de edifícios antigos Portugueses e as respectivas características principais	22
Quadro 3.2 – Técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos e coberturas de edifícios antigos	38
Quadro 4.1 – Resíduos de demolição com possibilidade de utilização na reabilitação estrutural de edifícios antigos de alvenaria de pedra e respectiva classificação LER	58
Quadro 4.2 – Características Físico-Mecânicas da Rocha de Calcário Lioz.....	62
Quadro 4.3 – Preços de referência e valor médio para pedras de cantaria novas no mercado (calcário lioz com 20x20cm ²).....	63
Quadro 4.4 – Preços de referência e valor médio para pedras de cantaria antigas no mercado (calcário lioz com 20x20cm ²).....	63
Quadro 4.5 – Quadro resumo do custo total para os cenários investigados contabilizando apenas com o custo médio das pedras de cantaria	64
Quadro 4.6 – Valores respectivos à classe de resistência C16	73
Quadro 4.7 – Valores respectivos à classe de resistência C24	73
Quadro 4.8 – Preços de referência para vigas de madeira novas (<i>Pinus sylvestris</i> – Casquinha)	74
Quadro 4.9 – Preços de referência para vigas de madeira antigas (<i>Pinus sylvestris</i> – Casquinha).....	74
Quadro 4.10 – Dimensões e espaçamentos dos pavimentos e vigas para os cenários propostos	76
Quadro 4.11 – Quadro resumo do custo total para os cenários investigados contabilizando apenas com o custo das vigas de madeira.....	79

SIMBOLOGIA

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

UNL – Universidade Nova de Lisboa

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

LER – Lista Europeia de Resíduos

ICOMOS – International Council on Monuments and Sites

FRP – Fiber Reinforced Polymers (polímeros reforçados com fibras)

GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymers (polímeros reforçados com fibras de vidro)

AFRP – Aramid Fiber Reinforced Polymers (polímeros reforçados com fibras de aramida)

CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymers (polímeros reforçados com fibras de carbono)

MOR – Mercado Organizado de Resíduos

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e enquadramento do tema

No panorama actual do sector da construção, em que existe um vasto património edificado, este carece de intervenção nos centros urbanos onde a concentração da população é elevada. Estando também a construção de novos edifícios e os investimentos neste sector em decréscimo por razões de ordem económica e financeira e em que cada vez mais começa a haver uma crescente preocupação pelo meio ambiente, é necessário estabelecer bases para uma construção sustentável que passa por reabilitar as habitações dos grandes centros urbanos e o património histórico que eles contém.

A reabilitação representa, em Portugal e em 2011, apenas 7,4% do mercado da construção, enquanto em Espanha ocupa 24% desse mercado, aproximando-se da média europeia que é de 36%. Num momento em que o sector da construção atravessa uma das maiores crises de que há memória, com quedas na produção que, desde 2002, ultrapassam os 23%, é fundamental estimular o mercado da reabilitação, o qual se estima ascender a 28 mil milhões de euros [76].

Existe uma grande área, nos centros urbanos, ocupada por edifícios de habitação antigos que se encontram num estado de degradação adiantado, tanto do ponto de vista das condições da salubridade, como da segurança dos próprios edifícios, que muitas vezes colocam em risco a vida das pessoas. Este cenário é uma das principais razões que tem contribuído para o despovoamento dos centros das cidades, pelo que urge proceder à requalificação do parque habitacional existente.

Na União Europeia a remodelação, ampliação e reabilitação contribuem com 30 a 40% do total de resíduos de construção e demolição (RCD), enquanto as demolições geram entre 40 a 50% [67]. A reciclagem destes resíduos em Portugal é irrelevante face à geração dos mesmos e por isso é necessário mudar o paradigma do reaproveitamento dos RCD, em particular dos resíduos de demolição.

Na reabilitação dos edifícios antigos muitas vezes é necessário recorrer-se à demolição de parte do edifício a reabilitar. Uma das consequências das demolições indiferenciadas é a geração de uma enorme quantidade de resíduos de demolição que, na maior parte dos casos, irão ser depositados em aterros para resíduos de construção. Uma via alternativa a este destino é a recuperação e reutilização destes resíduos ao reabilitar um edifício antigo, ou seja optar pelo seu desmantelamento cuidadoso de modo a possibilitar a recuperação dos materiais constituintes dos elementos construtivos do edifício e deste modo reutilizar os mesmos, contribuindo assim para a reabilitação sustentável dos edifícios antigos.

Com a publicação do Decreto-Lei nº 239/97 [19], de 9 de Setembro, foram estabelecidas as regras a que fica sujeita a gestão de resíduos no território nacional. Foi também criada a Portaria nº 209/2004 [59] que identifica e classifica os diferentes tipos de resíduos de acordo com a sua fonte geradora, em termos de um código LER – Lista Europeia de Resíduos, definida pela legislação europeia. No âmbito deste trabalho serão mencionados alguns resíduos de demolição, provenientes de demolições e obras de reabilitação, que estão inseridos nos RCD enumerados no capítulo 17 da LER – Resíduos de construção e demolição, incluindo solos escavados de locais contaminados. No quadro 1.1 estão descritos os resíduos anteriormente mencionados.

Quadro 1.1 – Classificação dos RCD de acordo com a Portaria nº 209/2004 [59]

Código LER	Material (RCD)
17 01	Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos.
17 02	Madeira, vidro e plástico.
17 03	Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão.
17 04	Metais (incluindo ligas).
17 05	Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados), rochas e lamas de dragagem.
17 06	Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto.
17 08	Materiais de construção à base de gesso.
17 09	Outros resíduos de construção e demolição.

1.2 Objectivos

O reaproveitamento dos resíduos de demolição não é por vezes tido em conta na reabilitação de edifícios antigos, valorizando-se antes a utilização de novos materiais na intervenção destes edifícios e novas estruturas em substituição das degradadas que podem, por vezes, encarecer o custo da obra de reabilitação, não sendo então a melhor opção técnica em algumas situações.

Assim pretende-se, com a presente dissertação, fazer uma avaliação das técnicas de reabilitação estrutural, de edifícios antigos de alvenaria de pedra, em paredes, pavimentos e cobertura que possam fazer o aproveitamento de resíduos de demolição.

Por último, o trabalho visa a análise do ponto de vista económico e ambiental das soluções apresentadas.

1.3 Organização do trabalho

A presente dissertação divide-se em cinco capítulos, incluindo o presente, de acordo com a descrição que se apresenta de seguida:

No **Capítulo 2** faz-se a caracterização construtiva, a identificação das anomalias e a descrição das principais técnicas de reforço e consolidação das paredes e fundações dos edifícios antigos de alvenaria de pedra.

No **Capítulo 3** faz-se a caracterização construtiva, a identificação das anomalias e a descrição das principais técnicas de reabilitação das coberturas e pavimentos dos edifícios antigos de alvenaria de pedra.

No **Capítulo 4** faz-se um levantamento dum conjunto de propostas e soluções aos desafios e problemas das paredes, pavimentos e cobertura dos edifícios antigos de alvenaria de pedra, que possam incorporar os resíduos de demolição provenientes da reabilitação destes edifícios ou de outros edifícios com a mesma tipologia construtiva.

Finalmente, no **Capítulo 5**, são apresentadas as conclusões finais do trabalho com referência a perspectivas para futuros trabalhos de investigação na matéria.

Todas as figuras não referenciadas bibliograficamente são da responsabilidade do autor.



FUNDAÇÕES E PAREDES DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

2.1 Introdução

Este trabalho enquadra-se na reabilitação de edifícios antigos de alvenaria de pedra, sendo por isso importante caracterizá-los na sua generalidade, identificando os seus aspectos construtivos, as anomalias e técnicas de reabilitação mais relevantes.

No presente capítulo é feita uma descrição das soluções construtivas de fundações e paredes, bem como das anomalias mais recorrentes e soluções de carácter estrutural destes elementos.

2.2 Soluções construtivas de paredes e fundações de edifícios antigos

2.2.1 Fundações

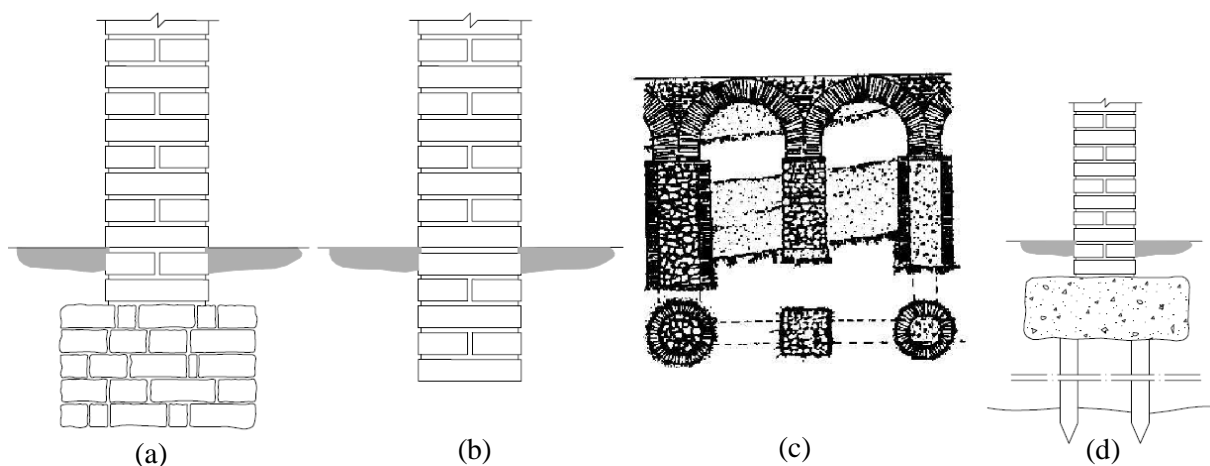
As fundações dos edifícios antigos são os elementos estruturais que fazem a transição dos esforços provenientes das paredes resistentes desses edifícios para o solo. Estas fundações são prolongamentos das paredes resistentes e dos pilares, sendo constituídas por sapatas isoladas no caso de pilares ou contínuas no caso de paredes resistentes [3].

As fundações, enquanto prolongamento das paredes resistentes, podiam apresentar uma sobrelargura relativamente aos elementos estruturais subjacentes, de modo a se criarem menores tensões no solo (de qualidade inferior a estes elementos), através duma maior área de contacto entre a fundação e o solo. Era recorrente serem lançados para valas ou poços enrocamentos de pedra irregular misturados ou não com argamassa; contudo em casos de estruturas pesadas, de maior importância ou com melhor qualidade construtiva, as fundações eram executadas em alvenaria de pedra trabalhada, arrumada à mão, ou de tijolo cerâmico [3, 64], figura 2.1 (a, b).

Em terrenos cuja qualidade do solo à superfície era inferior, era necessário aprofundar as escavações até se atingirem camadas de solo mais resistentes. Uma das possibilidades para a resolução deste problema passava por se projectar e executar caves de modo a que os pavimentos inferiores estivessem a uma cota tal que permitisse uma fácil execução de fundações directas. Uma outra alternativa consistia na abertura de poços quadrangulares com 1m de lado, com profundidade suficiente até se atingirem camadas de solo mais resistentes e com afastamentos de 3m entre eles. Após a abertura dos

poços, estes eram preenchidos com enrocamentos de pedra irregular e sobre os mesmos eram erigidos arcos em alvenaria de pedra ou tijolo cerâmico que serviriam de apoio à construção das paredes resistentes [3, 64], figura 2.1 (c).

As fundações poderiam ser executadas mediante a cravação de estacas de madeira conferindo uma melhoria da consolidação do terreno de fundação, figura 2.1 (d). O recurso às fundações por estacaria de madeira estava dependente da natureza do solo das camadas atravessadas pelas estacas. Era mais recorrente encontrarem-se fundações por estacaria em solos com camadas aluvionares brandas pois as estacas encontravam-se limitadas à sua capacidade de cravação e à sua própria resistência [3].



(a) – fundação directa com sobrelargura [64]; (b) - fundação directa sem sobrelargura [64]; (c) – fundação profunda constituída por arcos [55]; (d) – fundação por estacaria [64]

Figura 2.1 – Representação esquemática de fundações de edifícios antigos

2.2.2 Paredes resistentes

Denominam-se por “paredes resistentes” ou “paredes-mestras” aquelas que desempenham uma função estrutural importante quanto à resistência às cargas verticais e forças horizontais de natureza aleatória, como é o caso do vento e dos sismos, sendo assim elementos com uma função estrutural fundamental no que diz respeito à estabilidade do edifício, figura 2.2.



Figura 2.2 – Paredes resistentes de alvenaria de pedra

São constituídas por materiais heterogêneos que originam elementos rígidos e pesados, conferindo às paredes razoável capacidade de resistência à compressão, sendo no entanto menos resistente ao corte e tendo muito baixa resistência à flexão e à tracção. Estas paredes apresentam espessuras consideráveis (cerca de 0,50 a 1,50m), o que se traduz na mobilização de forças estabilizantes que equilibram as forças horizontais de derrubamento e deslizantes, provenientes por exemplo de impulsos de terras, arcos e abóbadas, vento, sismos, entre outros. A grande espessura das paredes resulta numa maior robustez e conseqüente redução da possibilidade de instabilidade por encurvadura, estando também associada à função de protecção do interior dos edifícios relativamente aos agentes atmosféricos, dos quais se destacam a acção do vento e da água proveniente das chuvas [3, 57].

As paredes resistentes ou paredes-mestras podem ser interiores ou exteriores. As paredes resistentes interiores, também designadas por “frontais”¹, definem as grandes divisões. As paredes resistentes exteriores podem ser de fachada (frente e tardoz) ou laterais, sendo que as laterais são também designadas por empenas, quando se prolongam até à cumeeira do telhado [3, 57].

As paredes dos edifícios antigos podem apresentar diversas soluções de carácter construtivo em que variam fundamentalmente os materiais utilizados na sua composição, quer ao nível das unidades elementares, quer ao nível dos materiais de ligação e das técnicas de aplicação.

Os elementos de cantaria² eram muitas vezes considerados como reforço das paredes resistentes de alvenaria de pedra irregular. Constituíam elementos construtivos de grande importância na construção antiga e eram aplicadas como remate das construções de alvenaria.

¹ No caso dos edifícios da Baixa pombalina, em Lisboa, os “frontais” são constituídos por um esqueleto ou grade de madeira formando as “cruzes de Santo André”, sendo posteriormente envolvidas por alvenaria [57].

² No presente trabalho, quando é mencionado o termo “elementos de cantaria” ou “cantarias”, está-se a fazer referência ao conjunto de pedras trabalhadas e aparelhadas que se localizam pontualmente em zonas particulares das paredes dos edifícios antigos, como é o caso do contorno de janelas e portas. O termo “paredes de cantaria” remete para as paredes constituídas na sua maioria por pedra de cantaria. A pedra de cantaria é a unidade que constitui os elementos de cantaria ou as paredes de cantaria.

Estes elementos por um lado desempenhavam funções estruturais muito importantes já que as pedras de cantaria aparelhadas localizavam-se nas zonas mais relevantes dos edifícios do ponto de vista estrutural, tais como pilastras, contorno de aberturas de portas e janelas, cornijas, etc., figura 2.3. Por outro lado tinham uma importante atribuição decorativa nos edifícios de construção nobre. A vantagem da utilização da pedra de cantaria deve-se ao facto desta pedra trabalhada (com formas paralelepípedicas e bordos em aresta viva ou arredondada) ser retirada de rochas de boa qualidade e que contêm propriedades que conferem à pedra de cantaria elevada resistência mecânica [3].



Figura 2.3 – Elementos de cantaria no contorno duma abertura de janela

As pedras de cantaria mais utilizadas eram as de mármore, granito, xisto e calcário, sendo muito vulgar a utilização de calcário (Lioz, Moleanos, Moca Creme, Ançã, etc.). O Lioz é um calcário sedimentar bioclástico³ e calciclástico⁴ de grande qualidade, proveniente da região de Sintra e que, por ter boas características mecânicas, era utilizado em construções mais ricas [82].

2.2.3 Paredes divisórias ou de compartimentação

Entende-se por “parede de compartimentação” aquela que foi concebida para desempenhar essencialmente a função de divisão dos espaços interiores no edifício, não cumprindo assim qualquer função estrutural para o mesmo. Ainda assim nos edifícios antigos todas as paredes desempenham, na maior parte das vezes, funções estruturais importantes, pois a própria organização do espaço dos edifícios propicia a mobilização das capacidades resistentes destas paredes. As paredes de compartimentação, embora não recebam directamente cargas verticais, cumprem uma função

³ Constituído por fragmentos de material orgânico.

⁴ Rico em mineral calcite (com composição química CaCO_3 – Carbonato de Cálcio) [81].

estrutural fundamental no travamento geral das estruturas, pois é através destas paredes que se faz a interligação com os pavimentos e as coberturas durante a ocorrência de sismos, fazendo com que a energia mobilizada pelos sismos se dissipe ao longo do tempo através destas ligações [3, 57].

Mas não é só ao nível das acções horizontais que estas paredes são solicitadas. Ao longo do tempo as paredes que se encontram sob os pavimentos podem sofrer acções verticais acrescidas quando se dá o envelhecimento e fluência dos materiais (nomeadamente a madeira dos pavimentos), movimentos diferenciais das fundações, acção dos sismos ou aumentos de sobrecargas. Os reajustamentos e reposicionamentos dos pavimentos obrigam a que as paredes divisórias suportem cargas verticais que não eram antes tidas em conta, passando assim a ter funções resistentes, substituindo, em casos mais extremos, as paredes-mestras quando estas apresentam um adiantado grau de degradação ou quando são suprimidas em intervenções descuidadas [3, 57].

2.2.4 Caixilharias

A caixilharia exterior dos edifícios antigos exerce um papel importante na sua função de elemento da envolvente, pois é através dos vãos exteriores que se faz a “ponte” do interior do edifício para o exterior deste, estando muitas vezes o próprio edifício sujeito a mais anomalias quando a caixilharia exterior se encontra também ela degradada [3].

A caixilharia original dos edifícios antigos é constituída por madeira, mais frequentemente por madeira de casquinha. Os vãos dos edifícios estão na maior parte das vezes associados a diversas anomalias que ocorrem nos edifícios antigos, pois os vãos exteriores (principalmente as janelas) além de conterem a caixilharia de madeira, também são formados pelos envidraçados. Estes últimos elementos são uma fonte de perda de calor que contribui para o comportamento térmico deficiente dos edifícios [1, 3]. A falta de estanquidade destes elementos contribui para uma razoável ventilação no interior dos edifícios, contrariamente ao que se verifica nas caixilharias de alumínio em que existe elevada estanquidade ao ar.

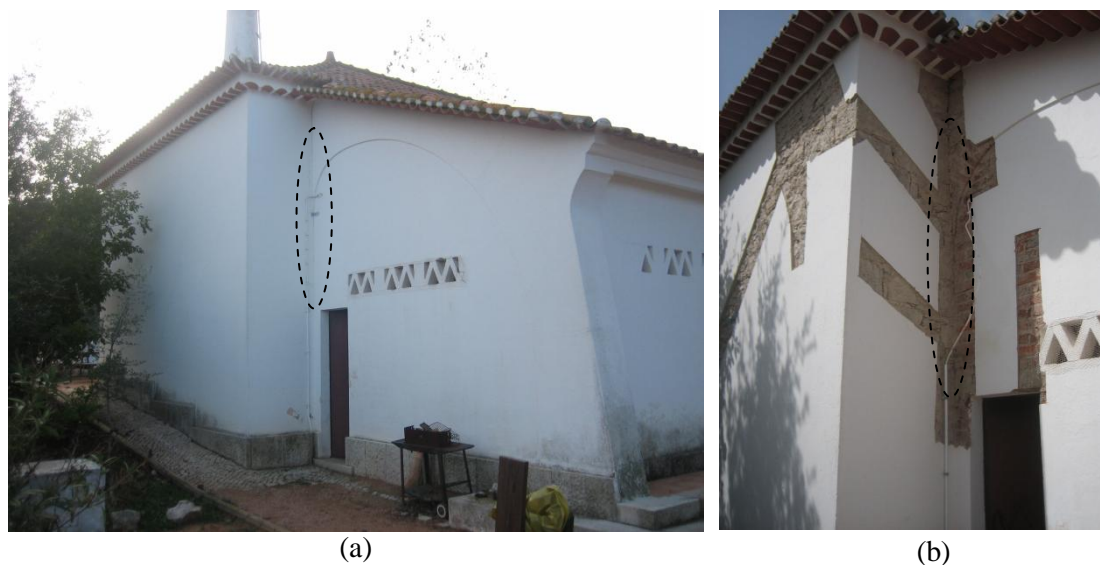
2.3 Anomalias em paredes e fundações de edifícios antigos

2.3.1 Anomalias em fundações

As anomalias mais frequentes em fundações de edifícios antigos estão associadas ao terreno de fundação, às fundações ou ao edifício no seu conjunto.

Quando ocorrem alterações do nível freático nos terrenos de fundação, como por exemplo o rebaixamento do nível freático após a realização de escavações a seco na periferia dos edifícios antigos, o espaço ocupado pela água virá a ser ocupado pelo solo devido ao rearranjo que as partículas tendem a fazer. Este rearranjo das partículas provoca movimentos de assentamento nas fundações. A

ocorrência de assentamentos pode ter também origem nas infiltrações, de águas da chuva ou proveniente de roturas de tubagens da rede de abastecimento de águas e de drenagem de águas residuais. Os efeitos de descompressão lateral dos terrenos de fundação devido a escavações de valas podem também ocasionar movimentos de assentamento que dão origem à ocorrência de fendilhações nas paredes dos edifícios antigos [3], figura 2.4.



(a) – vista geral; (b) – pormenor da anomalia após a abertura de roços no local

Figura 2.4 – Fendilhação de parede por assentamento de fundação – caso em Loulé (Centro Ambiental da Pena) [93]

As alterações dos níveis freáticos podem também dar origem ao apodrecimento das estacas de madeira quando as condições de humedificação da madeira forem alteradas. Trata-se assim duma anomalia associada às características das fundações. No caso das fundações directas, as anomalias mais frequentes relacionam-se com a degradação dos próprios materiais constituintes, quer pelo arrastamento dos elementos mais finos que constituem a alvenaria de fundação, nomeadamente das argamassas de assentamento das pedras, quer pela meteorização das fundações expostas na sequência de escavações [3].

2.3.2 Anomalias em paredes resistentes

As paredes resistentes dos edifícios antigos estão sujeitas a anomalias que ocorrem, na maior parte das vezes, devido às características da própria alvenaria de pedra. Assim destacam-se em seguida as principais características que podem levar a essas anomalias [64, 74]:

- muito fraca capacidade resistente à tracção da alvenaria, devido à fraca ligação das argamassas e, por consequência, também fraca resistência a esforços de flexão;

- resistência à compressão muito dependente do grau de confinamento transversal dos paramentos, em especial nas paredes compostas⁵ cuja resistência à compressão está também dependente da existência de material incoerente do núcleo⁶ e do volume e distribuição de vazios. Nas paredes compostas o núcleo, de fracas resistências mecânicas, tem tendência para compactar, com consequente distribuição de tensões não-uniforme e tendência para deformar ou expulsar os paramentos exteriores;
- fraca resistência ao corte, condicionada pela diminuta resistência da argamassa a tensões de corte e pela fraca resistência a mecanismos de tracção quando submetida a cargas horizontais no plano.

É comum em edifícios antigos as paredes resistentes apresentarem a alvenaria desagregada e fendilhada ou em algumas zonas das paredes estas se encontrarem com esmagamentos localizados.

A desagregação é a anomalia mais generalizada que provoca a progressão e o agravamento da fendilhação nas paredes resistentes, figura 2.5. É uma anomalia que é provocada pelos agentes climáticos, como é o caso da acção da água e da alternância do frio e do calor com as consequentes expansões e contracções que advêm dessa alternância, bem como o caso da acção do vento conjuntamente com as poeiras e areias que o mesmo transporta originando assim um efeito abrasivo na superfície das paredes. Este efeito do vento pode ser agravado pela acção da poluição e pela acção da água, em particular das águas da chuva, das águas de infiltração ou da humidade do terreno que ascende por capilaridade desde os terrenos de fundação dos edifícios até às paredes resistentes [3, 57]. A lavagem dos finos e dos ligantes, pertencentes à alvenaria da parede, por parte da acção da água é também uma das principais causas que leva à desagregação da alvenaria das paredes.



(a) – caso nos Açores (Igreja de S. Francisco na Ilha da Horta); (b) – caso em Faro

Figura 2.5 – Desagregação de alvenaria “fraca”

⁵ Paredes compostas são paredes com múltiplas folhas, ou seja com mais que uma camada. A ligação transversal entre folhas é em geral fraca e assegurada pela argamassa colocada entre as pedras, ou nula no caso de as folhas serem desligadas. Existem paredes com duas folhas ou paredes com três folhas [64].

⁶ O núcleo em paredes compostas de três folhas designa-se pela camada interior de fraca qualidade que separa as duas folhas exteriores destas paredes [64].

Os danos anteriormente descritos podem atingir níveis de profundidade consideráveis quando se trata de paredes constituídas por pedras brandas e de má qualidade, como é o caso de determinados calcários e arenitos utilizados em certas regiões do País [3, 57].

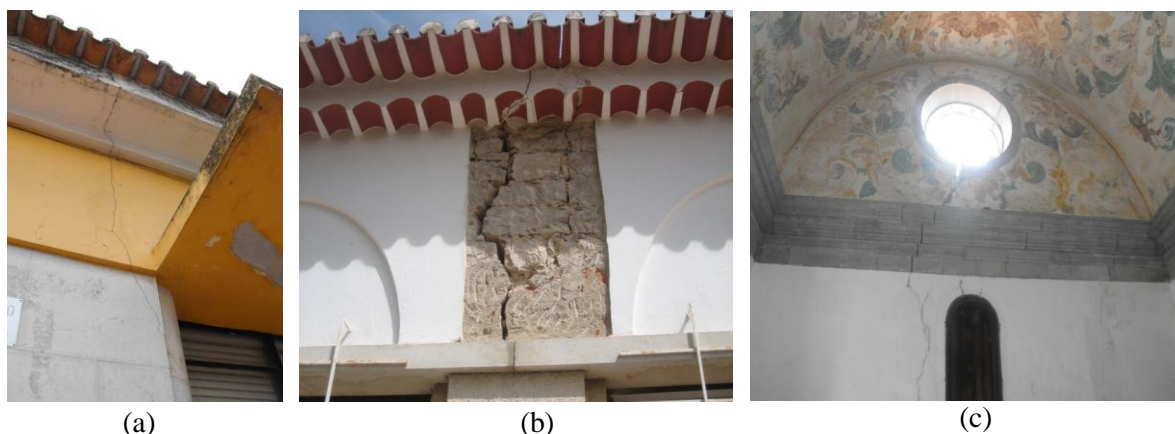
A água, em particular a humidade do terreno, é sem dúvida um dos principais agentes causadores da desagregação das paredes. A água tem inúmeras e variadas formas de manifestação nas edificações. A ascensão da água (existente nos terrenos) por capilaridade através das fundações pode ocorrer até alturas por vezes significativas. Os sais existentes no terreno e nos próprios materiais de construção são dissolvidos pela água e são posteriormente transportados através das paredes para níveis superiores. Quando a água atinge a superfície das paredes e se evapora, os sais cristalizam e ficam aí depositados, dando origem à formação de eflorescências, no caso em que a deposição ocorre à superfície, ou de criptoflorescências, quando a cristalização ocorre sob os revestimentos de parede. A cristalização desses sais é acompanhada por um aumento de volume, que, após a sucessão de ciclos de secagem e molhagem, provoca a degradação da alvenaria, o destacamento dos materiais superficiais, ou a desagregação e o empolamento do reboco [34].

O esmagamento das paredes, figura 2.6, é uma anomalia menos recorrente e trata-se dum fenómeno mais localizado que a desagregação da alvenaria. É um fenómeno que ocorre em locais que suportam cargas concentradas excessivas, como são exemplos os locais onde existem descargas de vigas em paredes que não tenham um apoio ou um reforço que, por sua vez, assegurem a diminuição das tensões nesses pontos de apoio quando as cargas aplicadas excedem em muito as previstas inicialmente. Para evitar a ocorrência deste problema era usual, nas construções de melhor qualidade, a colocação de pedras de boa qualidade (lintel), com a face superior aparelhada, onde posteriormente ficariam apoiadas as vigas de pavimento ou as de cobertura, reduzindo assim o risco de esmagamento local. Nas zonas de contacto lateral entre as vigas de madeira e a alvenaria podem ocorrer esmagamentos devido às torções que surgem nas vigas quando estas passam pelo processo de secagem após a sua aplicação em obra [3, 57].



Figura 2.6 – Esmagamento localizado de parede na zona de apoio duma asna de madeira [93]

A fendilhação das paredes de alvenaria, figura 2.7, pode ocorrer na zona corrente das paredes, embora se verifique, em geral, que as fendas procuram os pontos mais fracos, como as aberturas para portas e janelas, especialmente no seu contorno, pois são zonas onde se encontram elevadas concentrações de tensões, responsáveis pelo início da fendilhação, podendo também ocorrer na ligação entre paredes ortogonais [3, 57].



(a) – caso em Montemor-o-Novo (Mercado Municipal) [93]; (b) – caso em Loulé (Centro Ambiental da Pena) [93];
(c) – caso nos Açores (interior da igreja de S. Francisco)

Figura 2.7 – Fendilhação de paredes

Os movimentos de assentamento das fundações, em particular assentamentos diferenciais, são uma das principais causas para a fendilhação destas paredes em toda a sua espessura. A existência de perpianhos⁷ e de ligações eficazes entre paredes ortogonais e paredes compostas de panos múltiplos através de tirantes ou de grandes blocos de travamento contribuem para a atenuação dos efeitos dos assentamentos diferenciais das fundações e dos efeitos de abaulamento das paredes compostas.

As acções sísmicas e os esforços de corte são outras das principais causas para o aparecimento de fendilhação nas paredes resistentes, sendo que o efeito deste tipo de acções conduz à formação de fendas inclinadas cruzadas, aproximadamente a 45°.

A fendilhação situada junto às aberturas de portas e janelas pode ainda estar relacionada com a falta de resistência adequada dos lintéis superiores ou de arcos de descarga conduzindo a esforços de flexão elevados e, conseqüentemente, a fissuras verticais nestas zonas [3, 57].

Quanto às anomalias mais frequentes que ocorrem em elementos de cantaria, destacam-se o desgaste da pedra de cantaria, a degradação por reacções de compostos químicos com a pedra, a fendilhação e a fracturação.

O desgaste da pedra (e da argamassa) é provocado pela acção da água da chuva que, por vezes, provoca a “dissolução” da pedra calcária⁸ quando a água actua em conjunto com a poluição

⁷ Os perpianhos são pedras cuja cauda (comprimento) é igual à espessura da parede, tendo por isso duas faces “visíveis” nos paramentos [57].

⁸ A pedra calcária tem como principal constituinte básico o carbonato de cálcio (CaCO_3), tendo outros constituintes básicos como é o caso do carbonato de magnésio (MgCO_3), dos silicatos de cálcio, entre outros.

atmosférica, levando à perda de resistência destes elementos e, posteriormente, à perda de espessura. Os contaminantes atmosféricos, como é o caso do dióxido de enxofre (SO_2), podem depositar-se nas superfícies das pedras de cantaria e reagirem com a água depositada originando ácido sulfúrico (H_2SO_4), que por sua vez reage com o carbonato de cálcio (CaCO_3) resultando na sulfatação da pedra calcária. A sulfatação das superfícies calcárias provoca a sua degradação profunda através da formação de sulfatos como é o caso do sulfato de cálcio (CaSO_4). Este composto químico, quando hidratado, dá origem ao produto final, o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que é uma substância muito frágil e facilmente degradável. O processo de oxidação heterogénea do SO_2 em fase aquosa é, provavelmente, o processo mais importante na formação de sulfatos e consequentemente na deterioração dos materiais pétreos calcários [23].

A fendilhação e fracturação nos elementos de cantaria ocorrem frequentemente após o assentamento de fundações, ou de movimentos estruturais nas paredes constituídas por estes elementos. É também habitual observar-se este fenómeno nos elementos de cantaria, após a ocorrência dum sismo ou duma brusca variação térmica, que leva ao limite da capacidade resistente destes elementos [3].

2.3.3 Anomalias em paredes divisórias ou de compartimentação

Embora as paredes interiores dos edifícios antigos não tenham sido concebidas para desempenharem funções estruturais relevantes nestes edifícios, estas têm um papel fundamental quanto ao travamento estrutural e quanto ao próprio comportamento global do edifício. Em variadas situações como assentamentos diferenciais de fundações e acção de sismos, seguidos da fendilhação das paredes resistentes e a deformação excessiva dos pavimentos de madeira, podem resultar na mobilização das capacidades resistentes destas paredes muito para além do que foi previsto na concepção dos edifícios.

A limitação das paredes de compartimentação quanto à resistência a elevados esforços de compressão pode conduzir ao aparecimento dum conjunto de anomalias típicas de paredes estruturais esbeltas e deformáveis quando ficam sujeitas a acréscimos de cargas imprevistos. São exemplos destas anomalias, os abaulamentos, associados à instabilidade por encurvadura, habituais em esmagamentos localizados. A presença de água pode também ser um factor de degradação das paredes interiores quando estas se encontrem junto a paredes exteriores que estejam em contacto com água ou quando estas são atravessadas por tubagens das redes de água e esgotos [3, 57].

Quanto à fendilhação das paredes de compartimentação existem diversas formas de fendilhação que ocorrem nestas paredes, sendo que as mais vulgares são: a fendilhação por retracção dos panos de parede, figura 2.8 (a); fendilhação por dilatação do pavimento superior que é provocada pelas variações térmicas, figura 2.8 (b); fendilhação provocada pelo assentamento diferencial das fundações, figura 2.8 (c); e deformação excessiva por flexão dos pavimentos [52, 57], figura 2.8 (d).

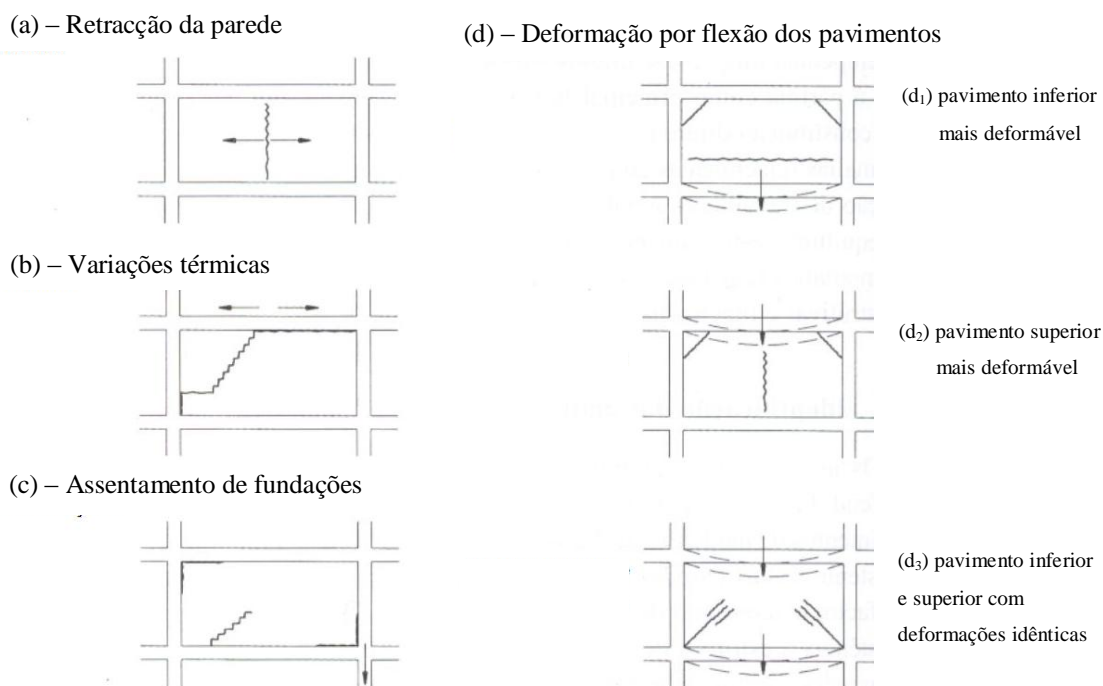


Figura 2.8 – Representação esquemática das fendilhações mais usuais em paredes divisórias e respectivas causas [52]

2.3.4 Anomalias em caixilharias

A localização das caixilharias no edifício torna estes elementos particularmente sensíveis à acção directa da radiação solar e das chuvas batidas pelo vento. As anomalias mais comuns estão muitas das vezes associadas ao envelhecimento do próprio material que compõe a caixilharia; destas anomalias destacam-se a deterioração da madeira da caixilharia pelo ataque de fungos e insectos que é favorecido pela humidade existente na caixilharia, o envelhecimento dos materiais de assentamento e vedação dos vidros, degradação das ferragens e, no caso de caixilharia de ferro, destaca-se a corrosão do ferro [3]. As condensações superficiais interiores devido à baixa resistência térmica e deficiente vedação ao ar das caixilharias também levam à degradação dos materiais constituintes das janelas.

2.4 Técnicas de reabilitação estrutural de fundações e paredes de edifícios antigos de alvenaria de pedra

2.4.1 Considerações gerais

A decisão de intervenção deve passar por uma avaliação rigorosa do estado de degradação do edificado. Sempre que a segurança dum edifício seja posta em causa ou que este tenha sofrido alterações que originem cargas ou condições mais desfavoráveis para a estrutura além daquelas para as

quais o edifício tenha sido concebido, é necessário proceder à intervenção do mesmo, tendo como principal objectivo repor ou melhorar a segurança estrutural deste, respeitando por um lado a identidade cultural e por outro o seu valor histórico.

A conservação, o reforço e o restauro do património arquitectónico requerem uma abordagem metódica, faseada e realizada por equipas multidisciplinares (envolvendo engenheiros, historiadores, arquitectos, etc.) [36, 64], quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Fases da intervenção num edifício antigo [36, 64]

Fase	Características
Anamnese	Estudo da evolução histórica e recolha de informações importantes.
Diagnóstico	Identificação das causas das anomalias, do grau de degradação e avaliação da segurança estrutural.
Terapia	Escolha e implementação das técnicas de intervenção.
Controlo	Acompanhamento e controlo da eficiência da intervenção.

As técnicas de intervenção utilizadas devem ser escolhidas de modo a que o valor patrimonial dos edifícios antigos não seja comprometido. É necessário optar sempre que possível pelas técnicas tradicionais e materiais utilizados na altura em que o edifício tenha sido construído, de forma a serem compatíveis com o conjunto existente. Mas, uma vez que actualmente a maioria dos materiais utilizados nas intervenções são diferentes dos originais, a reabilitação estrutural deve respeitar três características essenciais [14, 36, 64]:

- **Compatibilidade:**

As técnicas e os materiais utilizados devem tanto quanto possível garantir o mínimo de alteração das características da rigidez da construção e do funcionamento estrutural original. Os materiais utilizados não devem diferir muito dos materiais existentes quanto ao comportamento físico e/ou químico para que os novos materiais não sejam a causa do aparecimento de novas anomalias.

- **Durabilidade:**

Necessidade duma maior durabilidade dos novos materiais a serem utilizados para que as estruturas antigas, em especial as de valor histórico importante, sejam preservadas por um longo período de vida útil.

- **Reversibilidade:**

Embora não haja técnicas verdadeiramente reversíveis e seja difícil assegurar esta condição, é necessário tentar garantir a possibilidade de se poder remover, sem provocar danos nos materiais existentes, os novos elementos resultantes da intervenção.

Existem outros requisitos que devem igualmente ser tidos em conta, tais como: o não aumento do peso da estrutura após a aplicação dos materiais, a capacidade de solidarização dos novos materiais ao suporte, os aspectos estéticos posteriores à solução, o custo e o período da intervenção [64].

As técnicas de intervenção podem variar quanto aos materiais e quanto aos efeitos. Relativamente aos materiais, existem as técnicas tradicionais, que aplicam materiais e métodos de construção semelhantes aos originais, e as técnicas inovadoras, que visam encontrar métodos mais eficientes que os tradicionais mediante o uso de materiais e equipamentos tecnologicamente mais avançados.

Relativamente aos efeitos, existem as técnicas de reforço passivo cujos reforços funcionam apenas para as cargas superiores às correspondentes ao estado de equilíbrio em que a estrutura se encontra ou para deformações diferidas posteriores, enquanto as técnicas de reforço activo, os reforços funcionam sempre que exista modificação das condições de carga [64].

2.4.2 Técnicas de reabilitação

Destacam-se em baixo as técnicas de reabilitação estrutural em fundações e paredes de edifícios antigos de alvenaria de pedra que são abordadas no presente trabalho.

Os códigos apresentados no final de cada técnica são utilizados mais à frente (no presente capítulo) para a elaboração dos quadros 2.2 e 2.3.

- **Em fundações:**
 - Injecção da alvenaria da fundação (F1)
 - Injecção do terreno de fundação (F2)
 - Alargamento da base da fundação (F3)
 - Reforço de fundações com estacas e microestacas (F4)

- **Em paredes:**
 - Injecção de caldas (P1)
 - Refechamento de juntas (P2)
 - Desmonte e reconstrução (P3)
 - Confinamento transversal simples (P4)
 - Tirantes (P5)
 - Reboco armado (P6)
 - Encamisamento (P7)
 - Pré-esforço vertical (P8)
 - Reforço com materiais compósitos (P9)
 - Gateamento de fendas com grampos metálicos (P10)

Em seguida descreve-se a técnica de reabilitação estrutural em fundações e paredes de edifícios antigos de alvenaria de pedra com particular relevância na incorporação de resíduos de demolição. As descrições das restantes técnicas de reabilitação são apresentadas no Anexo I.

Desmonte e reconstrução

Esta técnica consiste na remoção do material constituinte da parede ou de outro elemento de alvenaria que se encontre danificado, por exemplo num local adjacente a uma fenda, fazendo de seguida a reconstrução dessa zona utilizando o material original ou novos elementos com melhor qualidade construtiva [46], figura 2.9.

Esta solução pode ser utilizada quando se pretender conservar o aspecto original da estrutura conduzindo assim à conservação do património do edifício a reabilitar.



(a) – representação esquemática de zona reconstruída [64]; (b) – reposicionamento das pedras [78]; (c) - pedras de alvenaria após desmonte e reconstrução [92]; (d) – elementos de cantaria após desmonte e reconstrução [92]

Figura 2.9 – Substituição e reconstrução de elementos em paredes de alvenaria de pedra

A substituição do material degradado é uma técnica de intervenção importante, pois permite recorrer a técnicas tradicionais que assegurem a compatibilidade entre o novo e o existente (materiais constituintes). Para se garantir a compatibilidade é necessário fazer a ligação dos elementos recorrendo a argamassas pouco retrácteis, reduzindo assim a fendilhação por retracção, e que confirmam rigidez o

mais compatível possível com o suporte (parede), como por exemplo argamassas com base em cal e areia ou argamassas bastardas com base em cimento, cal aérea e areia, procurando também manter a forma como o edifício antigo absorve e evapora a água. Neste contexto, de modo a reduzir a fendilhação por retracção, é importante evitar argamassas com base em cimento e areia, a não ser que se reforcem as ligações entre a alvenaria nova e a existente através da colocação de redes metálicas (aço inoxidável) ou de compósitos FRP de fibras de vidro com protecção anti-alkalina (a descrição da constituição destes compósitos encontra-se no Anexo I, a propósito do reforço de paredes com compósitos FRP) que cubram toda a alvenaria nova e que sejam “ancoradas” na alvenaria existente, num comprimento de pelo menos 0,20m [3, 29, 56].

O desmonte e reconstrução deve seguir as seguintes premissas [56]: deve-se numerar as peças para respeitar a disposição inicial, nos casos em que a reconstrução é feita com os materiais originais; para facilitar uma boa ligação entre a alvenaria existente (antiga) e a alvenaria nova deve-se deixar os contornos irregulares na fronteira entre as duas alvenarias e proceder à intervenção em pequenos troços; a superfície da alvenaria deve ser limpa, preferencialmente com água antes da construção dum novo troço.

2.4.3 Associação de técnicas de reabilitação

Algumas técnicas de reabilitação estrutural em fundações e paredes podem ser aplicadas em conjunto de forma complementar. Nos quadros 2.2 e 2.3 são representadas possibilidades de aplicação conjunta de técnicas de reabilitação estrutural de fundações e paredes, respectivamente.

Na primeira linha e coluna dos quadros 2.2 e 2.3 apresentam-se em código (letra e número) as diferentes técnicas de reabilitação estrutural que foram enumeradas neste capítulo e em cada célula pertencente aos quadros é representada a associação de técnicas através de pontos. Ambos os quadros são simétricos e portanto só metade de cada quadro se encontra preenchida. Como exemplo de aplicação descrevem-se em seguida as seguintes possibilidades:

- *Exemplo 1 (em fundações)*

A técnica do **alargamento da base da fundação (F3)** pode ser aplicada em conjunto com as seguintes técnicas: **injecção da alvenaria da fundação (F1)** e **injecção do terreno de fundação (F2)**.

- *Exemplo 2 (em paredes)*

A técnica do **reboco armado (P6)** pode ser aplicada em conjunto com as seguintes técnicas: **injecção de caldas (P1)**, **refechamento de juntas (P2)**, **confinamento transversal simples (P4)** e **gateamento de fendas com grampos metálicos (P10)**.

Quadro 2.2 – Técnicas de reabilitação estrutural em fundações com possibilidade de aplicação em conjunto

Técnica de reabilitação		F1	F2	F3	F4
Nº	Designação				
F1	Injecção de alvenaria de fundação				
F2	Injecção do terreno de fundação	•			
F3	Alargamento da base da fundação	•	•		
F4	Reforço de fundações com estacas e microestacas	•			

Quadro 2.3 – Técnicas de reabilitação estrutural em paredes com possibilidade de aplicação em conjunto

Técnica de reabilitação		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Nº	Designação										
P1	Injecção de caldas										
P2	Refechamento de juntas										
P3	Desmonte e reconstrução										
P4	Confinamento transversal simples	•	•								
P5	Tirantes	•	•								
P6	Reboco armado	•	•		•						
P7	Encamisamento	•	•		•						
P8	Pré-esforço vertical	•				•					
P9	Reforço com materiais compósitos	•	•								
P10	Gateamento de fendas com grampos metálicos	•	•			•	•			•	

PAVIMENTOS E COBERTURAS DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

3.1 Introdução

Em geral, nos edifícios antigos as estruturas de madeira estão associadas a pavimentos, coberturas e escadas. Frequentemente estes elementos necessitam de uma reabilitação profunda.

No presente capítulo faz-se uma descrição das soluções construtivas, das anomalias mais comuns e das principais técnicas de intervenção estrutural em pavimentos e coberturas de edifícios antigos de alvenaria de pedra. A descrição das diferentes técnicas de intervenção serve de base de apoio e sustenta a avaliação técnica, económica e ambiental que se encontra no Capítulo 4.

3.2 Soluções construtivas de pavimentos e coberturas de edifícios antigos

3.2.1 Pavimentos

Os pavimentos de edifícios antigos descritos nesta secção são na sua maioria pavimentos elevados, uma vez que os pavimentos térreos eram constituídos maioritariamente em terra batida, ou enrocamento de pedra, com uma camada de revestimento por cima, em lajedo de pedra, em ladrilhos cerâmicos ou em sobrados de madeira [3].

A madeira é o material estrutural predominante dos pavimentos elevados dos edifícios antigos; no entanto em alguns pisos de edificações mais nobres, a solução estrutural dos pavimentos consistia na construção de arcos e abóbadas de alvenaria, que constituíam soluções mais duráveis e capazes de “vencer” vãos de maior dimensão. Sobre os arcos e abóbadas de alvenaria eram colocados os revestimentos através da construção dum vigamento de madeira, apoiado nos elementos de alvenaria, que servia de apoio ao soalho, ou ainda através do enchimento do arco com entulho seleccionado, pedra solta ou terra, sobre o qual se colocava uma camada de argamassa onde o revestimento assentava. O abatimento do arco era um factor a ter em conta, pois quanto mais abatido o arco, maiores eram os impulsos horizontais gerados e transmitidos às paredes resistentes [3].

A escolha do tipo de madeira a utilizar na construção de pavimentos tinha normalmente em conta o edifício em que era aplicada, a função pretendida e sobretudo a predominância local das espécies de árvore. No quadro 3.1 identificam-se os tipos de madeira mais utilizados nos pavimentos e coberturas de edifícios antigos Portugueses e as respectivas características principais:

Quadro 3.1 – Tipos de madeira mais utilizados em pavimentos e coberturas de edifícios antigos Portugueses e as respectivas características principais [13, 72]

Nome comum	Nome científico	Características principais
Castanho	<i>Castanea sativa</i>	Madeira de folhosa dura, leve, fácil de trabalhar e com alguma durabilidade. Tem como desvantagem ser relativamente susceptível aos ataques de insectos como o caruncho. Proveniente de Trás-os-Montes, Beiras e Algarve. Utilizado principalmente em treliças das paredes de frontal, fileiras, madres e varas da cobertura.
Carvalho	<i>Quercus robur</i>	Madeira de folhosa dura e relativamente fácil de trabalhar. É resistente e tem durabilidade elevada, apresentando o inconveniente de ter uma massa volúmica elevada. Proveniente de Trás-os-Montes e Douro. Utilizado principalmente em treliças das paredes de frontal.
Pinho bravo (Pinho nacional)	<i>Pinus pinaster</i>	Madeira de resinosa moderadamente dura e pesada, fácil de trabalhar. Tem como inconvenientes a susceptibilidade a ataques de insectos (carunchos e térmitas) e de fungos (de podridão seca e húmida) e consequentemente tem reduzida durabilidade. Apresenta muitos nós e fendilha com facilidade. Tornou-se, nos últimos séculos, pela sua abundância no País, na principal fonte de abastecimento das estruturas de madeira. Utilizado principalmente em estacas de fundações.
Pinho manso	<i>Pinus pinea</i>	Madeira semelhante ao pinho bravo, mas com a presença de mais nós. Pouco utilizado nas estruturas de madeira.
Pinho silvestre (Casquinha)	<i>Pinus sylvestris</i>	Madeira de resinosa leve e muito fácil de trabalhar. Madeira oriunda das florestas da Europa Central. Utilizado principalmente em pisos, sendo também utilizado em coberturas.
Pinho da América (Pitespaine ou Pitch pine)	<i>Pinus palustris</i>	Madeira de resinosa de boa qualidade pois tem resistência e durabilidade elevadas. Aplicação frequente, principalmente em obras de maior importância. Originário da América do Norte. Utilizado principalmente em pisos e coberturas.

A estrutura dos pavimentos é constituída essencialmente pelo vigamento e pelos soalhos, tendo as vigas normalmente secção rectangular ou, em edifícios mais antigos, a forma do tronco de madeira, figura 3.1. É ainda constituída por outros elementos secundários como é o caso de tarugos e cadeias que servem para melhorar o funcionamento da estrutura face a acções pontuais ou no próprio plano da estrutura [22].

No vigamento principal são colocadas vigas ou barrotes de madeira dispostos paralelamente entre si e com afastamentos que podem variar consoante vários factores, entre eles a capacidade de carga e o vão a que estas ficam sujeitas. O afastamento varia entre cerca de 0,20 e 0,40m (entre eixos), sendo que a primeira e última viga dos pavimentos é frequentemente colocada junto às paredes. Na melhor construção da época pombalina era seguida uma regra que apontava para a adopção de afastamentos entre vigas iguais à largura das próprias vigas [3, 22].



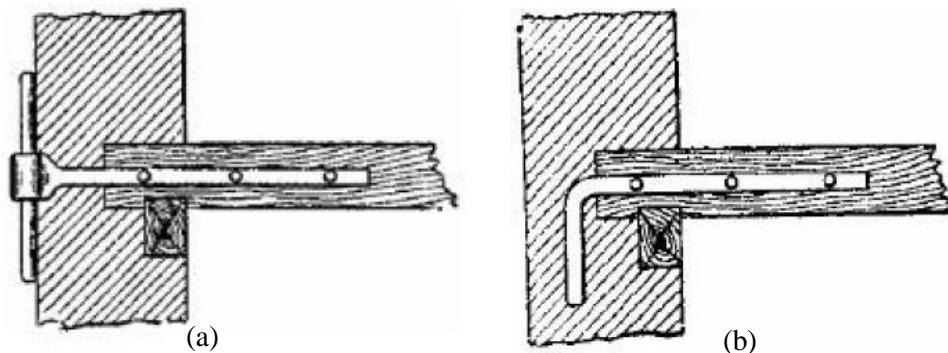
Figura 3.1 – Vigamento dum pavimento de madeira

As secções das vigas possuem em geral alturas da ordem de 0,20m, devido à limitação das espécies florestais à disposição. As secções destes elementos podiam variar muito consoante os vãos a vencer, os afastamentos entre vigas e as cargas [3, 22].

As extremidades do vigamento, designadas por entregas, ficam normalmente apoiadas ou encastradas nas paredes de alvenaria. A ligação das vigas com as paredes podia ser feita de modo simples através do encaixe das vigas em aberturas dispostas nas paredes. Este encaixe deveria ir até pelo menos 0,20 ou 0,25m dentro da parede [10]. Quando se tratava de paredes de alvenaria de pedra irregular, era usual criar-se uma base de apoio das vigas, mediante a colocação dum bloco de pedra com a face superior aparelhada e horizontal de modo a evitar o surgimento de esmagamentos na alvenaria por parte das cargas provenientes das vigas. Este bloco constituía um elemento repartidor ou distribuidor de cargas [3].

Sempre que se pretendia otimizar o travamento geral dos pavimentos face a uma acção sísmica, melhorava-se a ligação parede/pavimento através da utilização de ferrolhos. Estas peças têm

configurações muito variadas e consistem basicamente em barras achatadas de ferro, com furos para pregar ou aparafusar às vigas e que depois eram embebidas nas paredes. Estes elementos podiam atravessar as paredes e serem ancorados na face exterior da parede através dum vergalhão (ou chaveta), figura 3.2 (a), ou encastrar na parede através da dobragem em ângulo recto do ferrolho (de esquadro), ficando o ramo vertical embutido na parede [22, 68], figura 3.2 (b).



(a) – ferrolho ancorado pelo exterior; (b) – ferrolho de esquadro

Figura 3.2 – Representação esquemática de ligações parede-pavimento com ferrolhos metálicos [68]

Muitas vezes as vigas assentavam em frechais, com cerca de $0,10 \times 0,10 \text{m}^2$ de secção, corridos e embutidos nas paredes, o que permitia uma melhor distribuição de cargas sobre aquelas.

Finalmente, o apoio da viga pode ser feito através dum cachorro de pedra que se destaca na parede. Esta solução pode ser realizada em conjunto com o apoio num frechal, que por sua vez apoia no cachorro [68].

De modo a evitar a rotação das vigas, é comum existirem peças de madeira, designados por tarugos, assemblados segundo alinhamentos transversais e bem justos. O tarugamento impede também a encurvadura das vigas e minimiza possíveis efeitos de deformação durante o período de secagem da madeira [3], figura 3.3.



Figura 3.3 – Tarugamento em pavimento de madeira

O soalho dos pavimentos, também designado por solho, era constituído por um conjunto de tábuas de madeira, que assentavam nos vigamentos, de espessuras variáveis entre os 0,022 e os 0,05m, largura entre os 0,12 e os 0,30m e comprimento que poderia atingir os 10m [22].

3.2.2 Coberturas

No edificado antigo, distinguem-se vários tipos de coberturas. As coberturas inclinadas são as mais predominantes, existindo em muito menor número as coberturas planas (em terraço) e as coberturas curvas (abóbadas e cúpulas). A inclinação depende, essencialmente, da região e dos agentes atmosféricos condicionantes dos locais em que se encontram (quantidade de precipitação, probabilidade de queda de neve, etc.).

No caso das coberturas em terraço, a estrutura baseia-se em arcos e abóbadas, com enchimentos de nivelamento que recebem o revestimento. O número de águas da cobertura está directamente relacionado com a geometria e a dimensão em planta do respectivo edifício. Nos edifícios de menor dimensão, a estrutura da cobertura pode reduzir-se a uma única água (vertente), disposta segundo a menor dimensão do edifício, para vencer o vão. A estrutura é, assim, composta por um conjunto de vigas paralelas, interligadas com barras horizontais e conjugadas com alguns elementos auxiliares, de modo a conferir maior rigidez ao elemento. Enquanto nos edifícios de maior dimensão e importância, a estrutura principal das coberturas torna-se mais complexa, podendo ter duas, três ou quatro águas. Estas coberturas passam a ser compostas por asnas (o mais simétricas possível), obtidas pela simples ligação de elementos básicos de madeira em forma de triângulo [3].

A estrutura das coberturas dividia-se em principal e secundária. A primeira, assente directamente nas paredes resistentes, era responsável pela absorção de esforços. A segunda, colocada entre a estrutura principal e o revestimento, tinha a função de servir de apoio à colocação adequada da telha cerâmica. A estrutura principal da cobertura subdividia-se em dois grupos as asnas e os travamentos, figura 3.4.

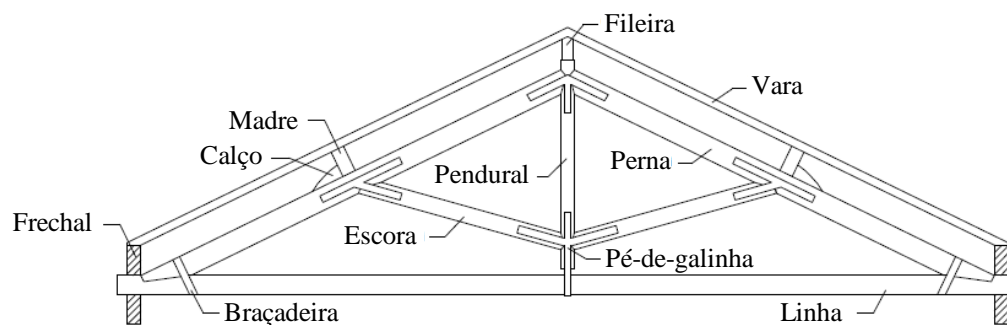


Figura 3.4 – Representação esquemática de estrutura em asna simples [7]

A asna simples é constituída pelos seguintes elementos [48]:

- Linha: elemento em posição horizontal com a função de travar a ligação das duas pernas;
- Perna: elemento inclinado que define a inclinação das vertentes do telhado. Assenta sobre a linha, no topo une-se ao pendural.
- Pendural: elemento vertical colocado no eixo de simetria da asna em delimitação ao vértice do telhado. Uma vez que é um elemento comum a todas as peças, a sua principal função consiste em fazer a ligação entre todos os elementos, conferindo estabilidade à estrutura.
- Escora: elemento inclinado, cuja função é a da ligação das pernas ao pendural, tentando impedir o arqueamento das mesmas, quando solicitadas por acções exteriores.

Os travamentos são os elementos que se encontram dispostos perpendicularmente ao alinhamento das asnas fazendo a união entre as mesmas. São, em geral, constituídos por [48]:

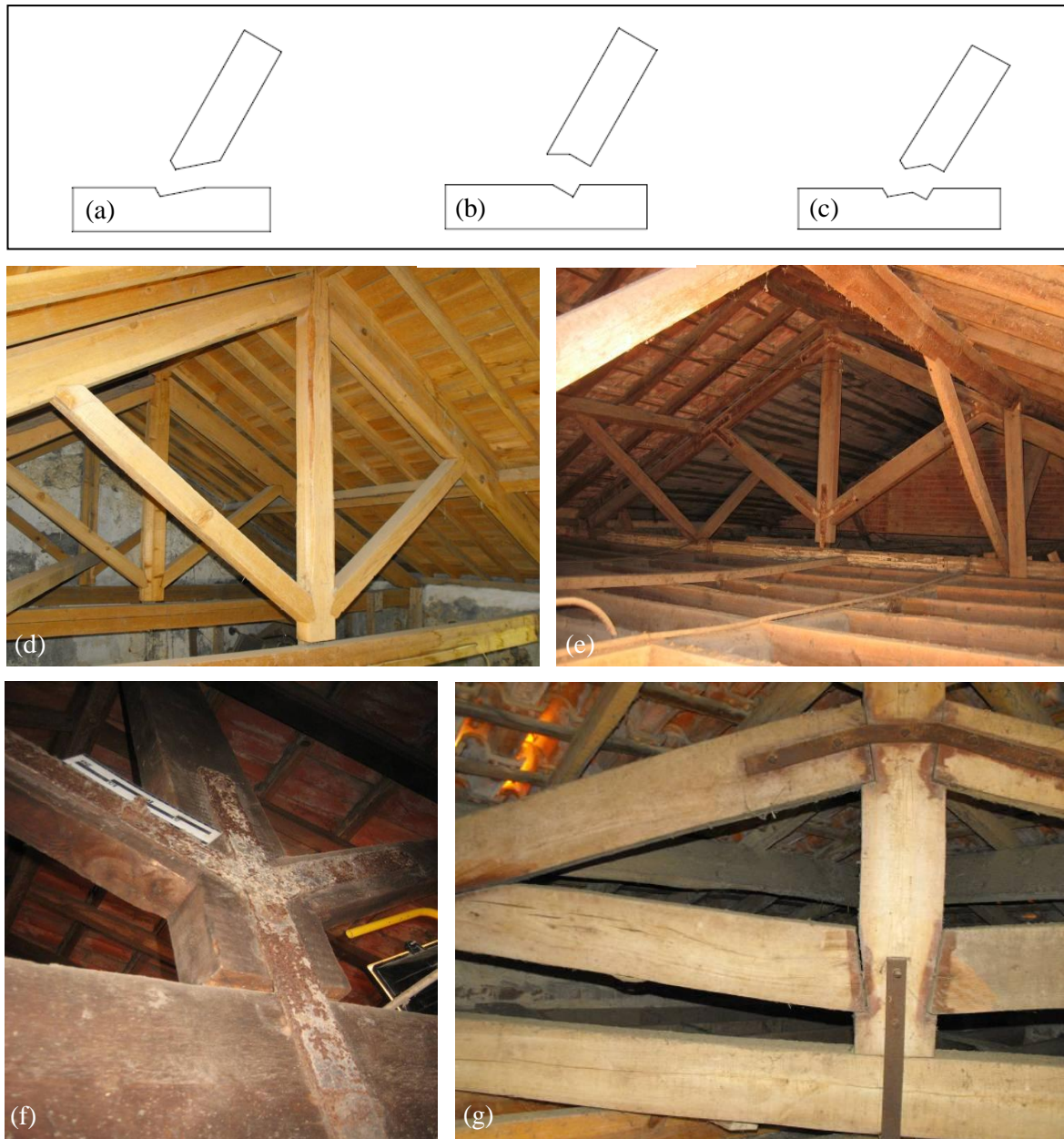
- Frechal: elemento de madeira embutido nas paredes de alvenaria de pedra, servindo de apoio às asnas (ou pavimentos); este elemento permite uma distribuição mais uniforme de esforços da cobertura para as paredes resistentes.
- Madre: elemento paralelo ao frechal colocado sobre as pernas da asna, estabelece a ligação entre as asnas da cobertura. Constitui também a ponte entre a estrutura principal e secundária.
- Fileira: elemento horizontal colocado no topo da cobertura sobre os diversos pendurais. Define o vértice do telhado e serve de apoio à estrutura secundária.

As asnas apresentam uma pendente variável entre 20° e 30° com vãos médios entre 6 e 7m. Materializada por telhas cerâmicas apoiadas sobre as ripas, por sua vez apoiadas sobre as varas com espaçamentos entre os 0,40 e os 0,50m, que assentam por sua vez sobre a fileira, as madres e o frechal [7].

A estrutura secundária surgia em complemento da estrutura principal, fazendo a ponte entre esta e o revestimento. Esta estrutura era constituída por varas, tábuas guarda-pó e ripas. Tinha como função conferir apoio aos elementos do revestimento. As tábuas pertencentes ao forro (tábuas de guarda-pó) podiam ter espessuras entre 0,025 e 0,035m e vãos entre 0,50 e 0,70m, e sobre estas tábuas assentavam ripas de madeira com secção de 0,04x0,02m² onde por sua vez assentava a tradicional telha cerâmica [41, 48].

As diferentes peças constituintes da cobertura de madeira continham ligações pregadas e coladas. Existem vários sistemas de encaixes e samblagens (ligações tradicionais por entalhes) nos elementos das asnas, sendo os mais comuns, os entalhes de dente simples ou duplo, figura 3.5 (a, b, c). Nestas ligações, os esforços são transmitidos por compressão e/ou atrito. De forma a melhorar o contacto entre os elementos ligados são normalmente adicionados elementos metálicos, figura 3.5 (f, g). O uso destes elementos metálicos, para além de prevenir as deformações no plano ortogonal à estrutura, tem o objectivo de garantir a estabilidade da ligação frente a forças cíclicas (inversão de esforços), por

exemplo o caso duma acção sísmica. Podia ainda recorrer-se a elementos de reforço, nas ligações tradicionais ou samblagens, como é exemplo as braçadeiras, esquadros e varões metálicos [3, 7].



Representação esquemática de samblagem: (a) – por dente simples anterior [8]; (b) – por dente simples posterior [8]; (c) – por dente duplo [8]; (d) – asnas de madeira: caso na Igreja de S. Francisco na Ilha da Horta [93]; (e) – vista interior de cobertura: caso no Seixal [93]; (f) – pormenor de pé de galinha: caso no Seixal [93]; (g) – ligações metálicas em elementos estruturais: caso no Mercado Municipal em Montemor-o-Novo [93]

Figura 3.5 – Estrutura e ligações em coberturas de madeira

É importante realçar a ligação das asnas de madeira às paredes resistentes através de apoios localizados nas zonas correntes das paredes de alvenaria. Os apoios eram materializados através de consolas e cachorros em pedra de cantaria pela mesma razão que se colocavam estes elementos para apoios de pavimentos, figura 3.6.



Figura 3.6 – Pormenor de apoio de asna em cachorro de pedra [93]

3.2.3 Escadas

Nos edifícios antigos as escadas são, em geral, de madeira ou de pedra em casos menos comuns. Nas escadas de madeira os tipos de madeira mais utilizados são os mesmos que foram referidos a propósito dos pavimentos e coberturas.

Nos edifícios correntes mais antigos, as escadas são geralmente de tiro, em lanço único entre andares, de reduzida largura (inferior a 1m) e com inclinação muito acentuada. Os degraus eram dotados de espelhos que chegavam a ultrapassar os 0,20m. No entanto as escadas apresentavam os mais variados traçados, dos quais se citam como principais os de um tiro, de leque, de lanços paralelos, de lanços perpendiculares, de três lanços paralelos e helicoidais [3, 48].

As escadas encontravam-se confinadas a um espaço próprio do edifício, a caixa de escadas; estas localizavam-se, normalmente, junto de uma das empenas do edifício, portanto na extremidade do lote. Com o tempo, a localização da escada foi deslocada em alguns edifícios, situando-se próxima do centro do edifício. Esta localização justifica-se pela generalização dos edifícios em lotes de frente larga, com dois fogos (esquerdo e direito) por piso, e pela procura duma determinada simetria estrutural para fazer face à acção sísmica [3, 48].

Na construção pombalina as paredes da caixa de escada eram construídas por frontais, ou seja com estruturas cruciformes de madeira (cruzes de Santo André), preenchidas com alvenaria de tijolo ou de pedra irregular. Deste modo a caixa de escadas inseria-se no sistema da gaiola pombalina, de evidentes vantagens em relação à resistência à acção sísmica [3, 48], figura 3.7.

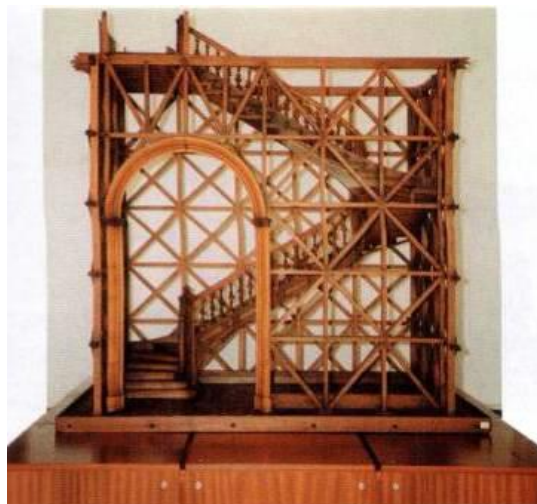


Figura 3.7 – Caixa de escadas inserida no sistema anti-sísmico da gaiola pombalina [57]

3.3 Anomalias em pavimentos e coberturas de edifícios antigos

3.3.1 Anomalias em pavimentos

Nos pavimentos de edifícios antigos, a estrutura e o revestimento são na sua maioria constituídos por madeira. Embora as soluções com alvenaria de pedra e tijolo, como é o caso das abóbadas e arcos, também sejam frequentes, nesta secção, será dado maior destaque às anomalias dos pavimentos em madeira.

As principais causas da degradação da madeira resultam da acção de agentes biológicos, atmosféricos, químicos, da acção do fogo, da deficiente concepção ou uso estrutural e da humidade [3, 11].

A degradação das estruturas de madeira começa pelos pontos críticos dessas estruturas, ou seja pelas suas partes mais frágeis. As anomalias mais frequentes nos elementos de madeira estão relacionadas com a presença de humidade, com a capacidade desses elementos em absorvê-la e às consequências que advêm dessa presença nos elementos de madeira.

Assim, são de destacar alguns pontos críticos das estruturas de madeira [11]:

-
- união entre elementos (nas samblagens entre peças é frequente haver encaixes e rebaixos onde se poderá acumular água e, conseqüentemente, ocorrer o início da degradação);
 - extremos de elementos expostos às diferentes condições climatéricas;
 - peças em contacto com o solo ou com humidade;
 - elementos exteriores ao edifício;
 - extremos de peças (por exemplo, vigas) apoiadas em paredes;
 - extremos de peças junto a zonas de risco (junto a fachadas, remates de pavimentos e cobertura, zonas de lavagens ou de criação de condensações e/ou pouco ventiladas);
 - meio-vão de peças longas (como vigas e alguns barrotes).

Os encontros dos vigamentos de madeira com as paredes resistentes exteriores constituem as zonas com maior risco de degradação, pois encontram-se normalmente dentro ou junto à parede, zona de fácil retenção de humidade (absorção de águas das chuvas pela parede exterior). Cria-se então, nestas zonas, condições ideais para o desenvolvimento de agentes biológicos, nomeadamente de fungos xilófagos (de podridão) e carunchos. Este problema pode ser agravado se no exterior da fachada existirem varandas ou saliências que permitam a absorção de água [3, 11, 30].

A madeira, como material estruturante dos pavimentos, pode ter irregularidades, defeitos e anomalias que afectam a sua qualidade e as suas características físicas e mecânicas. As causas das diversas anomalias e defeitos que ocorrem na madeira podem estar ligadas à própria estrutura do lenho, com o ataque de agentes vivos (animais ou plantas) e com o abate, a secagem e a laboração incorrectos. Os nós, as fendas, os empenos⁹, o fio¹⁰ inclinado em relação ao eixo da peça, são alguns dos principais defeitos que interferem directamente no comportamento estrutural das estruturas de madeira [50].

Embora os agentes atmosféricos e químicos, bem como a acção do fogo tenham um papel relevante no que respeita à degradação das estruturas de madeira, é a acção dos agentes biológicos e da humidade que constitui o factor determinante para a maioria das anomalias dos pavimentos de madeira.

Importa no entanto reter que a humidade, por si só, não degrada a madeira mas potencia o risco de degradação deste material por determinados agentes biológicos, no sentido em que estes só atacam a madeira quando o seu teor em água atinge determinados valores [15].

Os grandes grupos de agentes biológicos que causam a degradação da madeira são os seguintes:

- insectos xilófagos¹¹
- fungos xilófagos
- insectos sociais

⁹ Os empenos resultam do processo de secagem e/ou de um mau acondicionamento das peças durante o seu armazenamento. Resultam na alteração na forma da peça, relativamente a uma forma plana [11].

¹⁰ Designa-se por fio da madeira a inclinação relativa, mais ou menos acentuada, das fibras em relação ao eixo longitudinal da peça [11].

¹¹ Xilófagos são seres vivos que se alimentam de madeira.

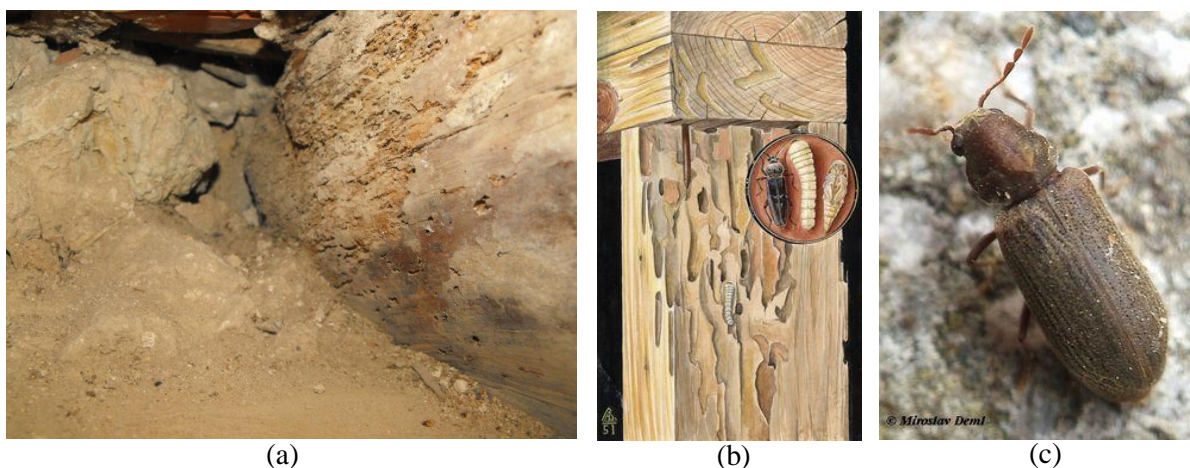
Em seguida são descritos com mais pormenor os agentes biológicos com maior relevância e mais vulgares na deterioração das estruturas de madeira.

Carunchos (insectos xilófagos)

Os carunchos são insectos de ciclo larvar, que atacam a madeira geralmente seca, embora possam ter razoável tolerância em relação a valores elevados de humidade. As larvas destes insectos penetram na madeira abrindo galerias; quando atingem a idade adulta, estes insectos saem pelo exterior dando origem ao orifício de saída (em forma circular ou elíptica).

As espécies mais vulgares existentes em Portugal são o *Hylotrupes bajulus* L. (caruncho grande) que ataca apenas madeira de Resinosa, normalmente só o borne, e o *Anobium Punctatum* (caruncho pequeno), que ataca indiferentemente o borne de Folhosas e de Resinosas [15].

A abertura de galerias por parte destes insectos leva à perda de secção do elemento atacado e consequentemente à sua perda de resistência, figura 3.8.



(a) – viga de madeira deteriorada por ataque de caruncho [93]; (b) – *Anobium Punctatum* [79];
(c) – *Hylotrupes bajulus* L. [80]

Figura 3.8 – Deterioração da madeira por carunchos

Fungos de Podridão (fungos xilófagos)

Os fungos de podridão desenvolvem-se em madeira com teor em água superior a 20%, sendo o conteúdo óptimo de humidade para o seu desenvolvimento entre 25 e 55% [4]. Alimentam-se directamente da parede celular da madeira, destruindo-a, levando à perda de peso e de resistência da madeira, acompanhada por alterações típicas de coloração e aspecto [15].

O borne de todas as espécies susceptíveis de ataque é não durável, variando a durabilidade do cerne da madeira consoante a espécie florestal [51].

Uma vez que o desenvolvimento de fungos está fortemente dependente da humidade, normalmente o apodrecimento da madeira ocorre somente em zonas críticas da construção, nomeadamente nas entregas de vigamentos nas paredes exteriores, junto de canalizações ou sob pontos singulares das coberturas [15], figura 3.9.



Figura 3.9 – Pavimento de madeira deteriorado pelo ataque de fungos de podridão junto a parede exterior [93]

Térmitas (insectos sociais)

As térmitas subterrâneas (*Reticulitermes lucifugos*) são “insectos sociais” que vivem em geral no solo, em colónias numerosas compostas por reprodutores, soldados e obreiras. Atacam a madeira com teor em água em geral acima de 20% e preferencialmente em contacto com o solo ou na sua proximidade, como é o caso de pisos térreos.

O ataque por térmitas é efectuado através da abertura de galerias junto à superfície das peças, nas quais se deslocam abrigados da luz e num ambiente húmido essencial ao seu desenvolvimento, figura 3.10. A perda de resistência dos elementos de madeira afectados é função do volume de material consumido [15].



Figura 3.10 – Elemento de madeira deteriorado por ataque de térmitas [4]

Os ataques destes agentes biológicos levam à redução da secção útil das estruturas dos pavimentos e, nas situações em que não se tomam medidas de prevenção e de eliminação destes problemas, pode ocorrer a destruição dos apoios das vigas e, conseqüentemente, rotações e movimentos acompanhados de redistribuição de esforços na estrutura dos pavimentos. Este fenómeno é visível nos pavimentos, quando estes se encontram com deformações acentuadas e grandes flechas a meio-vão. Deformações excessivas podem ainda corresponder a fluência do material (fenómeno que é ampliado pela presença de humidade excessiva), resultar apenas do empeno da madeira (colocada verde em obra e seca em serviço), da alteração de funções dos pavimentos ou da concentração excessiva de peso [3, 15].

A ocorrência de problemas de humidificação a partir de derrames provocados por roturas das tubagens de águas e esgotos domésticos, quando estes se encontram em locais próximos dos elementos de madeira, é uma situação que também deve ser tida em conta [3].

É ainda importante referir a vulnerabilidade da madeira constituinte dos pavimentos (bem como das coberturas) à acção do fogo. A elevada probabilidade de deflagração de incêndio e a relativa facilidade de desenvolvimento e propagação do incêndio que os edifícios antigos têm, são as principais razões que levam a segurança contra riscos de incêndio ser uma das principais debilidades dos edifícios antigos [5]. Deste modo devem ser tomadas medidas que reduzam o risco de incêndio e conseqüentemente aumentem a segurança ao incêndio nos edifícios antigos. Destacam-se as seguintes medidas: adaptação das instalações eléctricas (em risco de curto-circuito) à legislação em vigor; eliminação do armazenamento de matérias inflamáveis e combustíveis em zonas correntes de edifícios antigos, transferindo-os para locais concebidos e construídos para esse fim, de acordo com a legislação em vigor; melhoria da qualificação ao fogo dos diversos materiais, nomeadamente de revestimento, sempre que tal seja possível, o que pode ser conseguido pela aplicação de produtos ignífugos ou placas de gesso; criação de barreiras entre espaços interiores e entre espaços de edifícios contíguos de modo a satisfazer as exigências da legislação em vigor [5]. De acordo com a legislação em vigor [20, 60], em edifícios de utilização-tipo I (edifícios de habitação) e cuja categoria de risco seja a 1ª (correspondente a uma altura da utilização-tipo I inferior ou igual a 9m acima do solo), os elementos estruturais que tenham função de suporte e compartimentação (paredes e pavimentos) devem ser da classe de resistência REI 30 (Euroclasse de resistência para elementos com função de suporte de carga e com função de compartimentação resistente ao fogo cuja duração em “minutos” é de 30), e de REI 60 (Euroclasse de resistência para elementos com função de suporte de carga e com função de compartimentação resistente ao fogo cuja duração em “minutos” é de 60), para edifícios da 2ª categoria de risco (correspondente a uma altura da utilização-tipo I inferior ou igual a 28m acima do solo). Enquanto, por exemplo, para edifícios de utilização-tipo VII e VIII (hoteleiros e restauração, e comerciais e gares de transportes, respectivamente), cuja categoria de risco seja a 1ª (correspondente a uma altura da utilização-tipo VII e VIII inferior ou igual a 9m acima do solo e com número de efectivos inferior ou igual a 100), os elementos estruturais que tenham função de suporte e compartimentação (paredes e pavimentos) devem ser da classe de resistência REI 30.

De modo a satisfazer as exigências, anteriormente descritas, pelos pavimentos de madeira, devem ser adoptadas medidas que poderão passar pela aplicação de tectos pregados às vigas ou ao tecto existente e ao preenchimento do espaço entre o revestimento de piso e o revestimento de tecto com material adequado resistente ao fogo [5].

A primeira opção anteriormente referida é aplicável nos casos em que não existe tecto ou em que o tecto existente não apresenta ornamentação ou outras características que impeçam ou desaconselhem a sua ocultação. Neste caso existem diversas hipóteses de intervenção para a melhoria das condições de resistência ao fogo. Se o vigamento está exposto, deverá providenciar-se a aplicação de um tecto, ou se este existe, poderão aplicar-se placas e camadas de revestimento na sua face inferior [5].

A segunda opção anteriormente referida é aconselhável sempre que existam tectos que interessam preservar. Em muitos tipos de reabilitação, em particular, naqueles que envolvem edifícios com interesse histórico ou arquitetónico, os tectos podem ter elementos ornamentais de gesso ou pinturas que devem ser mantidos. Nesse caso considera-se conveniente o preenchimento do espaço entre os revestimentos de piso e de tecto com um material incombustível. Os materiais usados para este efeito podem ser baseados em agregados leves de perlite expandida. O material é colocado no espaço disponível entre os revestimentos, removendo-se para isso algumas tábuas de solho que serão reposicionadas posteriormente [5].

3.3.2 Anomalias em coberturas

O facto de a cobertura pertencer à envolvente do edifício exposto à acção da água de precipitação, das variações de temperatura, do vento, entre outros, leva à maior probabilidade de ocorrência de anomalias.

A água da chuva pode facilmente entrar em contacto com as peças de madeira da cobertura e esta situação torna-se particularmente gravosa quando ocorrem infiltrações em zonas correntes da cobertura por deficiência da própria estrutura, como é o caso de infiltrações por elementos de revestimento partidos, ou infiltrações associadas ao mau funcionamento da rede de drenagem de águas pluviais, como é exemplo uma infiltração numa caleira entupida.

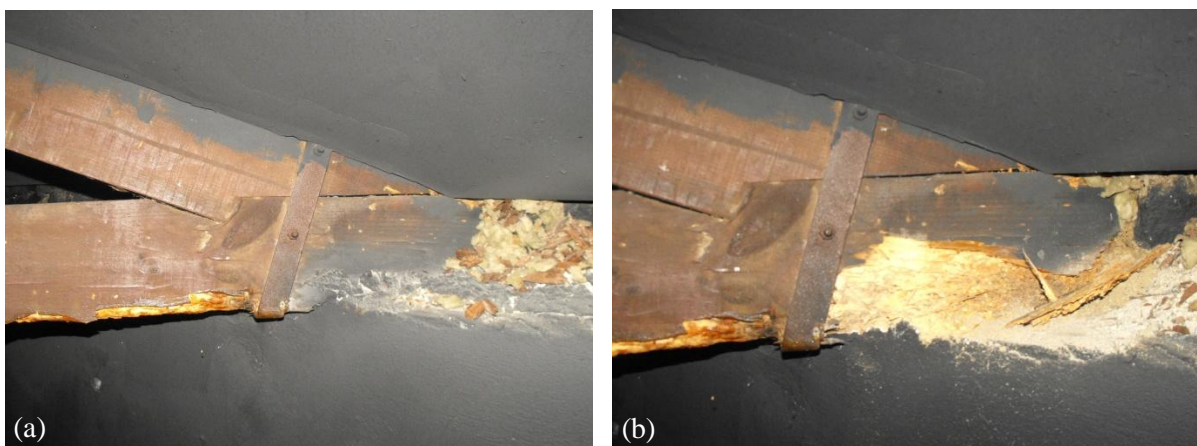
As estruturas de madeira tendem a deformar-se naturalmente devido aos efeitos de fluência do próprio material, o que se traduz, na maior parte das vezes, em deformações excessivas das coberturas, figura 3.11. Assim a configuração geométrica da estrutura principal da cobertura é alterada, sucedendo movimentos de adaptação do próprio revestimento, o que provoca o desalinhamento de telhas e aberturas de juntas entre telhas. Como consequência, a inclinação da cobertura e a pressão devida ao vento causa um refluxo de água para o interior da cobertura [3].



(a) – abatimento em vertente da cobertura; (b) – desalinhamento da cumeeira;

Figura 3.11 – Abaulamento excessivo da cobertura [93]

As infiltrações associadas ao mau funcionamento das redes de drenagem adquirem particular relevância quando ocorre o entupimento de tubos de queda e de caleiras. Em zonas onde esses tubos de queda estão embebidos nas paredes, as roturas darão origem à entrada de grandes quantidades de água nas paredes, danificando as paredes, bem como os pavimentos e elementos da cobertura. A entrada de água de forma contínua durante a estação de Inverno acaba por permitir que as fibras, da madeira constituinte dos elementos estruturais da cobertura, atinjam o seu ponto de saturação, pois os caudais de ventilação, por seu turno, também são fracos, facilitando o aparecimento de agentes xilófagos e as típicas patologias de perdas de secção, diminuição de resistência e maior capacidade de deformação, o que, conjuntamente com os fenómenos cíclicos de humidade e secagem, conduz à rotura das peças [3], figura 3.12.



(a) – vista; (b) – pormenor;

Figura 3.12 – Linha de asna de madeira deteriorada por ataque de fungos de podridão [93]

Quando a deterioração do material atinge a ligação nos apoios entre barras da linha e das pernas pertencentes às asnas das coberturas, por vezes dá-se a rotura nesta ligação, e deste modo perde-se o efeito de distribuição de esforços das asnas que passam a transferir para as paredes impulsos horizontais devidos ao peso da cobertura, transmitido por esses elementos inclinados [3], figura 3.13.

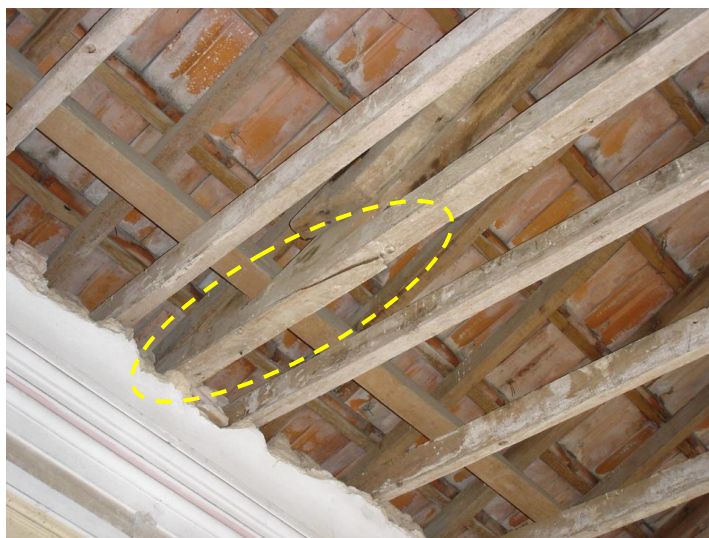


Figura 3.13 – Rotura de apoio de asna em parede [93]

Em referência às anomalias provocadas por outros factores, destacam-se as elevadas deformações da estrutura devido ao incorrecto dimensionamento dos elementos (inércia insuficiente), à colocação de madeira verde em obra ou aos efeitos naturais dos fenómenos de fluência, agravados pela acção dos agentes biológicos e atmosféricos. Todos estes factores levam ao surgimento de fendas, empenamentos e roturas dos elementos [3], figura 3.14.



Figura 3.14 – Fenda de secagem na linha duma asna de madeira [93]

3.3.3 Anomalias em escadas

As anomalias mais frequentes em escadas de madeira já foram referidas a propósito das anomalias de pavimentos, embora nas escadas o efeito das chuvas só tenha particular relevância quando a água se infiltre pelas paredes e a caixa de escadas esteja localizada junto à empena de edifícios, ou por debaixo de clarabóias.

Sendo um elemento que faz parte das zonas comuns dos edifícios, as escadas tornam-se particularmente vulneráveis ao seu desgaste correspondente ao seu uso intensivo (abrasão, transporte de cargas elevadas tais como móveis, entre outras). Estas acções de desgaste mecânico originam gradualmente deformações, que se vêm a agravar com o efeito da fluência dos materiais.

Nas escadas de pedra destacam-se as anomalias relativas ao surgimento de fendas e fracturas do seu material constituinte enquanto nas escadas com elementos de ferro a anomalia mais importante consiste na oxidação desses elementos [3].

3.4 Técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos e coberturas de edifícios antigos de alvenaria de pedra

3.4.1 Considerações gerais

As técnicas de reabilitação estrutural são, habitualmente, divididas em dois grandes grupos: as técnicas de reparação ou consolidação e as técnicas de reforço. A primeira tem como objectivo a reposição das capacidades resistentes dos diferentes elementos, enquanto as segundas pretendem diminuir ou limitar as deformações e aumentar a capacidade de carga dos mesmos.

É importante realçar que, para qualquer tipo de problema estrutural, existem sempre inúmeras técnicas de intervenção. A escolha da técnica mais adequada deverá ser feita tendo em conta diversos factores, tais como os objectivos da intervenção, os custos, o grau de degradação, o aproveitamento ou não do pavimento ou cobertura pré-existente e dos materiais tradicionais, o nível de intrusão, bem como as vantagens e desvantagens de cada uma das soluções a adoptar. Deste modo para que se faça uma avaliação das técnicas que possam integrar materiais pré-existentes é então necessário conhecer as inúmeras técnicas de reabilitação de pavimentos e coberturas em edifícios antigos de alvenaria de pedra.

Embora em algumas das técnicas de intervenção, seja feita a referência no texto de apenas um elemento construtivo (por exemplo o pavimento), existem determinadas técnicas que podem ser utilizadas para a resolução de anomalias estruturais tanto em pavimentos como em coberturas.

3.4.2 Técnicas de reabilitação

Referem-se no quadro 3.2 as técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos e coberturas de edifícios antigos de alvenaria de pedra que são abordadas no presente trabalho, bem como o respectivo elemento construtivo a que se destinam.

Quadro 3.2 – Técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos e coberturas de edifícios antigos

Técnicas de intervenção	Pavimentos	Coberturas
Fixação de novas peças de madeira às antigas	•	•
Substituição das partes degradadas por aplicação de empalmes	•	•
Fixação de elementos metálicos à madeira antiga	•	•
Introdução de elementos metálicos no interior da secção	•	•
Colocação de novas vigas de madeira ou perfis metálicos sob os pavimentos	•	
Colocação de novos elementos em pavimentos e estruturas da cobertura de madeira, utilizando o mesmo material	•	•
Introdução de varões metálicos ou de material compósito FRP selados com cola epoxídica	•	•
Introdução de chapas metálicas ou de material compósito FRP no interior da secção com cola epoxídica	•	•
Aplicação de folha ou tecido de material compósito FRP colado em elementos estruturais	•	•
Reconstrução da parte superior da secção do elemento estrutural com cola epoxídica	•	•
Colocação de escoras de suporte	•	
Reforço com tirantes metálicos – aplicação de pré-esforço pelo exterior	•	•
Reparação de fendas com elementos metálicos, compósitos FRP e/ou cola epoxídica	•	•
Fixação ou introdução de um novo elemento na parede para apoio do vigaamento ou de linhas de asnas de madeira	•	•
Reforço de linha de asna por aplicação de empalmes com cintas metálicas, cavilhas em aço inox e/ou cola epoxídica		•
Reforço de asnas com tirantes em aço		•
Consolidação de ligações em asnas		•

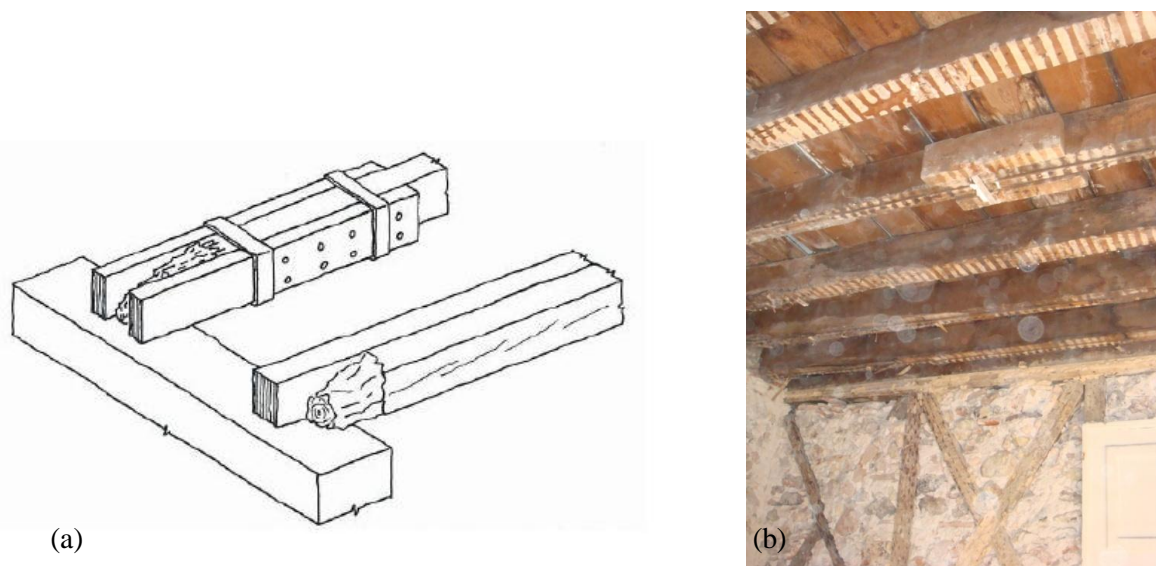
Em seguida descrevem-se as técnicas de reabilitação estrutural em pavimentos e coberturas de edifícios antigos de alvenaria de pedra com particular relevância na incorporação de resíduos de demolição. As descrições das restantes técnicas de reabilitação são apresentadas no Anexo II.

Fixação de novas peças de madeira às antigas

Esta técnica pode ser usada para reparar zonas de vigas em estado de degradação devido a ataques de agentes biológicos, fendas nas vigas de grandes dimensões ou deformações excessivas.

O reforço das vigas é feito através da sobreposição de novos elementos de madeira numa face da viga ou em ambas as faces da viga, sem a remoção das zonas deterioradas. As novas peças são unidas às existentes por meio de ligadores e elementos metálicos como sejam pregos, parafusos, parafusos de porcas, cavilhas, chapas ou cintas metálicas, restabelecendo a continuidade das peças da estrutura [22], figura 3.15. Para o dimensionamento destes ligadores é necessário ter em conta os afastamentos mínimos que os mesmos devem ter, bem como as características resistentes dos ligadores e dos elementos de madeira que se encontram estabelecidos no Eurocódigo 5 [26].

Para assegurar uma boa ligação estrutural entre as novas peças e as peças antigas é necessário garantir uma concepção estrutural adequada, definindo a distância de aplicação dos ligadores às extremidades da peça, o espaçamento entre ligadores e um comprimento mínimo de sobreposição entre as peças. Os novos elementos de madeira deverão ter a mesma altura da viga existente e a largura de cada peça; quando são aplicadas duas, deverá ser pelo menos metade da largura da viga existente [3, 18].



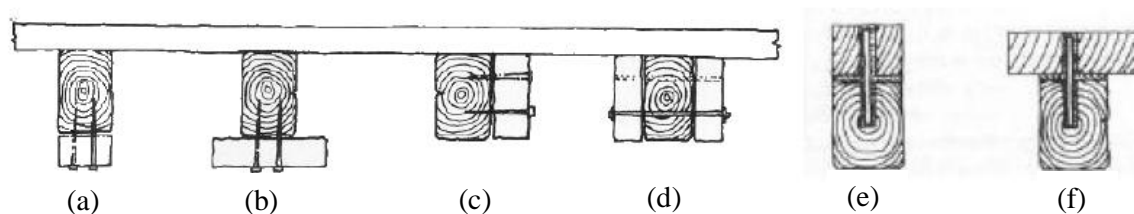
(a) – representação esquemática [4]; (b) – caso em Lisboa

Figura 3.15 – Reforço (localizado) por fixação de novas peças de madeira às antigas

Esta solução não necessita de um escoramento prévio dos pavimentos, uma vez que não implica operações de remoção de elementos deteriorados. No entanto esta solução apresenta uma taxa de deterioração muito elevada, pois os novos elementos ficam em contacto com a madeira deteriorada,

em particular quando é realizada com madeiras mal tratadas e de qualidade inferior [3]. É assim importante fazer a escolha certa do tipo de madeira que se usará no reforço, pois a madeira a ser utilizada deve possuir características semelhantes à madeira das vigas existentes.

Em casos em que as vigas de madeira dos pavimentos não apresentem uma capacidade resistente suficiente (secção insuficiente) para as cargas que sobre si actuam é habitual existirem problemas relacionados com deformações excessivas. Para a resolução deste tipo de problemas é possível adicionar novos elementos de madeira ligados com os originais por pregagem e aparafusamento. No entanto esta solução torna-se por vezes difícil de aplicar, em virtude das vigas de madeira existentes encontrarem-se com deformações permanentes consideráveis, ao passo que as novas peças de madeira a adicionar ainda não contêm tais deformações. Esta técnica é também utilizada para aumentar a inércia das vigas ou para resolver situações de perda de secção das vigas [4], figura 3.16.



(a) – colocação de nova peça de madeira (com largura igual à viga) na parte inferior da viga através de pregagem; (b) – colocação de nova peça de madeira (com largura superior à viga) na parte inferior da viga através de pregagem; (c) - colocação de nova peça de madeira num dos lados da viga através de pregagem; (d) – colocação de novas peças de madeira em ambos os lados da viga através do aparafusamento de parafusos de porcas e anilhas; (e) – colocação de nova peça de madeira (com largura inferior à viga) na parte superior da viga através da introdução de cavilhas e cola; (f) – colocação de nova peça de madeira (com largura superior à viga) na parte superior da viga através da introdução de cavilhas e cola

Figura 3.16 – Representação esquemática do reforço (no comprimento da viga) por aumento de secção com novas peças de madeira (em corte transversal) [4]

Substituição das partes degradadas por aplicação de empalmes

Quando os elementos estruturais dos pavimentos se encontram fissurados ou apodrecidos pelo ataque de fungos e insectos xilófagos, a remoção das zonas danificadas e a posterior substituição por peças idênticas do mesmo material passa por ser uma solução eficaz na resolução destes problemas.

Enquanto na técnica anteriormente referida não é necessário o prévio escoramento dos pavimentos, nesta é necessário o escoramento dos pavimentos na medida em que serão removidas fracções de madeira que, em geral, apoiam nas paredes e que por isso são fundamentais quanto ao funcionamento estrutural dos próprios pavimentos. Depois de efectuado o escoramento é feito o corte e a remoção das zonas danificadas do elemento, que são então substituídas por um novo segmento de madeira, ou seja por uma prótese de madeira nova.

Salienta-se o interesse de optar para os novos segmentos de madeira, sempre que possível, madeiras velhas, bem secas e de boa qualidade [3]. O ICOMOS¹² recomenda neste tipo de soluções que “os novos elementos estruturais, ou as novas partes, devem ser feitos com os mesmos tipos de madeira, com a mesma ou, se for apropriado, com ainda melhor qualidade do que os elementos que estão a ser substituídos” [37].

A ligação entre a viga existente e o novo elemento pode ser feita através de peças de madeira, figura 3.17, ou de elementos metálicos auxiliares que são fixados mecanicamente com parafusos ou parafusos de porcas em cada uma das faces das vigas, sendo recomendável a colocação de peças de madeira ou chapas metálicas com um comprimento que assegure uma sobreposição mínima de 0,20m em relação ao eixo da secção a ligar, e com altura e espessura compatíveis com a resistência que se pretende assegurar, sendo que a possibilidade de existirem momentos flectores na secção implica que os novos elementos tenham a altura das vigas de madeira a reforçar [3, 22].

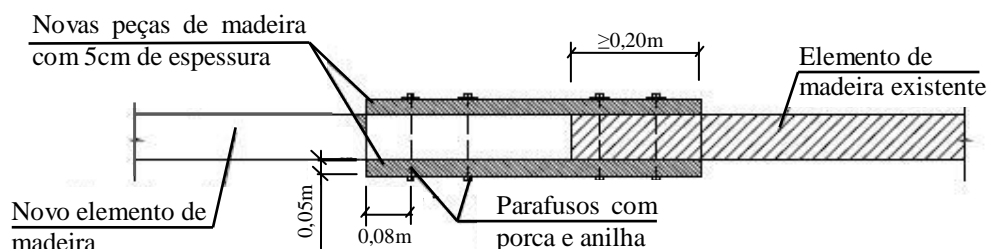
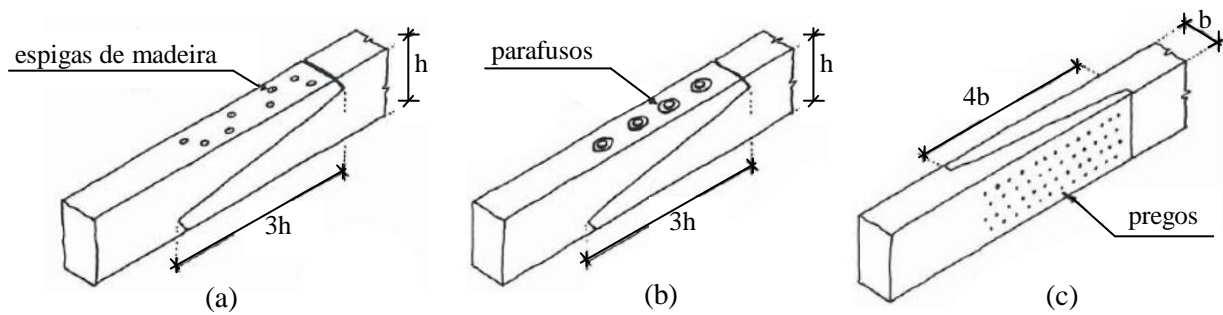


Figura 3.17 – Representação esquemática dum exemplo de introdução de novos elementos a substituir elementos degradados (vista em planta) [22]

A ligação pode ainda ser feita mediante técnicas tradicionais que ligam os elementos por meio de pregos, parafusos ou espigas de madeira. Mettem em 1993 [47] desenvolveu estudos em três tipos de ligações: empalme com corte oblíquo na face lateral e espigas de madeira; empalme com corte oblíquo na face lateral e parafusos; e empalme com corte oblíquo na face superior e pregos, figura 3.18. No entanto as ligações mecânicas destes métodos não apresentaram bons resultados face a esforços de flexão elevados; devem por isso ser implementadas em zonas junto a apoios como é o caso das junções dos pavimentos com as paredes, onde os esforços de flexão não são tão elevados comparativamente a meio vão.

¹² O ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) é uma organização não-governamental internacional de profissionais, dedicados à conservação dos monumentos históricos do mundo.



(a) – empalme com corte oblíquo na face lateral e espigas de madeira; (b) – empalme com corte oblíquo na face lateral e parafusos; (c) - empalme com corte oblíquo na face superior e pregos

Figura 3.18 – Representação esquemática de empalmes em elementos de madeira com diferentes tipos de ligadores [4]

Os resultados dos ensaios puderam demonstrar que a solução mais eficaz face ao esforço de flexão e à rigidez foi a do empalme com corte oblíquo na face superior e pregos metálicos, enquanto a menos eficaz foi a do empalme com corte oblíquo na face lateral e espigas de madeira.

Os ligadores em aço são preferíveis aos ligadores em madeira do ponto de vista mecânico, uma vez que permitem criar ligações capazes de suportar altas tensões, assegurando uma transmissão eficiente de forças e um modo de ruptura dúctil. No entanto os ligadores em madeira, como as espigas de madeira, conseguem ser mais eficazes quando sujeitos a altas temperaturas, demorando mais tempo a perder as suas propriedades mecânicas [25].

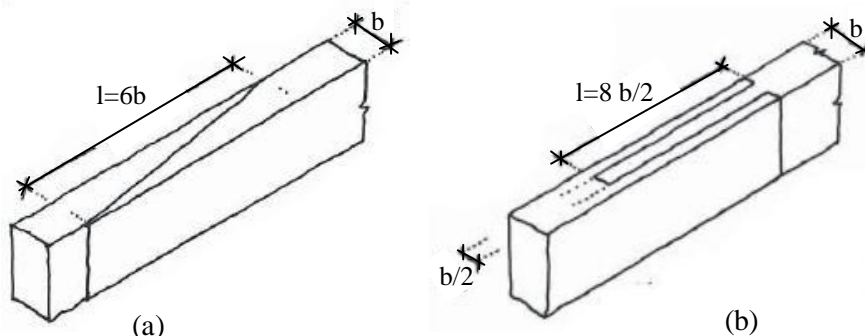
Na figura 3.19 observa-se um exemplo de empalmes em estruturas de madeira (cobertura) utilizando ligadores metálicos e em madeira.



(a) – empalme com ligador em madeira; (b) – empalme com ligador metálico

Figura 3.19 – Aplicação de empalmes em estruturas de madeira utilizando ligadores metálicos e ligadores em madeira [58]

Outros materiais como a cola podem ser usados na ligação deste tipo de intervenção. Landa em 1997 e 1999 [39, 40] desenvolveu estudos sobre ligações com este material. Estes estudos puderam constatar que as soluções mais eficazes, quanto ao esforço de flexão e rigidez, são as coladas. A solução mais eficaz consistia no uso de um empalme colado com corte oblíquo na face superior, figura 3.20 (a), e a solução menos eficaz decorria duma união por empalme colado com caixa e espiga recta, figura 3.20 (b).



(a) – empalme colado com corte oblíquo na face superior; (b) – empalme colado com caixa e espiga recta

Figura 3.20 – Representação esquemática de empalmes colados em elementos de madeira [4]

Outras empalmes mais complexos podem também ser usados, como é o caso de empalmes denteados unidos por cintas metálicas e cavilhas em aço inox, figura 3.21.

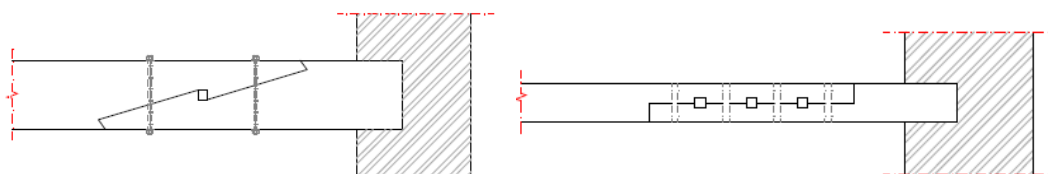


Figura 3.21 – Representação esquemática do reforço numa linha de asna com parafusos de porcas e cintas metálicas em aço inox [58]

Introdução de elementos metálicos no interior da secção

Esta solução consiste na remoção das zonas degradadas da viga e a realização dum corte na parte sã da viga de modo a introduzir um elemento metálico de reforço (como é o caso de chapas de aço) no interior da cabeça da viga e na direcção do vigamento, figura 3.22.

Na zona de apoio da viga junto às paredes, a chapa de aço a introduzir deve ter um banzo inferior de modo a distribuir uniformemente as cargas, não causando esforços de corte. Do lado contrário a chapa deve ter um banzo superior para que seja feito um melhor travamento.

Após a introdução da chapa de reforço no interior da viga, é necessário colocar lateralmente às chapas, dois elementos de madeira de forma a protegerem o elemento metálico das acções exteriores, nomeadamente da protecção ao fogo, criando deste modo uma prótese à viga de madeira. Esta solução

adquire um acréscimo de capacidade resistente, sendo no entanto necessário garantir um comprimento mínimo de ancoragem na parte sã da viga [13, 30].

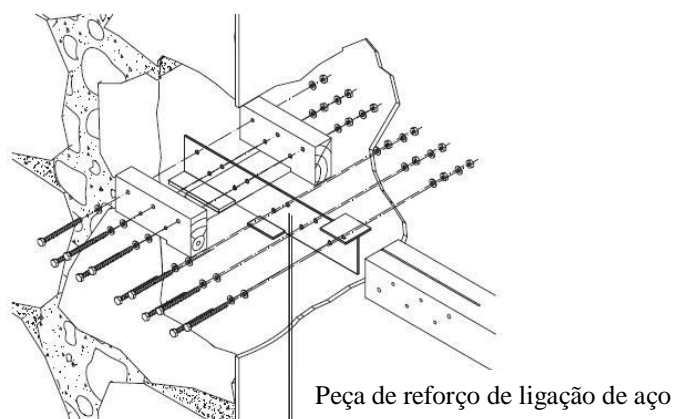
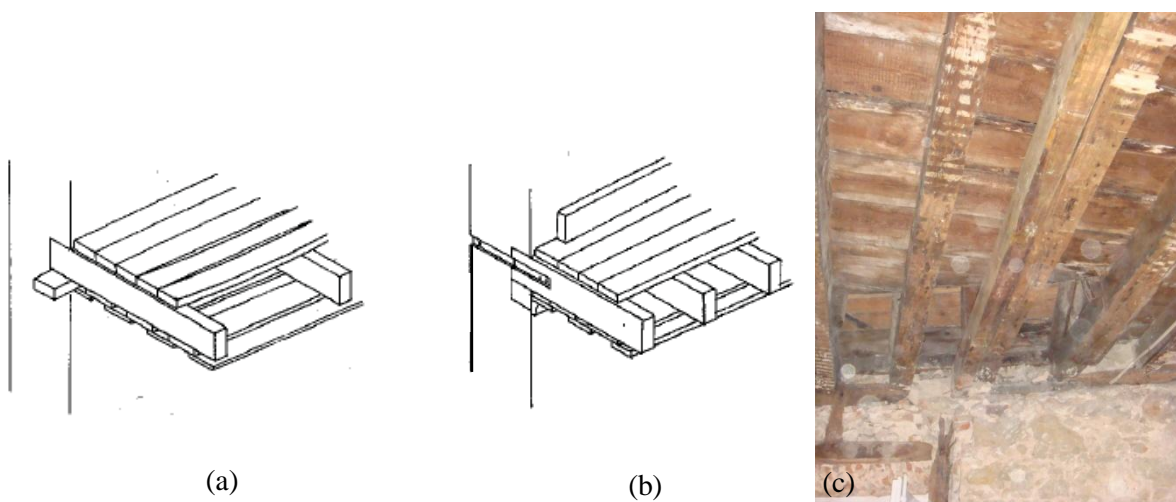


Figura 3.22 – Representação esquemática do reforço metálico embebido na madeira [13]

Colocação de novas vigas de madeira ou perfis metálicos sob os pavimentos

Uma das técnicas existentes para limitar deformações excessivas dos pavimentos, e por consequência das vigas, passa pela colocação de novas vigas (de madeira ou metálicas) intercaladas e paralelamente às vigas já existentes, ou pela colocação de uma viga transversal ao viga do pavimento. O objectivo desta técnica é diminuir o nível de esforços a que as vigas estão submetidas, aumentar a rigidez das vigas, diminuindo consequentemente a deformabilidade destas e o nível de vibrações.

A primeira solução consiste na colocação de vigas adicionais de reforço, paralelamente às vigas originais e intercaladas com estas, figura 3.23.



(a) – representação esquemática de pavimento antes da introdução de novas vigas [61]; (b) – representação esquemática da adição de novas vigas paralelas às vigas dos pavimentos com ancoragem à parede de alvenaria [61]; (c) – caso em Lisboa

Figura 3.23 – Colocação de vigas paralelas às existentes

O processo de execução pressupõe [61]:

- o escoramento do pavimento e a remoção do revestimento do mesmo;
- uma abertura na parede resistente com posição e dimensão adequada, sendo que a zona de entrega da viga não deve ser inferior a 0.20m, de modo a servir de encaixe às novas vigas;
- a colocação das novas vigas e a sua posterior ligação às paredes resistentes através da criação de apoios adequados às mesmas, como por exemplo um bloco de pedra aparelhada ou mediante a ancoragem da viga de madeira à parede de alvenaria;
- a reposição do revestimento do pavimento.

É ainda importante fazer uma escolha adequada do material a colocar e da geometria das vigas a adoptar (devem ter a altura das vigas existentes), de modo a que as novas vigas tenham o máximo de semelhanças possíveis com as características das existentes e portanto um melhor controlo da deformação do pavimento. É também de interesse garantir a compatibilidade de deformações através de tarugamentos que podem ser complementados com peças metálicas de reforço que confirmam rigidez e resistência às ligações [3].

Na segunda solução, colocação duma viga transversal e inferior às vigas existentes, a deformabilidade dos pavimentos é reduzida em cerca de 8 vezes menos, ainda que se tenha de adicionar o efeito da nova viga de apoio, figura 3.24. Contudo, por vezes é necessário proceder-se ao reforço dos elementos de apoio da viga a ser colocada, pois a nova viga irá suportar uma grande parte da carga proveniente do pavimento e portanto irá sobrecarregar pontualmente as paredes resistentes. A outra desvantagem desta solução é o facto da nova viga a ser colocada aumentar significativamente a espessura do pavimento e conseqüentemente reduzir o pé direito livre, levando a que em algumas situações esta solução não seja viável do ponto de vista funcional [3].



Figura 3.24 – Colocação de viga transversal ao vigamento do pavimento [11]

Podem-se também colocar perfis metálicos (em vez de vigas de madeira) transversalmente aos vãos dos pavimentos, figura 3.25. As vigas de madeira existentes do pavimento são apoiadas em perfis metálicos que são colocados transversalmente ao vigamento ou sobre novos perfis paralelos às vigas, e que por sua vez são apoiados nas paredes resistentes [4].



Figura 3.25 – Reforço por colocação de dois níveis de perfis metálicos sob as vigas [11]

Colocação de novos elementos em pavimentos e estruturas da cobertura de madeira, utilizando o mesmo material

Nas situações em que seja necessário remover o pavimento degradado ou parte deste, bem como as estruturas de cobertura deterioradas, é recomendável a reconstituição da estrutura global ou duma secção de um pavimento (ou cobertura) usando o mesmo material com ou sem elementos de ligação. Esta solução aumenta a capacidade de suporte dos pavimentos estruturais e da cobertura de madeira [13]. Os pisos de madeira são reforçados, utilizando o mesmo material ou materiais afins, como, por exemplo, um novo soalho sobre o existente ou a reposição de novas vigas e tarugos de madeira num pavimento. Nas coberturas as estruturas podem ser reforçadas com novos barrotes [13]. Pode ser ainda feita a colocação de novos elementos de madeira em estruturas mais específicas como por exemplo em Cruzes de Santo André.

O material das novas estruturas a reforçar deve ser o mesmo que constitui o pavimento ou cobertura existentes. Sempre que se proceda à substituição de vigas em pavimentos, figura 3.26, o procedimento deverá ser o seguinte [35]:

- remoção do soalho e escoramento de vigas adjacentes à zona de substituição;
- remoção da viga ou vigas degradadas e tratamento das outras contra agentes bióticos;
- abertura de possíveis cavidades nas paredes de alvenaria, de forma a permitir o apoio dos novos elementos, devidamente protegidos contra humidades;
- instalar a nova viga, assegurando as devidas condições de nivelamento, rigidez e distribuição de carga pelo elemento;
- preenchimento de aberturas nas alvenarias com argamassas (sempre garantindo uma devida ventilação), e aplicação do soalho.



Figura 3.26 – Substituição de vigas num pavimento de madeira [92]

Introdução de varões metálicos ou de material compósito FRP selados com cola epoxídica

O uso de colas epoxídicas é relativamente recente na reabilitação de edifícios (2 a 3 décadas). Estas técnicas consistem basicamente em embeber materiais de reforço (varões ou chapas) em colas epoxídicas e servem para aumentar a solidarização entre os novos elementos (prótese) e os elementos existentes. As colas epoxídicas são obtidas através da mistura de resina base (resina epoxídica) e endurecedor, e são utilizadas na injeção de fendas, na colagem de peças ou no preenchimento de furos ou entalhes para fixação de elementos de reforço (varões ou chapas), normalmente metálicos ou constituídos por compósitos de FRP (a descrição da constituição destes compósitos encontra-se no Anexo I, a propósito do reforço de paredes com compósitos FRP). Por sua vez as caldas epoxídicas, que além de conterem a resina base e o endurecedor contêm também cargas¹³ e utilizam-se normalmente no reforço e na reconstituição da madeira, podendo também ser aplicadas na fixação de elementos de reforço metálicos ou compósitos de FRP. A calda deve ser um material penetrante, adequado para o preenchimento de áreas inacessíveis, possuindo características de eliminação do ar aprisionado. A cola deve ser tixotrópica¹⁴ e ter baixa tensão superficial, de forma a ser possível obter um bom espalhamento [53]. Na utilização das colas epoxídicas é importante ter em conta que a temperatura de serviço a que as estruturas de madeira estão expostas, pode influenciar consideravelmente as características do material, mesmo quando protegido no interior dos elementos.

¹³ As cargas são aditivos que, quando adicionados às resinas epoxídicas, originam “argamassas epoxídicas”. Tratam-se de materiais inorgânicos, naturais ou artificiais, especialmente seleccionados e que podem melhorar as propriedades das “argamassas”: além de reduzirem o custo do produto, contribuem para a diminuição da retracção e do coeficiente de dilatação linear, o aumento da viscosidade, da duração da aplicação, das resistências mecânicas (salvo ao choque), da aderência quando o suporte está húmido e da resistência ao calor. Exemplos: pó à base de sílica, pó à base de carbonato de cálcio, entre outros [54, 75].

¹⁴ Substância tixotrópica: trata-se dum fluído que em repouso é muito viscoso mas que com o tempo e com a aplicação de movimentos e de forças laterais torna-se mais fluído [62].

Helena Cruz *et al.* [16] realizou ensaios de tracção de colas epoxídicas e ensaios de corte de juntas, concluindo que a exposição destes materiais a temperaturas elevadas tem reflexos no desempenho da ligação colada. Concluiu também que a concepção dos reforços de estruturas de madeira deve ter em consideração o efeito da temperatura de serviço, sendo recomendável a adopção de disposições construtivas que impeçam o excessivo aquecimento dos elementos estruturais.

Outro factor a ter em conta é o tempo de cura das resinas, que varia consoante a temperatura. Deve ser consultada a indicação dada por cada fabricante relativamente ao tempo de cura de cada produto.

Dentro das várias soluções que utilizam colas epoxídicas, o reforço com barras é a solução mais representativa. É utilizada em zonas afectadas por podridão ou pelo ataque de insectos. Consiste na remoção do apoio ou duma parte degradada da viga e substituição dessa mesma zona por uma “argamassa epoxídica”¹⁵ ou por um novo elemento de madeira (prótese de madeira), que se ligam à madeira sã através de varões de reforço de aço inox ou de compósitos FRP [4, 53].

Na situação em que o troço de madeira degradado é substituído por “argamassa epoxídica”, a prótese é formada por uma zona central de “argamassa epoxídica” ligada por varões e envolvida por uma cofragem perdida de madeira. Por outro lado, quando o troço de madeira degradado é substituído por uma prótese de madeira, a ligação pode ser feita através de varões metálicos (ou de materiais compósitos) e a colagem é feita com uma cola epoxídica [22].

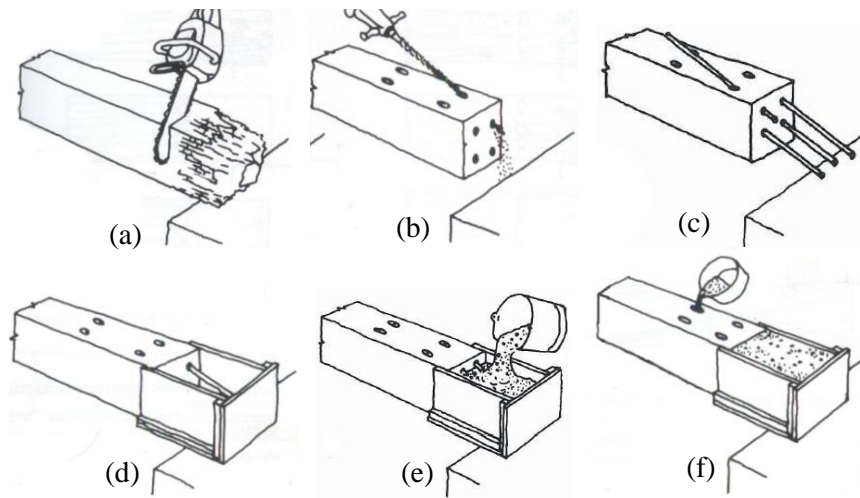
A escolha das colas deve ser feita numa lógica de compatibilidade mecânica, privilegiando-se as que assegurem um material com resistência e módulo de deformabilidade semelhantes aos da madeira (10MPa para a resistência à flexão, 10GPa para o módulo de elasticidade), tornando-se apenas necessário dimensionar os ligadores de aço ou de material compósito, devendo estes garantir uma capacidade resistente pelo menos igual a 50% das necessidades totais [3].

O processo construtivo desta técnica (com recurso a “argamassa epoxídica”) num apoio de viga degradado, pode ser descrito segundo os seguintes passos [4]:

- escoramento da viga ou outro elemento a intervir;
- remoção das zonas degradadas;
- realização de furos e entalhes na parte sã da madeira;
- limpeza dos furos com jacto de ar ou aspirador;
- preenchimento dos furos com cola epoxídica;
- introdução dos varões acompanhados de um movimento de rotação (de modo a evitar bolhas de ar);
- caso a opção seja a substituição do elemento por “argamassa epoxídica”, deverão ser colocadas as cofragens de madeira;
- aplicação da “argamassa epoxídica” (com módulo de elasticidade semelhante ao da madeira) na cofragem;
- preenchimento dos furos com cola epoxídica (mais fluida, normalmente sem cargas);
- remoção do escoramento após polimerização dos materiais epoxídicos.

¹⁵ “Argamassa epoxídica” é equivalente à calda epoxídica quanto à sua constituição e quanto à sua função.

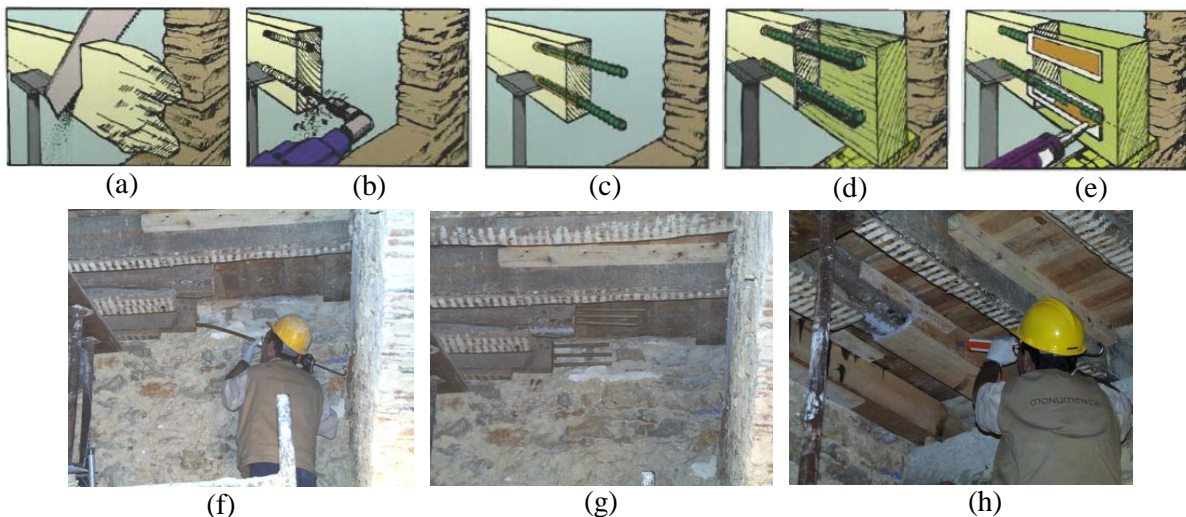
Neste modelo, é admitido que a madeira e a “argamassa epoxídica” resistem aos esforços de compressão, enquanto os varões absorvem os esforços de tracção, figura 3.27.



(a) – corte da zona degradada da viga; (b) - execução de furos; (c) – introdução dos varões; (d) – execução de cofragem e preenchimento dos furos com cola epoxídica; (e) – aplicação de “argamassa epoxídica” na cofragem; (f) – aplicação de cola epoxídica nos furos

Figura 3.27 – Representação esquemática da execução de corte da zona degradada e realização de prótese com “argamassa epoxídica” [4]

A situação que diz respeito à mesma técnica mas com uma prótese do mesmo tipo de madeira em vez da “argamassa epoxídica”, constitui uma solução que permite um menor impacto visual da intervenção, figura 3.28.



Representação esquemática: (a) – do corte da zona degradada da viga [66]; (b) – da execução de furos [66]; (c) – do preenchimento dos furos com cola epoxídica e introdução dos varões [66]; (d) – da aplicação da prótese de madeira [66]; (e) – da selagem dos furos com cola epoxídica [66]; (f) – injeção da cola epoxídica: caso em Torres Vedras [92]; (g) – varões fixados nas vigas: caso em Torres Vedras [92]; (h) – injeção de calda epoxídica: caso em Torres Vedras [92]

Figura 3.28 – Execução de corte da zona degradada e realização de prótese de madeira

Quando a parte da estrutura degradada, por fungos e insectos xilófagos ou por fendas de secagem, encontra-se localizada ao longo do comprimento dos elementos estruturais (meio-vão), a implementação desta técnica também se apresenta como um método particularmente adequado na recuperação da resistência mecânica.

O procedimento habitualmente adoptado neste método é semelhante ao utilizado nos apoios. Ainda assim refere-se que na realização de furos nas partes sãs da madeira para o alojamento dos varões de reforço deve-se ter em conta que o seu comprimento deverá ser suficiente para proporcionar a amarração eficaz dos varões e deve-se fazer uma adequada escolha do tipo de varões a utilizar.

Existem três formas de aplicação dos varões: alinhados com o fio da madeira, figura 3.29, longitudinalmente na parte inferior da peça, ou inclinados, figura 3.30. No caso de se querer reforçar uma zona com rotura, a furação deve ser horizontal; por sua vez se o objectivo de resolução for o tratamento de fendas de secagem, a furação deve ser efectuada desde a face superior (com ângulo entre 20° e 30°) intersectando transversalmente a fenda e uma zona sã da madeira [4].

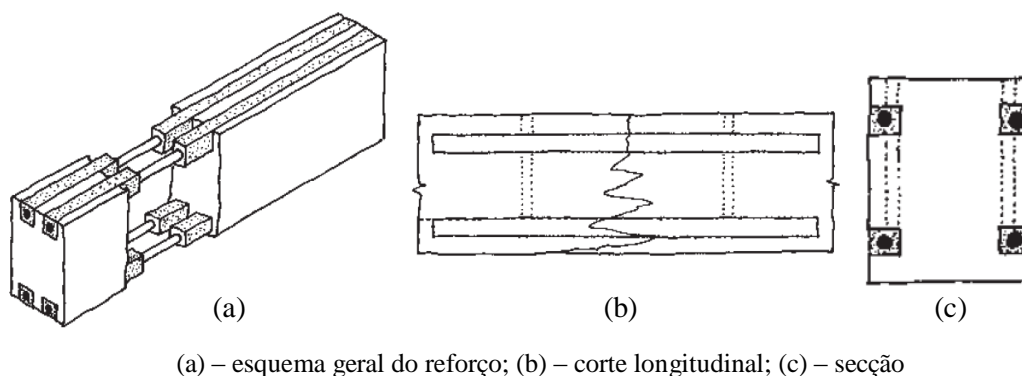


Figura 3.29 – Representação esquemática do reforço com barras horizontais [4]

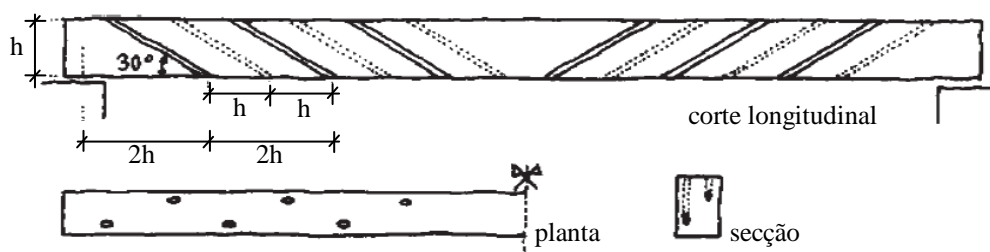


Figura 3.30 – Representação esquemática do reforço com barras inclinadas [4]

Para além destas técnicas atrás descritas, é por vezes utilizado um sistema de treliça interna no elemento de madeira, figura 3.31. Esta técnica permite uma redução eficaz da propagação das fendas, absorção de esforços de corte e reforço das zonas de compressão e de tracção. A metodologia de aplicação da técnica consiste na injeção de cola epoxídica, seguida da introdução duma armadura interior com varões de reforço (de FRP ou aço) [4]. Posteriormente injecta-se a cola mais fluida para

que possíveis vazios existentes possam ser colmatados. Trata-se duma solução com elevada intrusão e de difícil execução, por isso só deve ser utilizada em última instância.

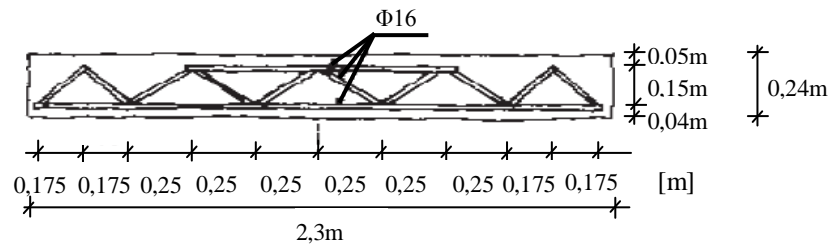


Figura 3.31 – Representação esquemática do reforço através duma treliça com barras de compósito FRP (corte longitudinal) [4]

Estudos efectuados permitem dizer, com alguma certeza, que este método permite ganhos consideráveis em termos de aumento de tensão de rotura e de diminuição de deformação.

Foram também efectuados estudos desenvolvidos por Mettem em 1993 [47] que consistem na realização de empalmes entre duas peças de madeira com barras de aço fixadas com cola epoxídica, que preenche toda a junta, figura 3.32. Os resultados obtidos nestes estudos puderam elucidar que esta solução não origina uma elevada eficácia quanto à resistência à flexão, sendo então aconselhável o seu uso em zonas ou apoios cujos momentos sejam mais baixos [4].

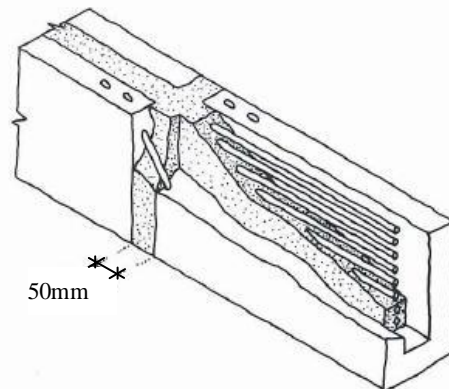


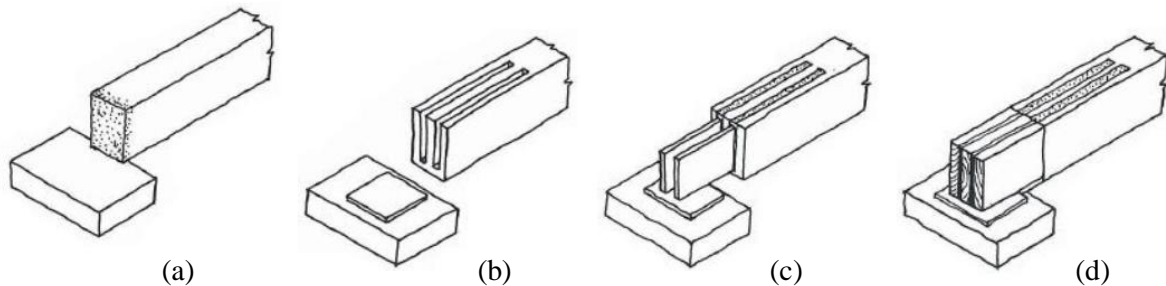
Figura 3.32 – Representação esquemática duma solução de empalme de peças de madeira com barras de aço e cola epoxídica [4]

Introdução de chapas metálicas ou de material compósito FRP no interior da secção com cola epoxídica

Esta técnica consiste no reforço dos elementos de madeira através da introdução de placas metálicas ou de compósitos FRP no interior destes elementos, sendo as placas (ou chapas) embebidas numa cola epoxídica para a consolidação duma zona de apoio (das vigas) ou noutras zonas do elemento a recuperar figura 3.33. Confere rigidez à ligação e permite aumentar a capacidade resistente das ligações, impedindo que o elemento degradado não se deforme mais do que o esperado.

A execução desta técnica consiste na aplicação dos seguintes passos [4]:

- escoramento dos elementos a intervir;
- eliminação das partes degradadas através do corte pela madeira sã;
- execução de aberturas nos elementos para a introdução das placas, com o cuidado de assegurar uma profundidade adequada e evitar eventuais desvios nas aberturas;
- colocação duma chapa de apoio sobre a parede para que a carga concentrada das placas não provoque o seu corte ou esmagamento local. Introdução das placas de reforço de aço ou materiais compósitos FRP. A abertura deverá ter uma folga suficiente (cerca de 4mm de cada lado) para que a cola epoxídica preencha os vazios com facilidade, e o comprimento de ancoragem da placa na zona sã do elemento a reforçar deve determinar-se por cálculo e ter entre 2 a 2,5 vezes a sua altura;
- colocação de peças de madeira a cobrirem as placas de modo a protegerem as mesmas da acção do fogo.



(a) – corte da cabeça da viga; (b) - execução das aberturas e colocação duma chapa de apoio às placas de reforço; (c) – colocação das placas de reforço e da cola epoxídica; (d) – colocação de peças de madeira a recobrir as placas

Figura 3.33 – Representação esquemática do reforço (em zona de apoio) com chapas de aço ou materiais compósitos FRP no interior da secção e com cola epoxídica [4]

Esta técnica também pode ser eficaz quando aplicada ao longo do comprimento do elemento a reforçar. Os procedimentos a executar nesta técnica são em tudo semelhantes ao do reforço em zona de apoio, sendo os principais passos os seguintes [4]:

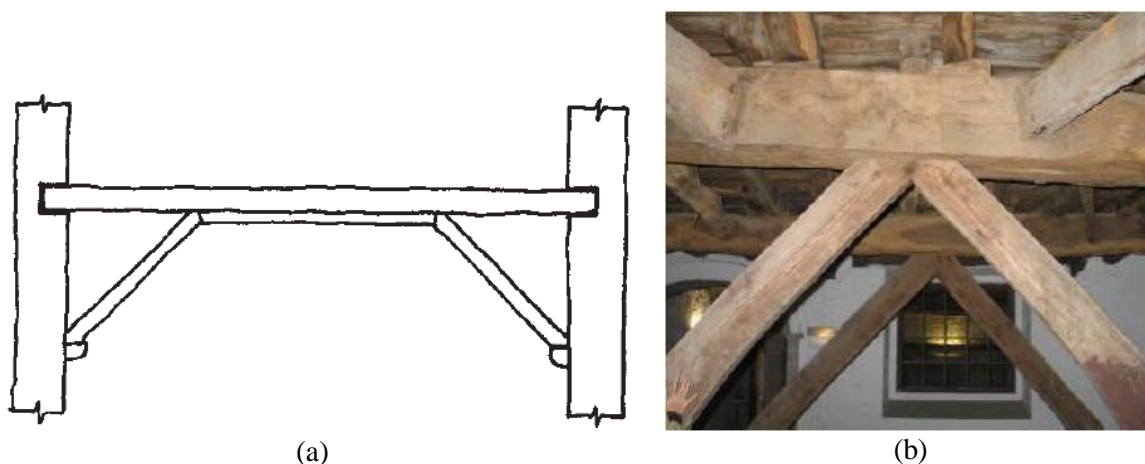
- escoramento dos elementos a intervir;
- execução de aberturas nos elementos para a introdução das placas, com o cuidado de assegurar uma profundidade adequada e evitar eventuais desvios nas aberturas;
- injeção da cola epoxídica até atingir um terço da profundidade das caixas de abertura;
- introdução das placas de reforço de aço ou materiais compósitos FRP impregnadas com cola epoxídica, fazendo com que a cola flua pelas folgas.

Colocação de escoras de suporte

A colocação de escoras de suporte permite a diminuição do vão das vigas criando pontos de apoio intermédios e tem como objectivo a redução dos esforços actuantes nos elementos estruturais, figura 3.34. Esta solução consiste na introdução de escoras de madeira inclinadas, encastradas nas paredes ou apoiadas num frechal. Quando aplicadas em pavimentos de pisos térreos, as escoras de madeira podem ser apoiadas no terreno e a meio-vão das vigas, devendo as escoras serem protegidas da humidade. As escoras deverão ser dimensionadas para resistir aos esforços de compressão.

A ligação das escoras de suporte aos elementos estruturais é efectuada através de nós realizados por samblagem ou através de pontes de equilíbrio que fazem a transmissão das cargas horizontais, ao mesmo tempo que impedem a deformação do elemento estrutural.

Os novos elementos a adicionar deverão ter as mesmas características da madeira dos elementos existentes, bem como se encontrarem devidamente tratados e secos na altura da colocação das escoras. As grandes desvantagens desta solução são a alteração dos esforços na estrutura, devendo o cálculo de todos os esforços ser revisto, e o facto de as paredes serem obrigadas a resistir a cargas horizontais, o que pode dar azo a graves danos estruturais [4, 11, 22]. Outra desvantagem é o espaço interior ficar reduzido.



(a) – representação esquemática (alçado) [4]; (b) – caso em Felgueiras (Mosteiro de Pombeiro) [22]

Figura 3.34 – Escoras de madeira a suportar as vigas dum pavimento

Fixação ou introdução de um novo elemento na parede para apoio do vigeamento ou de linhas de asnas de madeira

As zonas de apoio de vigeamentos ou de outras estruturas de madeira, como linhas de asnas de madeira junto a paredes resistentes, são zonas que desempenham uma importante função no comportamento da estrutura, visto que são os apoios que fazem a ponte entre os esforços vindos da estrutura de madeira e as paredes resistentes nas quais estas estruturas de madeira descarregam esses esforços. Sempre que os apoios se encontrem danificados ou fragilizados é necessário proceder a uma intervenção estrutural. É

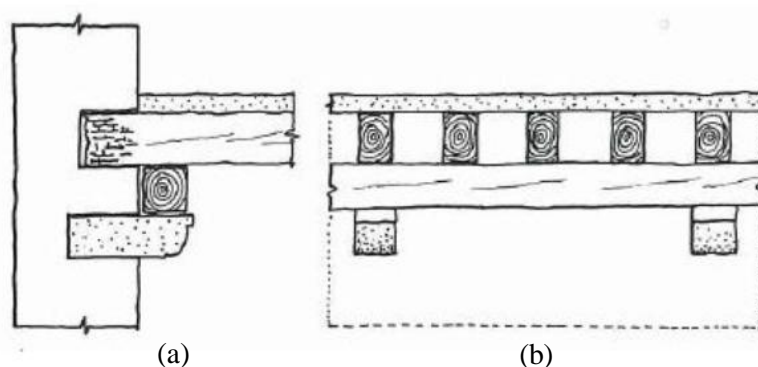
ainda importante referir que as zonas junto aos apoios são propícias à acumulação de humidade e aos respectivos ataques de agentes biológicos. Destacam-se as seguintes soluções:

- ***Introdução de frechal de madeira assente em cachorro de pedra***

É uma solução pouco utilizada em reabilitação, sendo no entanto mais utilizada na reabilitação de coberturas do que de pavimentos. Nos edifícios antigos era muito utilizado no processo construtivo.

O processo consiste na instalação de um frechal de madeira sobre cachorros de pedra de cantaria previamente introduzidos na parede, figura 3.35.

Tem como principal vantagem a recuperação da capacidade resistente da viga, uma vez que a área degradada não é estruturalmente solicitada. No entanto é uma solução muito intrusiva, pois existe a necessidade de fazer aberturas nas paredes e solidarizar o cachorro às mesmas, não sendo aconselhável quando estas tiverem pouca espessura ou apresentarem resistência reduzida. Além da elevada intrusividade, esta solução provoca esforços de flexão nas paredes de suporte, pois introduz nestas, cargas com excentricidade [22, 30].



(a) – corte transversal em apoio; (b) – corte transversal em viga

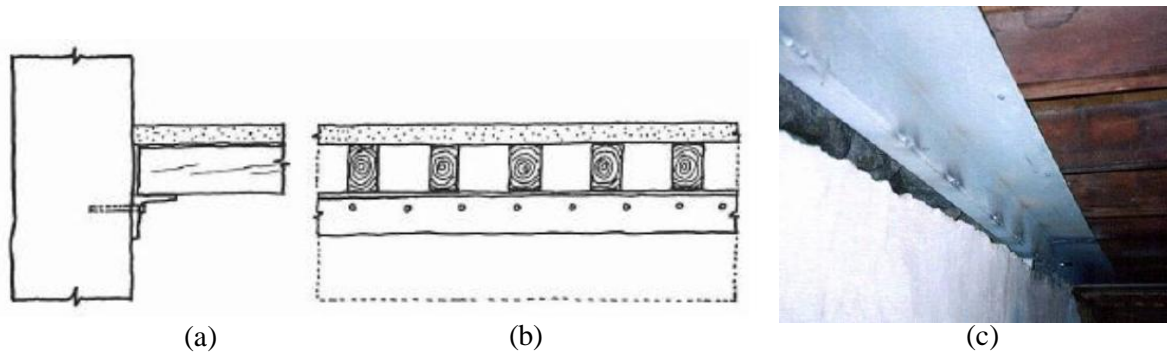
Figura 3.35 – Representação esquemática de frechal de madeira apoiado em cachorro de pedra [4]

- ***Cantoneira metálica fixada à parede***

Esta solução consiste na fixação de uma cantoneira metálica ao longo da parede por intermédio de parafusos, servindo como reforço dos apoios dos pavimentos ou cobertura, figura 3.36.

É uma solução menos intrusiva que a anterior, é de rápida e fácil execução, aumenta a capacidade de carga das ligações, e distribui os esforços por uma superfície maior, embora exista na mesma uma excentricidade de carga.

A ligação entre a cantoneira e a viga tem de ser bem realizada, de modo a garantir uma eficiente transmissão de esforços, não causando danos na parede. Para esse efeito é necessário regularizar a parede onde é encostada a cantoneira e fazer o correcto dimensionamento, bem como do sistema de fixação dos parafusos [22, 30].



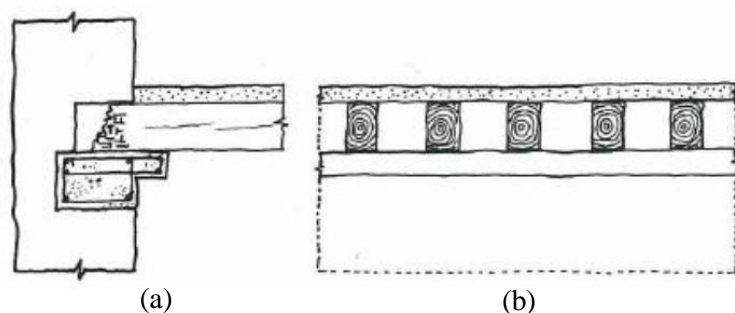
(a) – corte transversal em apoio [4]; (b) – corte transversal em viga [4]; (c) – caso em Ponte da Barca (Igreja de Ponte da Barca) [22]

Figura 3.36 – Representação esquemática de cantoneira metálica fixada à parede

- **Frechal de betão armado executado no interior da parede**

Esta é uma solução que não é recomendável na reabilitação de edifícios antigos de alvenaria de pedra, pois obriga a uma intervenção altamente intrusiva e que pode resultar na incompatibilidade entre materiais, uma vez que a utilização de betão faz com que o comportamento da solução seja muito diferente do da parede de alvenaria de pedra. No entanto é uma opção a ter em conta para apoio duma estrutura nas paredes resistentes.

O procedimento resume-se na realização de uma viga de betão armado (frechal de betão armado) embutido na parede resistente para apoio directo do viga, figura 3.37. É uma solução de difícil execução, já que se torna complicado betonar o elemento correctamente, sem que seja retirado o viga e que este tenha uma boa superfície de apoio. Além de que a própria configuração da viga de betão poderá transmitir cargas excêntricas em relação ao eixo das paredes e consequentemente provocar danos graves às mesmas [22].



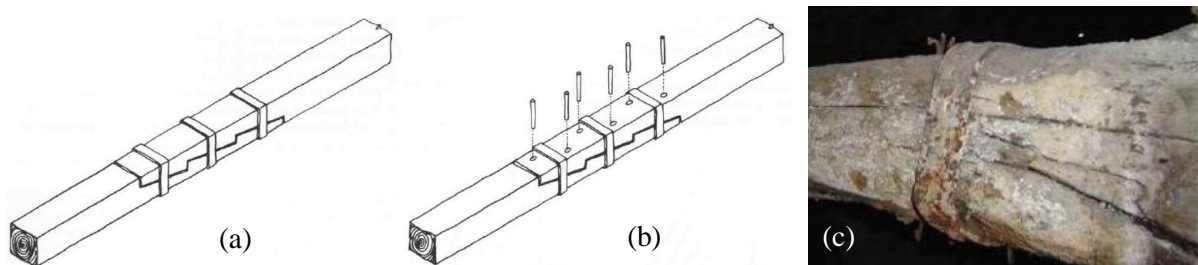
(a) – corte transversal em apoio; (b) – corte transversal em viga

Figura 3.37 – Representação esquemática de frechal de betão armado para apoio de viga [4]

Reforço de linha de asna por aplicação de empalmes com cintas metálicas, cavilhas em aço inox e/ou cola epoxídica

Esta técnica é semelhante à solução que utiliza empalmes por substituição das partes degradadas e visa a resolução das mesmas anomalias; ainda assim tem a particularidade de ser uma solução mais específica a elementos estruturais de coberturas.

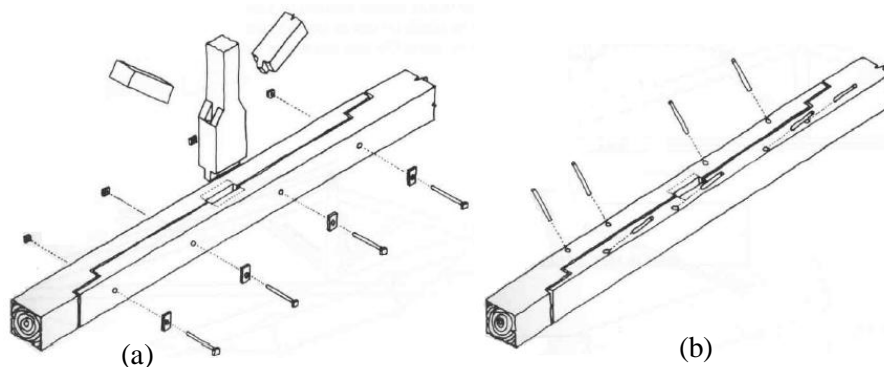
A linha de asna (figura 3.4) pode ser reforçada com empalme denteado de nova peça de madeira ligada à existente com cintas metálicas e cavilhas de aço inox embebidos em cola epoxídica, figura 3.38. As cavilhas introduzidas baseiam-se em ligações que trabalham como elementos de fixação do tipo mecânico submetidos a esforço de corte e que têm um incremento de resistência em cerca de 20% por se tratar duma ligação colada [4].



(a) – linha de asna reforçada através de empalme colado com cintas metálicas [4]; (b) – linha de asna reforçada através de empalme colado com cintas metálicas e cavilhas em aço inox [4]; (c) – caso no Porto (Palácio de Belmonte) [22]

Figura 3.38 – Representação esquemática do reforço através de empalme colado com cintas metálicas e cavilhas de aço inox numa linha de asna

Quando a linha de uma asna se encontra reforçada mediante um empalme ligado exclusivamente por parafusos de porcas e que sofreu danos devido a sobrecargas nos elementos de fixação, é recomendável reforçar-se a peça através da introdução de cavilhas de aço inox em orifícios inclinados com cola epoxídica [4], figura 3.39.



(a) – linha de asna reforçada através de empalme longitudinal e com ligação exclusiva de parafusos de porcas;
(b) – linha de asna reforçada com empalme longitudinal e cavilhas de aço inox coladas em orifícios inclinados

Figura 3.39 – Representação esquemática do reforço duma linha de asna através de empalme com parafusos e cavilhas de aço em orifícios inclinados [4]

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO NA REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

4.1 Introdução

Para além da investigação bibliográfica e do enquadramento do tema em resultado dessa investigação, é também objectivo deste trabalho analisar quais as técnicas de intervenção estrutural que podem fazer a incorporação de resíduos de demolição e conseqüentemente a sua reutilização.

Neste capítulo a referência a materiais antigos reutilizados de estruturas já existentes está directamente relacionada com os resíduos de demolição provenientes de estruturas constituintes de edifícios antigos. São apresentadas neste capítulo, as técnicas de reabilitação estrutural que podem incorporar esses materiais ou elementos estruturais antigos (resíduos de demolição) e é realizada uma estimativa de custos das operações de reabilitação, que possa comparar os encargos financeiros que advêm da utilização de materiais novos e de materiais antigos. Por fim é feita uma avaliação ambiental e patrimonial das possibilidades de incorporação de resíduos de demolição na reabilitação de edifícios antigos.

4.2 Resíduos de demolição com possibilidade de utilização na reabilitação estrutural de edifícios antigos de alvenaria de pedra

Os resíduos de demolição susceptíveis de serem aproveitados para a reabilitação estrutural de edifícios antigos cingem-se a materiais antigos que provêm da demolição desses edifícios. Deste modo, dentro dos resíduos de demolição com possibilidade de reutilização, destacam-se:

- Elementos estruturais ou materiais construtivos constituídos por madeira, como vigas e barrotes de madeira, tábuas de soalho, caixilharias de madeira e outros elementos antigos constituídos por madeira que podem passar a fazer parte de estruturas ou elementos construtivos remodelados, como por exemplo pavimentos reconstruídos com vigas de madeira antigas aproveitadas, barrotes ou vigas de madeira reforçados com empalmes de peças de madeira antiga aproveitada, pavimento reconstruído com tábuas de soalho antigas aproveitadas, caixilharias reconstruídas com elementos antigos de outras caixilharias antigas de madeira, entre outros.

- Materiais cerâmicos, como sejam telhas e ladrilhos cerâmicos para a reconstrução de telhados de coberturas ou para a reconstrução de revestimentos cerâmicos, entre outros.
- Pedras de cantaria e/ou pedras irregulares (constituintes de alvenaria de pedra irregular) para a reconstrução parcial ou total de elementos construtivos como sejam paredes, contorno de janelas e portas, entre outros.

Os resíduos de demolição (ou materiais antigos) anteriormente descritos inserem-se no capítulo 17 da Lista Europeia de Resíduos (LER) [59], quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Resíduos de demolição com possibilidade de utilização na reabilitação estrutural de edifícios antigos de alvenaria de pedra e respectiva classificação LER [59]

Código LER	Material (RCD)
17 01 03	Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos
17 02 01	Madeira

É importante referir ainda que face à classificação dos resíduos de demolição e construção dada pela lista LER e tendo em conta que não existe um código específico para os resíduos como sejam pedras de cantaria ou pedras irregulares (constituintes de alvenaria de pedra irregular), o código mais adequado para este tipo de resíduos é o código 17 01 03 – Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos.

No Anexo III é apresentada sucintamente uma plataforma electrónica integrada no Mercado Organizado de Resíduos (MOR) em Portugal estabelecida pelo Decreto-Lei n.º 210/2009 [85], que permite a transação e valorização de diversos tipos de resíduos, incluindo os RCD.

4.3 Reabilitação estrutural de fundações e paredes

4.3.1 Técnicas de reabilitação com reutilização de materiais antigos

As técnicas de intervenção mais utilizadas na reabilitação estrutural de fundações e paredes de edifícios antigos de alvenaria de pedra utilizam na sua maioria materiais novos para o reforço ou consolidação destas estruturas. O aproveitamento e reutilização de materiais ou elementos construtivos originais já utilizados na construção destas estruturas é limitado pela dificuldade existente em consolidar ou reforçar paredes e fundações sem que sejam utilizados materiais novos. Por exemplo, a alvenaria de pedra irregular, que constitui as paredes resistentes e as fundações, apresenta muito fraca capacidade resistente à tracção, fraca resistência ao esforço transversal e alguma resistência à compressão, não sendo por isso um material adequado para ser reaproveitado no reforço e consolidação dos elementos construtivos dos edifícios antigos. Nos pavimentos e coberturas este

problema não é tão relevante pois a madeira, que constitui na sua maioria estes elementos construtivos, quando se encontra em bom estado e mantém a qualidade sem danos significativos na sua estrutura, pode ser aproveitada para a reabilitação estrutural, uma vez que consegue manter níveis aceitáveis de resistência à flexão e ao esforço transversal.

É de esperar, então, que sejam utilizados materiais que confirmam maior resistência às paredes e fundações como é exemplo a utilização de injeção de caldas de cimento para conferir um melhor confinamento a estes elementos estruturais.

Um dos objectivos do presente trabalho consiste em avaliar as técnicas de reabilitação que possibilitam a incorporação de resíduos de demolição e que façam essa aplicação durante o decorrer da obra de reabilitação; no entanto é importante referir que não se encontra contemplada, no objectivo do presente trabalho, a possibilidade de utilizar resíduos de demolição na incorporação de novas argamassas para aplicação em obra.

Assim, entre todas as técnicas de reabilitação estrutural de fundações e paredes de edifícios antigos de alvenaria de pedra que foram descritas no Capítulo 2 e no Anexo I, a técnica de reabilitação que tem a possibilidade de fazer a reutilização de materiais é o **desmonte e reconstrução**.

Trata-se duma técnica com importância significativa em aberturas de portas e janelas que tenham elementos de cantaria degradados e que possam ser substituídos por elementos de cantaria antigos que se encontrem em bom estado.

4.3.2 Estimativa de custos

Para efectuar a estimativa de custos, teve-se em atenção os custos correntes no mercado (Novembro 2011). A estimativa apresentada tem em conta apenas o custo dos materiais. Apesar do custo de mão-de-obra e dos equipamentos ser determinante no custo total duma obra de reabilitação, neste trabalho não são tidos em conta esses custos pois o objectivo deste trabalho não é tanto avaliar o valor dum orçamento para diferentes intervenções estruturais, mas sim avaliar o custo de uma intervenção recorrendo a diferentes materiais (novos e antigos). Este ponto será explicado mais à frente no texto.

No que diz respeito à reabilitação de paredes, as soluções de intervenção consideradas para efeitos de estimativa de custos são:

- **Cenário A:**

Reconstrução de elementos de cantaria junto a uma abertura de janela com recurso a pedras de cantaria novas.

- **Cenário B:**

Reconstrução de elementos de cantaria junto a uma abertura de janela com recurso ao aproveitamento de pedras de cantaria antigas.

A escolha dos cenários teve em conta a comparação de custos relativamente a uma solução de reabilitação que use materiais novos e outra que aproveite materiais antigos (que fizeram anteriormente parte de elementos construtivos).

No Cenário B coloca-se a hipótese da empreitada da obra de reabilitação recorrer à compra de pedras de cantaria antigas que pertenceram a outros edifícios antigos. Essas pedras são adquiridas no seguimento da demolição desses edifícios no qual se teve o cuidado de recuperar esses elementos para venda em estâncias de materiais¹⁶, figura 4.1.



(a) – pedras de cantaria e telhas cerâmicas antigas; (b) – pormenor das pedras de cantaria antigas

Figura 4.1 – Estância de materiais com resíduos de demolição em Camarate (Loures)

Esta é a hipótese mais plausível, uma vez que nem sempre se consegue recuperar, em obra, os materiais em perfeitas condições no decorrer dum desmantelamento dum edifício a reabilitar, sendo por vezes mais eficaz a compra desses materiais em estâncias de materiais para posterior aplicação em obra e por vezes as pedras de cantaria existentes no próprio local de obra não são suficientes para a operação pretendida. Cabe ao projectista certificar a capacidade resistente dos materiais aplicados na obra comprados nessas estâncias de materiais, sendo que se este achar necessário pode requisitar a realização de ensaios a amostras desses materiais para a determinação da capacidade resistente dos mesmos. No entanto, como poderá ser verificado mais à frente no texto, existem factores cruciais para a preferência em materiais adquiridos na própria obra de reabilitação e posterior aplicação na mesma, em vez de serem adquiridos em estâncias de materiais.

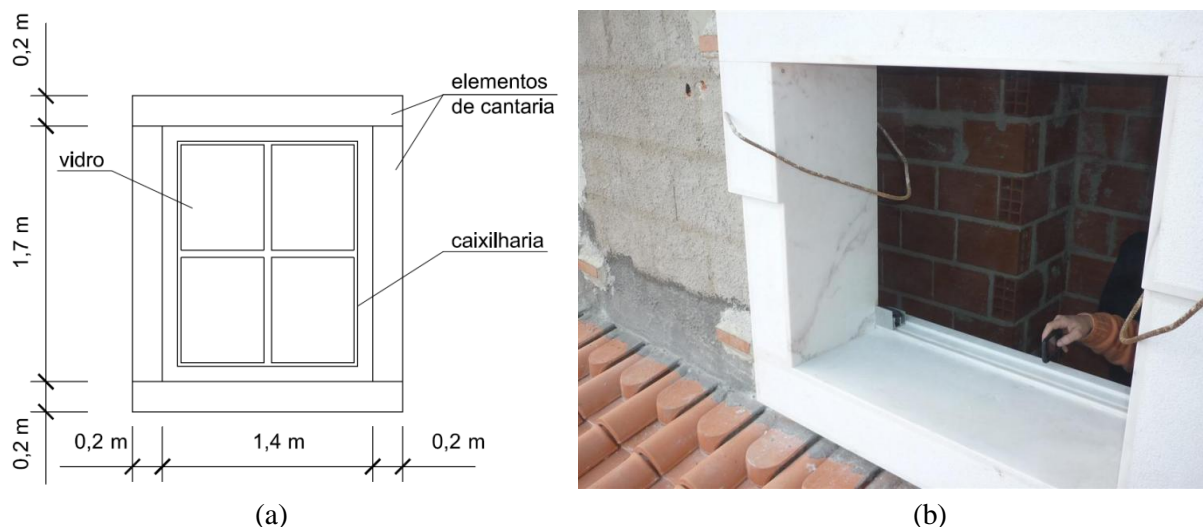
No Cenário A, para obtenção dos preços dos materiais (pedras de cantaria novas), recorreu-se a fabricantes de referência, enquanto no Cenário B a opção para a obtenção dos preços dos materiais (pedras de cantaria antigas) passou pelo recurso a estâncias de materiais e a fabricantes de referência que além de disponibilizarem o fornecimento de pedras de cantaria novas também fornecem uma gama de pedras de cantaria antigas.

¹⁶ Locais de venda de materiais e/ou de RCD que foram recuperados após demolições de edifícios.

Descrição das soluções respeitantes aos Cenários A e B

O sistema adoptado para a colocação de elementos de cantaria em janelas antigas é comum ao sistema para colocação de elementos de cantaria em janelas novas. As pedras de cantaria são dispostas no contorno das janelas, sendo que os elementos de cantaria pertencentes às ombreiras ficam limitados pelas vergas e peitoris das janelas, enquanto estes prolongam-se até às extremidades das ombreiras.

O modelo esquemático é apresentado na figura 4.2 a) e na figura 4.2 b) encontra-se um exemplo de execução de novos elementos de cantaria para o contorno duma janela.



(a) – representação esquemática das soluções propostas nos Cenários A e B (em vista);

(b) – assentamento de novos elementos de cantaria para o contorno duma janela

Figura 4.2 – Elementos de cantaria no contorno de janelas

Caracterização e quantificação geral de custos

A estimativa de custos de uma operação de reabilitação envolve diversos factores, devido à sua complexidade e especialização, como é o caso da área de reabilitação estrutural. Qualquer intervenção na reabilitação estrutural de edifícios antigos envolve o recurso a materiais, equipamentos e mão-de-obra especializada, sendo que esta última é determinante para um orçamento duma operação deste tipo. Um exemplo simples para a constatação deste facto é o caso de duas situações distintas: uma primeira que diz respeito à reconstrução de uma parte dum pavimento e outra que corresponde à reconstrução da totalidade do piso. O rendimento dos trabalhadores na primeira situação pode ser muito diferente do rendimento dos trabalhadores na segunda situação, sendo que o preço da mão-de-obra pode variar muito na execução destas duas intervenções. Assim é de extrema importância a contabilização da mão-de-obra para o orçamento final duma obra de reabilitação.

Sendo o objectivo deste trabalho avaliar o custo de uma intervenção recorrendo a diferentes materiais (novos e antigos) e uma vez que em ambos os Cenários A e B a única diferença na execução da operação é a utilização de diferentes materiais, não variando os equipamentos e a mão-de-obra, a presente estimativa de custos tem em conta apenas o custo dos materiais a utilizar nas operações propostas.

O custo dos materiais para os Cenários A e B tem em conta o preço das pedras de cantaria por metro linear (€/m).

Preços e secções de elementos de cantaria novos e antigos

Como foi referido anteriormente, para a realização da estimativa de custos, recorreu-se a estâncias de materiais e a fabricantes de referência para a obtenção de preços (a título meramente indicativo) de elementos de cantaria novos e antigos com uma determinada secção e tipo de rocha.

Embora fosse possível obter várias secções, de pedras de cantaria novas para janelas e portas, junto aos fabricantes, o mesmo não foi possível no caso de pedras de cantaria antigas disponíveis em estâncias de materiais. Assim foi escolhida apenas uma secção (20x20cm²) tendo em conta as secções disponíveis nessas estâncias.

A escolha do tipo de rocha (rocha de calcário Lioz) teve em conta a sua grande utilização nos edifícios antigos da Região da Grande Lisboa, bem como a sua qualidade e boas características mecânicas. No quadro 4.2 apresentam-se as características físico-mecânicas deste tipo de rocha.

Quadro 4.2 – Características Físico-Mecânicas da Rocha de Calcário Lioz [82]

Característica	Valor
Resistência mecânica à compressão [MPa]	103
Resistência mecânica à compressão após teste de gelividade [MPa]	135
Resistência mecânica à flexão [MPa]	20,5
Massa volúmica aparente [kg/m ³]	2703
Absorção de água à pressão atmosférica normal [%]	0,11
Porosidade aberta [%]	0,31
Coefficiente de dilatação linear térmica [°C ⁻¹]	3,3 x 10 ⁻⁶
Resistência ao desgaste [mm]	2,2
Resistência ao choque com altura mínima de queda [cm]	45

As pedras de cantaria escolhidas para a realização da estimativa de custos têm como características serem pedras maciças, com acabamento bujardado na face que fica à vista e nas restantes faces com acabamento amaciado, tendo nas arestas um acabamento em golpe de aresta.

Como alguns preços variam consoante o fabricante e a estância de materiais, obteve-se a média dos preços de mercado. Nos quadros 4.3 e 4.4, respectivamente, são apresentados os preços de referência para as pedras de cantaria novas e antigas com secção 20x20cm² e tipo de rocha calcário lioz (figura 4.1), bem como a média dos preços por metro linear desses materiais.

Quadro 4.3 – Preços de referência e valor médio para pedras de cantaria novas no mercado (calcário lioz com 20x20cm²)

Fornecedor	Preço⁽¹⁾ [€/m]
Durapedra	90,00
Terrassena	90,00
Urmal	85,00
Mármore Vitório	132,50
Valor médio	99,38

(1) Preços consultados em Novembro de 2011.

Quadro 4.4 – Preços de referência e valor médio para pedras de cantaria antigas no mercado (calcário lioz com 20x20cm²)

Fornecedor	Preço⁽¹⁾ [€/m]
Demolições e Construções de José da Silva Antunes	100,00
António dos Santos Silva - Demolições	100,00
Terrassena	90,00
António Luís Reis Gomes Antiguidades	80,00
Valor médio	92,50

(1) Preços consultados em Novembro de 2011.

Após uma investigação dos preços de pedras de cantaria no mercado, o custo das pedras de cantaria novas custam em média mais 6,88€/m que as pedras de cantaria antigas.

Custo total das soluções propostas

Considera-se para a presente estimativa apenas o custo dos materiais (pedras de cantaria) nas soluções propostas para os Cenários A e B e que a janela (para colocação de elementos de cantaria no seu contorno) tem de largura 1,40m e altura 1,70m. Encontram-se descritos, em baixo, os cálculos para a quantidade de cantaria a colocar:

- Quantidade de cantaria em ombreiras de janela

$$1,70 \times 2 = 3,40\text{m} \quad (4.1)$$

- Quantidade de cantaria em peitoril e verga de janela

$$(1,40 + 0,20 \times 2) \times 2 = 3,60\text{m} \quad (4.2)$$

Considerando para efeitos de cálculo o valor do custo médio para as pedras de cantaria, foram determinados os custos totais (da aplicação da cantaria, excluindo os custos de equipamento e mão-de-obra) para as soluções propostas (Cenário A - reconstrução de elementos de cantaria junto a uma abertura de janela com recurso a pedras de cantaria novas; Cenário B - reconstrução de elementos de cantaria junto a uma abertura de janela com recurso ao aproveitamento de pedras de cantaria antigas). Encontram-se descritos, em seguida, os cálculos para o custo total dos cenários investigados.

- Custo total para o Cenário A

$$(3,40 + 3,60) \times 99,38 = 695,66\text{€} \quad (4.3)$$

- Custo total para o Cenário B

$$(3,40 + 3,60) \times 92,50 = 647,50\text{€} \quad (4.4)$$

Os resultados obtidos são apresentados no quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Quadro resumo do custo total para os cenários investigados contabilizando apenas com o custo médio das pedras de cantaria

Tipo de Intervenção	Custo total da intervenção [€]
Cenário A	695,66
Cenário B	647,50

Fazendo a análise do custo pertencente a cada um dos cenários (quadro 4.5), é possível verificar que o cenário que se afigura mais económico é o da solução que utiliza pedras de cantaria antigas (Cenário B). No entanto, após uma análise mais aprofundada dos preços (fornecidos pelos fabricantes) para pedras de cantaria novas, é possível constatar que existe uma discrepância significativa entre os três primeiros valores dos preços de cada fornecedor do quadro 4.3 e o último valor (132,50€/m) deste quadro. Este último valor é determinante para o custo médio das pedras de cantaria novas e consequentemente influencia o custo final para o Cenário A, provocando assim um aumento no custo final desta última solução.

De realçar ainda o facto de só terem sido consultados quatro fornecedores de cantarias novas e quatro fornecedores de cantarias antigas.

4.3.3 Avaliação económica, ambiental e patrimonial da reutilização de resíduos de demolição

Do ponto de vista económico, efectuando uma análise global, o Cenário B - reconstrução de cantaria junto a uma abertura de janela com recurso ao aproveitamento de pedras de cantaria antigas, é aquele que é o mais económico dos cenários analisados na presente secção deste capítulo. No entanto apesar de ser uma opção vantajosa em termos económicos, a diferença de custo total entre um cenário e outro não é muito significativa, não sendo por isso de esperar que seja poupado muito dinheiro no orçamento final após a opção pela reconstrução de cantarias com materiais antigos reaproveitados.

É importante destacar a vantagem económica em adquirir os elementos antigos na própria obra de reabilitação para posterior reaproveitamento desses materiais na mesma obra. Nesta situação além de se poder economizar no fornecimento dos materiais, pois evita-se a compra destes em estâncias de materiais ou fabricantes, é poupado também o custo do transporte desses materiais desde um armazém até à própria obra de reabilitação. Contudo a dificuldade em recuperar em condições esses elementos antigos na própria obra de reabilitação constitui um obstáculo a vencer, sendo mais eficaz do ponto de vista técnico a aquisição dos materiais em estâncias de materiais. Estes armazéns ou estâncias com materiais antigos devem por isso estar localizados na proximidade da obra a decorrer, de modo a evitar ou reduzir o seu transporte até à obra.

Na vertente ambiental o reaproveitamento de materiais antigos, como é o caso de pedras de cantaria antigas, constitui um factor de extrema importância tendo em vista que a compra de novos materiais contribui para a poluição do meio ambiente e para a escassez dos recursos naturais. No caso particular das pedras de cantaria a poluição do meio ambiente é provocada por todo o seu processo de fabrico, desde a recolha dos seus recursos naturais nas pedreiras, ao processo de transformação, até ao seu fornecimento e transporte. A escassez de recursos naturais é ocasionada pela necessidade óbvia de

recolher a rocha (em pedreiras) que será parte integrante das cantarias. O transporte dos materiais antigos, desde os armazéns até às obras, constitui ainda um factor negativo a ter em conta, sendo em tudo vantajoso que esse armazém se localize nas proximidades da obra a decorrer.

É também importante destacar que o reaproveitamento dos resíduos de demolição, como é o caso da incorporação de pedras de cantaria antigas nas técnicas de reabilitação, evita a acumulação e deposição dos resíduos de demolição em aterros para RCD, dando a estes outro destino final de maior utilidade.

Na perspectiva de conservação do património faz sentido o reaproveitamento dos materiais antigos, pois um dos objectivos principais da reabilitação de edifícios antigos deve ser a de conservação do património e da cultura. Um edifício antigo (de habitação, monumento ou palácio) representa a história e cultura de uma cidade, de um povo e de um país, e portanto constitui uma construção que deve ser conservada, pois pertence ao património histórico-cultural desse país. No caso das cantarias, é de todo o interesse reaproveitar ou manter os materiais constituintes dessas cantarias, pois estas representam e retratam determinados momentos da história da arquitectura portuguesa. Apesar de hoje em dia haver fabricantes que conseguem imitar o aspecto antigo das cantarias, nem sempre é possível compatibilizar a idade e qualidade das cantarias existentes num determinado monumento, com as cantarias novas adquiridas no mercado. O mesmo se passa para outros exemplos como sejam: o aproveitamento de caixilharias de madeira, telhas cerâmicas, entre outros.

Quanto à resistência mecânica, é de todo o interesse reaproveitar os materiais antigos, pois nem sempre é possível adquirir elementos novos com a mesma resistência mecânica que os existentes, em edifícios antigos.

É ainda importante referir que a melhor forma de reaproveitar os materiais antigos é fazer a sua reutilização no próprio local da obra a decorrer, pois a logística e o valor podem ser questionados quando os materiais são adquiridos em estâncias ou em fabricantes e não do próprio edifício. Por exemplo um edifício característico do séc.VII necessita de materiais característicos desse século de modo a se conservar o património que representa; assim existe maior dificuldade em adquirir esses materiais numa estância do que em reutilizá-los no próprio edifício. A melhor forma de conservar o valor desse edifício seria manter o máximo possível dos seus materiais, conservando-os assim no próprio local.

Do ponto de vista técnico, é sempre importante garantir a compatibilidade dos materiais e das técnicas a utilizar com os materiais existentes; nesse aspecto o reaproveitamento dos materiais antigos satisfaz em grande parte esse requisito. A exigência da durabilidade dos materiais a colocar nos edifícios antigos é também um aspecto a ter em conta, o que na maioria das situações os materiais antigos conseguem garantir desde que mantenham as suas propriedades físico-mecânicas intactas ou pelo menos pouco alteradas.

Nas listas que se seguem é feita uma síntese de algumas vantagens e desvantagens em realizar o reaproveitamento de materiais antigos (em particular de pedras de cantaria) em técnicas de reabilitação estrutural de edifícios antigos.

- ***Vantagens:***

- O reaproveitamento é menos dispendioso do que o recurso a pedras de cantaria novas, excluindo o custo de transporte, de equipamento e materiais complementares (como seja por exemplo argamassa de assentamento);
- Diminuição da poluição do meio ambiente;
- Redução da recolha de recursos naturais;
- Conservação do património histórico-cultural;
- Compatibilização da idade dos elementos antigos com o edifício;
- Boa resistência mecânica dos materiais antigos nos casos em que estes são removidos em condições a partir dos locais originais;
- Compatibilidade com os materiais existentes, possibilitando em grande parte a não alteração da rigidez dos materiais e do comportamento estrutural.

- ***Desvantagens:***

- Dificuldade na aquisição de materiais com boa resistência mecânica devido a algumas adversidades na remoção e transporte destes materiais a partir dos locais originais;
- Necessidade em certificar a qualidade dos materiais antigos a reutilizar.

4.4 Reabilitação estrutural de pavimentos e coberturas

4.4.1 Técnicas de reabilitação com reutilização de materiais antigos

As técnicas de intervenção mais utilizadas na reabilitação estrutural de pavimentos e cobertura de edifícios antigos de alvenaria de pedra utilizam na sua maioria materiais novos para o reforço ou consolidação destas estruturas. Contudo, o reaproveitamento de materiais ou elementos construtivos originais já utilizados na construção destas estruturas não é tão limitado como é no caso das paredes e fundações, uma vez que a madeira sendo o material que constitui na sua maioria os pavimentos e cobertura dos edifícios antigos, quando se encontra em bom estado e mantém a qualidade sem danos significativos na sua estrutura, pode ser aproveitada para a reabilitação estrutural, pois consegue manter níveis aceitáveis de resistência à flexão e ao esforço transversal.

Um dos objectivos do presente trabalho consiste em avaliar as técnicas de reabilitação que possibilitam a incorporação de resíduos de demolição e que façam essa aplicação durante o decorrer da obra de reabilitação; assim as técnicas de intervenção que durante a sua aplicação utilizem os materiais originais, conservando-os no próprio local, sem incorporação de outros materiais antigos, não fazem parte do âmbito do presente capítulo.

Analise-se, por exemplo o caso da técnica da “injecção de resinas epoxídicas em fendas”. Esta técnica de intervenção conserva os materiais originais da estrutura existente, pois consiste na injecção de resinas epoxídicas numa viga de madeira antiga sem a remoção e substituição da madeira deteriorada. Pode-se depreender deste caso que existe um aproveitamento dos materiais originais (viga de madeira) através da sua conservação no local; no entanto a técnica não faz a incorporação de materiais antigos, em vez disso incorpora exclusivamente novos materiais (resina epoxídica) para a intervenção da estrutura. O propósito da presente dissertação passa então por avaliar quais as técnicas de reabilitação que possam fazer, durante a aplicação das mesmas, a incorporação de materiais antigos reutilizando-os, e não apenas conservando-os no próprio local. Ainda assim existem técnicas que além de reutilizarem na sua aplicação directa materiais antigos, também utilizam, em simultâneo, materiais novos. Estas técnicas também se enquadram no tema da presente dissertação. Um exemplo duma técnica que faz a utilização de materiais novos e a reutilização de materiais antigos é a técnica de introdução de elementos metálicos no interior da secção, em que após a colocação dos elementos metálicos numa secção de viga de madeira, aplicam-se elementos de madeira (que podem ser elementos antigos aproveitados) para protecção ao fogo dos elementos metálicos.

Assim, entre as técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos e coberturas de edifícios antigos de alvenaria de pedra que foram descritas no Capítulo 3 e no Anexo II, apresentam-se de seguida as técnicas de reabilitação que têm a possibilidade de fazer a reutilização de materiais antigos.

Técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos e coberturas com reutilização de materiais antigos:

- Fixação de novas peças de madeira às antigas;
- Substituição das partes degradadas por aplicação de empalmes;
- Introdução de elementos metálicos no interior da secção¹⁷;
- Colocação de novas vigas de madeira ou perfis metálicos sob os pavimentos;
- Colocação de novos elementos a pavimentos e estruturas da cobertura de madeira, utilizando o mesmo material;
- Introdução de varões metálicos ou de material compósito FRP selados com cola epoxídica¹⁷;
- Introdução de chapas metálicas ou de material compósito FRP no interior da secção com cola epoxídica¹⁷;
- Colocação de escoras de suporte;
- Fixação ou introdução de um novo elemento na parede para apoio do vigamento ou de linhas de asnas de madeira¹⁸;
- Reforço da linha de asna por aplicação de empalmes com cintas metálicas, cavilhas em aço inox e/ou cola epoxídica.

Estas técnicas podem incorporar materiais antigos como sejam vigas de madeira, barrotes de madeira ou pequenos troços de elementos de madeira, procedendo assim à reutilização de resíduos de materiais.

4.4.2 Estimativa de custos

A presente estimativa de custos segue os mesmos critérios que a secção 4.3.2 e teve em atenção os custos correntes no mercado (Julho 2011).

No que diz respeito à reabilitação de pavimentos e coberturas, as soluções de intervenção consideradas para efeitos de estimativa de custos são:

- **Cenário C:**
Reconstrução de pavimento elevado antigo de madeira através da colocação de novos elementos de madeira para vigamento.
- **Cenário D:**
Reconstrução de pavimento elevado antigo de madeira através da reutilização de elementos antigos de madeira para vigamento.

¹⁷ Técnicas que utilizam como reforço principal novos materiais (metálicos e compósitos) mas que também envolvem materiais antigos (madeira) que podem ser incorporados nas mesmas.

¹⁸ Dentro desta técnica apenas a que utiliza frechal de madeira tem a possibilidade de reutilização de materiais antigos.

No Cenário D as vigas de madeira são adquiridas no seguimento da demolição de edifícios antigos, na qual se teve o cuidado de recuperar essas vigas para venda em estâncias de materiais, figura 4.3.

Tal como foi referido anteriormente, existem factores cruciais para a preferência em materiais adquiridos na própria obra de reabilitação e posterior aplicação na mesma, em vez de serem adquiridos em estâncias de materiais, como é o caso do custo de transporte e do custo da aquisição desses materiais.



Figura 4.3 – Vigas de madeira antigas numa estância de materiais em Camarate (Loures)

No Cenário C, para obtenção dos preços dos materiais (vigas de madeira novas), houve necessidade de recorrer a fabricantes de referência, enquanto no Cenário D a opção para a obtenção dos preços dos materiais (vigas de madeira antigas) passou pelo recurso a estâncias de materiais e a fabricantes de referência que além de disponibilizarem o fornecimento de vigas de madeira novas também fornecem uma gama de vigas de madeira antigas.

Descrição das soluções respeitantes aos Cenários C e D

Tanto no Cenário C como no Cenário D, o sistema adoptado é o do tradicional piso elevado de madeira, ou seja, vigas de madeira dispostas paralelamente, geralmente na direcção do menor vão, sobre as quais assenta o soalho, este último disposto perpendicularmente à direcção das vigas, figura 4.4. Esta solução é complementada com elementos transversais de travamento (tarugos), que podem ser constituídos por elementos de madeira com secção $10 \times 10 \text{ cm}^2$ espaçados de 1,5m, pregados às vigas. A diferença é que no Cenário C são colocadas vigas de madeira novas e no Cenário D são colocadas vigas de madeira antigas.

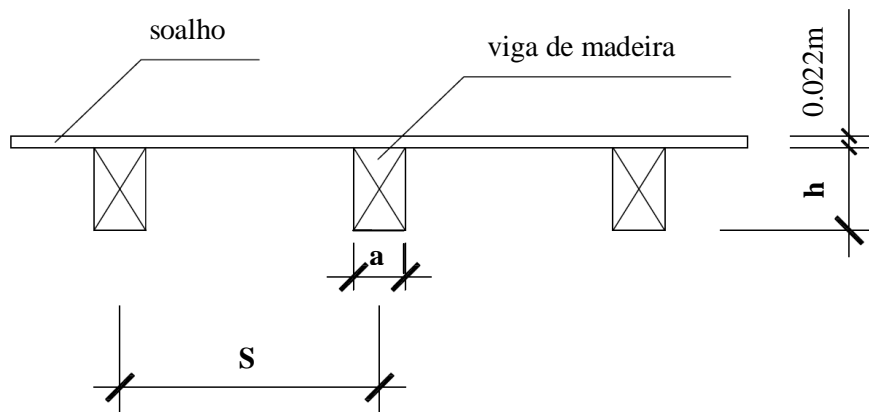


Figura 4.4 – Representação esquemática das soluções propostas nos Cenários C e D (corte transversal)

Na figura 4.5 encontra-se um exemplo de execução dum novo piso de madeira em obra de reabilitação.



Figura 4.5 – Execução de pavimento elevado de madeira em obra de reabilitação (Edifício na Rua Mouzinho da Silveira) [2]

Caracterização e quantificação geral de custos

Tal como na secção 4.3.2, a presente estimativa de custos tem em conta apenas o custo dos materiais a utilizar nas operações propostas, uma vez que em ambos os Cenários C e D a única diferença na execução da operação é a utilização de diferentes materiais, não variando os equipamentos e a mão-de-obra.

O custo dos materiais para os Cenários C e D tem em conta o preço das vigas de madeira novas e antigas por metro cúbico ($\text{€}/\text{m}^3$).

Preços e secções de vigas de madeira novas e antigas

Para se realizar a estimativa de custos que é apresentada nesta secção, é necessário que se faça uma comparação de custos entre materiais antigos e novos. Para isso devem então ser escolhidas vigas com secções iguais ou semelhantes entre os dois tipos de materiais, bem como o mesmo tipo de madeira. No entanto existem limitações para a obtenção de preços de vigas de madeira com as mesmas características em diferentes fornecedores, devido ao facto das secções das vigas variarem de fornecedor para fornecedor. Deste modo foram listados preços com diferentes secções, tendo por base as secções das vigas de madeira que antigamente eram dimensionadas nos edifícios antigos.

A escolha da espécie de árvore (*Pinus sylvestris* - Casquinha) teve em conta a sua grande utilização nos pisos dos edifícios antigos, a sua boa qualidade e o facto de se encontrar disponível em vários fornecedores, figura 4.6. As características físicas desta espécie encontram-se descritas na ficha LNEC M4 de 1997 [42].



Figura 4.6 – Vigas de madeira de *Pinus sylvestris*.

As vigas de madeira escolhidas para a realização da estimativa de custos, são vigas estruturais maciças de Casquinha (*Pinus sylvestris*) e com secção rectangular. A classe de resistência da Casquinha corresponde às classes de resistência C14, C16, C18, C24 e C30, segundo a ficha LNEC M1 de 1997 [17]. Não foi especificada a classe de resistência para as vigas de madeira disponibilizadas pelos fornecedores; contudo a madeira não classificada também se pode usar, mas obriga a uma consideração de valores de cálculo (para efeitos de dimensionamento) bastante mais conservadora, o que pode tornar as estruturas menos económicas. A título de exemplo, nos quadros 4.6 e 4.7, estão expostos os valores característicos correspondentes às classes de resistência C16 e C24 respectivamente, segundo a norma EN 338: 2009 [27].

Quadro 4.6 – Valores respectivos à classe de resistência C16 [27]

Característica		Valor
Resistência [MPa]	Flexão ($f_{m,k}$)	16
	Tracção paralela ao fio ($f_{t,0,k}$)	10
	Tracção perpendicular ao fio ($f_{t,90,k}$)	0,5
	Compressão paralela ao fio ($f_{c,0,k}$)	17
	Compressão perpendicular ao fio ($f_{c,90,k}$)	2,2
	Corte ($f_{v,k}$)	1,8
Rigidez [GPa]	Módulo de elasticidade paralelo ao fio – valor médio ($E_{0,mean}$)	8
	Módulo de elasticidade paralelo ao fio – valor característico ($E_{0,05}$)	5,4
	Módulo de elasticidade perpendicular ao fio – valor médio ($E_{90,mean}$)	0,27
	Módulo de distorção (G_{mean})	0,5
Massa volúmica [kg/m ³]	Valor característico (ρ_k)	310
	Valor médio (ρ_{mean})	370

Quadro 4.7 – Valores respectivos à classe de resistência C24 [27]

Característica		Valor
Resistência [MPa]	Flexão ($f_{m,k}$)	24
	Tracção paralela ao fio ($f_{t,0,k}$)	14
	Tracção perpendicular ao fio ($f_{t,90,k}$)	0,5
	Compressão paralela ao fio ($f_{c,0,k}$)	21
	Compressão perpendicular ao fio ($f_{c,90,k}$)	2,5
	Corte ($f_{v,k}$)	2,5
Rigidez [GPa]	Módulo de elasticidade paralelo ao fio – valor médio ($E_{0,mean}$)	11
	Módulo de elasticidade paralelo ao fio – valor característico ($E_{0,05}$)	7,4
	Módulo de elasticidade perpendicular ao fio – valor médio ($E_{90,mean}$)	0,37
	Módulo de distorção (G_{mean})	0,69
Massa volúmica [kg/m ³]	Valor característico (ρ_k)	350
	Valor médio (ρ_{mean})	420

No quadro 4.8 são apresentados os preços de referência, as respectivas secções e o tipo de madeira para as vigas de madeira novas. Devido às limitações descritas anteriormente, não foi possível adquirir preços de vigas com secções iguais. No entanto tentou-se listar uma série de preços com secções o mais semelhante possível entre elas. O mesmo critério foi adoptado para o caso das vigas de madeira antigas, quadro 4.9.

Quadro 4.8 – Preços de referência para vigas de madeira novas (*Pinus sylvestris* – Casquinha)

Fornecedor	Secção [cm²]	Preço⁽¹⁾ [€/m³]
Carmo	15x7,5	576,59
	20x10	615,00
Jular	15x7,5	385,00
	20x10	395,00
	22,5x10	385,00
Tecniwood	22x10	400,00
	22,5x7,5	400,00
Icomatro	22,5x7,5	360,00

(1) Preços consultados em Julho de 2011.

Quadro 4.9 – Preços de referência para vigas de madeira antigas (*Pinus sylvestris* – Casquinha)

Fornecedor	Secção [cm²]	Preço⁽¹⁾ [€/m³]
Demolições e Construções de José da Silva Antunes	10x10	1250,00
	14x7	1000,00
António dos Santos Silva - Demolições	14x7	750,00
Jular	15x15	235,00
	21x10	345,00
	23x11	345,00

(1) Preços consultados em Julho de 2011.

Para melhor visualização na comparação de preços encontram-se representados na figura 4.7 os custos (de referência) por metro cúbico das vigas de madeira novas e antigas consoante as secções disponíveis no mercado.

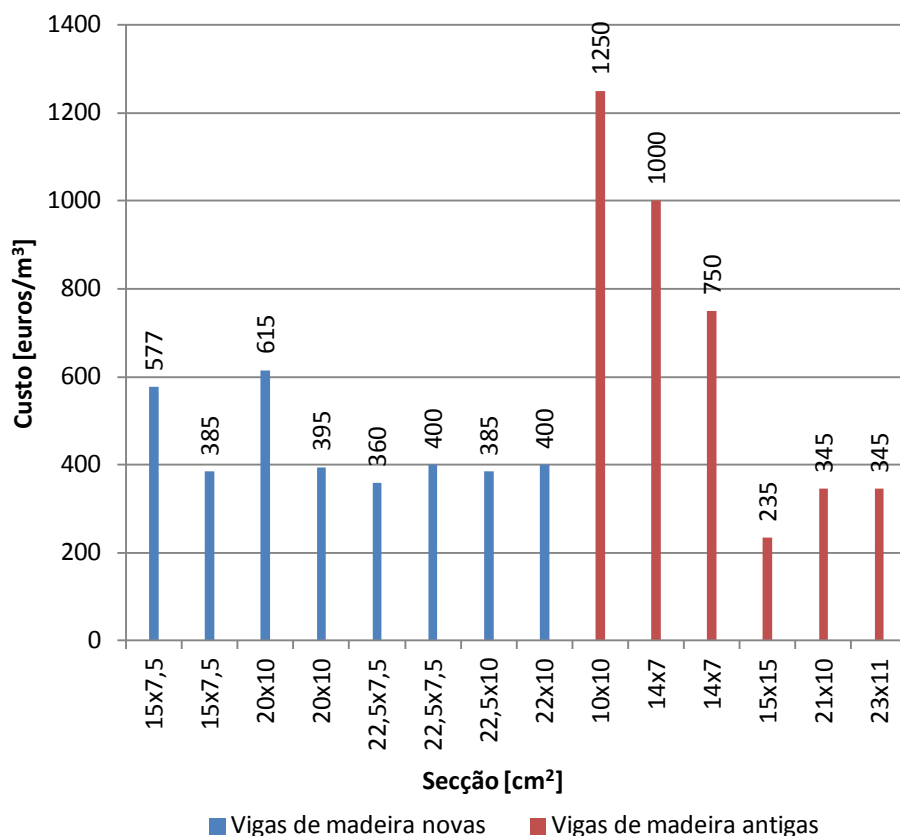


Figura 4.7 – Custo das vigas de madeira novas e antigas disponíveis no mercado

Fazendo uma primeira análise global ao gráfico da figura 4.7 e sabendo que as secções são diferentes, é possível verificar que os valores mais elevados correspondem ao custo das vigas de madeira antigas, constituindo uma grande diferença de valor para os restantes custos apresentados no gráfico. Após uma observação mais cuidada, constata-se que dentro da gama de valores correspondente aos custos das vigas de madeira antigas, metade destes custos apresentam valor elevado.

Estes elevados custos dizem respeito aos preços de vigas de madeira antigas que foram obtidos após uma consulta a duas estâncias de materiais. O seu elevado valor deve-se à sobrevalorização dos materiais que é feita nessas estâncias, sobretudo quando um determinado cliente está apenas interessado em comprar uma série reduzida de material ou pelo facto destes materiais precisarem de manutenção antes de serem vendidos, como por exemplo a retirada de elementos metálicos das vigas de madeira como sejam pregos e parafusos metálicos. Um dos critérios de venda estabelecidos por algumas estâncias de materiais é a quantidade de material que é encomendado pelo cliente e o verdadeiro interesse por parte desse cliente em comprar esse material. Assim quando um cliente não faz uma encomenda de uma quantidade considerável de material é esperado que o preço do material seja inflacionado por parte de algumas estâncias de materiais, tendo sido o caso que ocorreu após a consulta de preços nessas estâncias.

Os valores mais baixos relativos aos custos de vigas de madeira antigas correspondem aos preços obtidos num fornecedor (Jular) que além de vender vigas de madeira novas também vende vigas de madeira antigas obtidas em demolições. No entanto, este fornecedor não faz a sobrevalorização do material que é vendido, podendo verificar-se que os preços para as vigas de madeira antigas são mais baixos que os restantes valores do gráfico da figura 4.7.

Comparando secções semelhantes para diferentes tipos de vigas de madeira (novas e antigas), pode-se verificar que por exemplo os dois valores correspondentes ao custo das vigas de madeira nova com secção $15 \times 7,5 \text{cm}^2$ são muito inferiores aos dois valores correspondentes ao custo das vigas de madeira antiga com secção $14 \times 7 \text{cm}^2$. Contudo os valores correspondentes ao custo das vigas de madeira nova com secção $20 \times 10 \text{cm}^2$ são superiores ao custo das vigas de madeira antiga dado pela secção $21 \times 10 \text{cm}^2$. Relativamente às vigas de madeira novas e antigas com secções $15 \times 7,5 \text{cm}^2$ e $14 \times 7 \text{cm}^2$ respectivamente, a elevada diferença entre os custos deve-se às limitações que foram descritas anteriormente.

Custo total das soluções propostas

Considera-se para a presente estimativa apenas o custo dos materiais (vigas de madeira) nas soluções propostas para os Cenários C e D. O dimensionamento estrutural dos pavimentos de madeira não faz parte do âmbito do presente trabalho e portanto as dimensões das vigas estruturais de madeira são escolhidas tendo por base exemplos de pavimentos de madeira de edifícios antigos e tendo em conta as secções listadas nos quadros 4.8 e 4.9. Para as dimensões e espaçamentos das vigas em ambos os cenários, escolheu-se as secções com valor o mais semelhante possível para um e outro cenário.

As dimensões e espaçamentos dos pavimentos e das vigas para as soluções propostas são apresentados no quadro 4.10.

Quadro 4.10 – Dimensões e espaçamentos dos pavimentos e vigas para os cenários propostos

Cenário	Pavimento	Vão das vigas [m]	Comprimento do pavimento L [m]	Largura do pavimento B [m]	h [m]	a [m]	s [m]
C	1	3	3	3	0,15	0,075	0,35
D	2				0,14	0,07	
C	3	4,5	4,5	6	0,20	0,10	0,40
D	4				0,21	0,10	

Os vãos descritos no quadro 4.10 correspondem a pavimentos distintos quanto às suas dimensões. Optou-se por analisar um pavimento com 3m de comprimento e largura, que diz respeito ao vão das vigas de 3m e outro pavimento com 6m de comprimento e 4,5m de largura, este último respeitante ao vão de 4,5m. Na figura 4.8 estão representados esquematicamente os quatro tipos de pavimentos, cujas dimensões se encontram descritas no quadro 4.10.

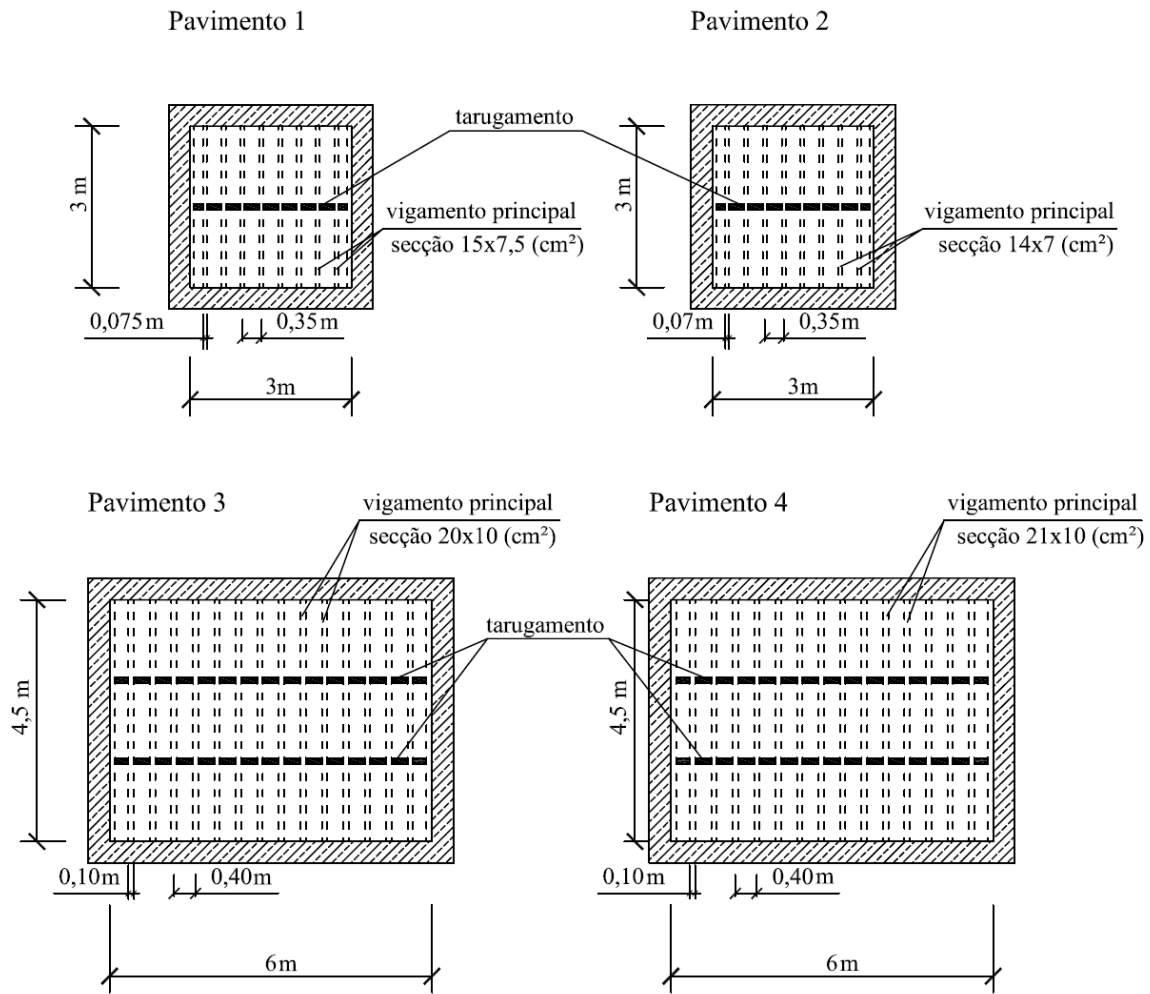


Figura 4.8 – Representação esquemática dos pavimentos propostos pelos Cenários C e D

Encontram-se descritos, em baixo, os cálculos para a quantidade de vigas de madeira a colocar nos pavimentos em análise:

- Quantidade de vigamento de madeira para o Pavimento 1

$$[(0,15 \times 0,075 \times 3) + (0,15 \times 0,075 \times 0,2) \times 2] \times 10 = 0,383 \text{ m}^3 \quad (4.5)$$

- Quantidade de vigamento de madeira para o Pavimento 2

$$[(0,14 \times 0,07 \times 3) + (0,14 \times 0,07 \times 0,2) \times 2] \times 10 = 0,333 \text{ m}^3 \quad (4.6)$$

- Quantidade de vigamento de madeira para o Pavimento 3

$$[(0,20 \times 0,10 \times 4,5) + (0,20 \times 0,10 \times 0,2) \times 2] \times 16 = 1,568 \text{ m}^3 \quad (4.7)$$

- Quantidade de vigamento de madeira para o Pavimento 4

$$[(0,21 \times 0,10 \times 4,5) + (0,21 \times 0,10 \times 0,2) \times 2] \times 16 = 1,646 \text{ m}^3 \quad (4.8)$$

Considerando para efeitos de cálculo o valor do custo de uma determinada secção para as vigas de madeira, foram determinados os custos totais (da aplicação das vigas, excluindo os custos de equipamento e mão-de-obra) para as soluções propostas (Cenário C - reconstrução de pavimento elevado antigo de madeira através da colocação de novos elementos de madeira para vigamento; Cenário D: reconstrução de pavimento elevado antigo de madeira através da reutilização de elementos antigos de madeira para vigamento). Encontram-se descritos, em baixo, os cálculos para o custo total dos cenários investigados:

- Custo total para o Cenário C e para vigamento com vão de 3m, com vigas do fornecedor Carmo e secção $15 \times 7,5 \text{cm}^2$
$$0,383 \times 576,59 = 220,83\text{€} \quad (4.9)$$
- Custo total para o Cenário C e para vigamento com vão de 3m, com vigas do fornecedor Jular e secção $15 \times 7,5 \text{cm}^2$
$$0,383 \times 385,00 = 147,46\text{€} \quad (4.10)$$
- Custo total para o Cenário C e para vigamento com vão de 4,5m, com vigas do fornecedor Carmo e secção $20 \times 10 \text{cm}^2$
$$1,568 \times 615,00 = 964,32\text{€} \quad (4.11)$$
- Custo total para o Cenário C e para vigamento com vão de 4,5m, com vigas do fornecedor Jular e secção $20 \times 10 \text{cm}^2$
$$1,568 \times 395,00 = 619,36\text{€} \quad (4.12)$$
- Custo total para o Cenário D e para vigamento com vão de 3m, com vigas do fornecedor Demolições e construções de José da Silva Antunes e secção $14 \times 7 \text{cm}^2$
$$0,333 \times 1000,00 = 333,00\text{€} \quad (4.13)$$
- Custo total para o Cenário D e para vigamento com vão de 3m, com vigas do fornecedor António dos Santos Silva - Demolições e secção $14 \times 7 \text{cm}^2$
$$0,333 \times 750,00 = 249,75\text{€} \quad (4.14)$$
- Custo total para o Cenário D e para vigamento com vão de 4,5m, com vigas do fornecedor Jular e secção $21 \times 10 \text{cm}^2$
$$1,646 \times 345,00 = 567,87\text{€} \quad (4.15)$$

Os resultados obtidos são apresentados no quadro 4.11.

Quadro 4.11 – Quadro resumo do custo total para os cenários investigados contabilizando apenas com o custo das vigas de madeira

Tipo de intervenção	Fornecedor	Secção das vigas [cm²]	Custo total da intervenção para vão de 3m [€]	Custo total da intervenção para vão de 4,5m [€]
Cenário C	Carmo	15x7,5	220,83	-
	Jular	15x7,5	147,46	-
	Carmo	20x10	-	964,32
	Jular	20x10	-	619,36
Cenário D	Demolições e construções de José da Silva Antunes	14x7	333,00	-
	António dos Santos Silva - Demolições	14x7	249,75	-
	Jular	21x10	-	567,87

Fazendo a análise dos diversos custos estimados (quadro 4.11), é possível verificar que a hipótese que se afigura mais económica corresponde à solução do Cenário C (147,46€) que utiliza novos elementos de madeira na reconstrução dum pavimento cujo vigamento principal tem de vão 3m e as vigas têm de secção 15x7,5cm², sendo que estas devem ser adquiridas ao fornecedor Jular (JULAR – Madeiras, S.A.) para perfazer o valor do custo total em questão. Fazendo uma análise mais aprofundada, quando se compara apenas os custos dos pavimentos com vigas de madeira de secção semelhante (15x7,5cm² e 14x7cm²), e com vão de 3m, é possível constatar que o Cenário C (que utiliza vigas de madeira novas) é o mais económico. A razão mais plausível, para os custos correspondentes ao Cenário D serem mais elevados comparativamente com o Cenário C, deve-se à sobrevalorização dos preços individuais de cada viga de madeira antiga adquirida em estâncias de materiais (ver figura 4.7).

Quanto aos custos correspondentes à reconstrução dum pavimento cujo vigamento principal corresponde a um vão de 4,5m, pode-se verificar que o Cenário D (que utiliza vigas de madeira antigas) é o Cenário mais económico (567,87€). Conclui-se que o custo da reconstrução dum pavimento com material novo ou com material antigo proveniente de outros edifícios, depende do fornecedor onde se adquirem esses materiais.

4.4.3 Avaliação económica, ambiental e patrimonial da reutilização de resíduos de demolição

Do ponto de vista económico, o custo total para uma solução de reconstrução dum pavimento, contabilizando apenas com o custo dos materiais (neste caso as vigas de madeira), depende muito do fornecedor onde se adquire as vigas de madeira, bem como da secção e das dimensões do pavimento a ser reconstruído. A diferença de custos resultante da escolha do fornecedor, deve-se ao facto de em alguns fornecedores ser possível obter vigas de madeira antigas e novas com preços competitivos; todavia nem sempre é possível obter vigas antigas com preços competitivos. Em estâncias de materiais, por exemplo, é mais difícil a obtenção de preços económicos para as vigas de madeira antigas.

Para os pavimentos cujo vão das vigas é de 3m, o Cenário C - reconstrução de pavimento elevado antigo de madeira através da colocação de novos elementos de madeira para vigamento, é aquele que é o mais económico. Já no caso dos pavimentos cujo vão das vigas é de 4,5m, a situação inverte-se sendo o Cenário D - reconstrução de pavimento elevado antigo de madeira através da reutilização de elementos antigos de madeira para vigamento, aquele que se apresentou como o mais económico, em virtude de neste último caso não ter sido possível obter preços mais acessíveis para o tipo de secção de vigas pretendido.

É importante destacar ainda a vantagem económica em usar os elementos antigos na própria obra de reabilitação para posterior reaproveitamento desses materiais na mesma obra. Nesta situação além de se economizar na compra dos materiais, também se evita o custo do transporte desses materiais desde um armazém até à própria obra de reabilitação. Contudo, a dificuldade em recuperar em condições esses elementos antigos na própria obra de reabilitação constitui um obstáculo a vencer, sendo mais facilitado, do ponto de vista técnico, a aquisição dos materiais em estâncias de materiais. Estes armazéns ou estâncias com materiais antigos devem por isso estar localizados na proximidade da obra a decorrer, de modo a evitar ou reduzir o seu transporte até à obra.

Na vertente ambiental o reaproveitamento de materiais antigos, como é o caso de vigas de madeira antigas, constitui um factor de extrema importância, tendo em vista que a compra de novos materiais contribui principalmente para a escassez dos recursos naturais (madeira). No caso particular das vigas de madeira, a escassez dos recursos naturais é provocada pela desflorestação das massas florestais.

Para além disso a comercialização de novas vigas de madeira também contribui para a poluição do meio ambiente, que é provocada pelo processo de fabrico desde a recolha da madeira, ao processo de transformação, até ao seu fornecimento e transporte. Ainda assim o transporte dos materiais antigos, desde os armazéns até às obras, também constitui um factor negativo a ter em conta, sendo em tudo vantajoso que esse armazém se localize nas proximidades da obra a decorrer.

É também importante destacar que o reaproveitamento dos resíduos de demolição, como é o caso da incorporação de vigas de madeira antigas nas técnicas de reabilitação, evita a acumulação e deposição dos resíduos de demolição em aterros para RCD, dando a estes outro destino final.

Na perspectiva de conservação do património, como já foi referido anteriormente neste capítulo, faz todo o sentido o reaproveitamento dos materiais antigos, pois um dos objectivos principais da reabilitação de edifícios antigos deve ser a de conservação do património e da cultura. No caso dos elementos de madeira para pavimentos ou coberturas, tem todo o interesse reaproveitar ou manter os materiais constituintes desses sistemas estruturais, pois por vezes existem situações em que a prioridade para o dono de obra consiste em manter o aspecto antigo dos materiais existentes numa determinada obra; no entanto nem sempre é possível conservar os materiais na própria obra, pois estes na maior parte das vezes já não têm condições para desempenhar as suas funções estruturais. Nestas situações é mesmo necessário fazer a substituição desses materiais e para isso deve-se recorrer a materiais antigos com a mesma idade e as mesmas características dos originais, de modo a conservar o aspecto original que é reivindicado pelo dono de obra.

Embora já existam tratamentos de madeira que podem imitar o aspecto antigo dos elementos de madeira, nem sempre é possível obter a qualidade da madeira antiga.

É ainda importante referir que a melhor forma de reaproveitar os materiais antigos é fazer a sua reutilização no próprio local da obra a decorrer, pois a logística e o valor podem ser questionados quando os materiais são adquiridos de estâncias ou de fabricantes e não do próprio edifício.

Do ponto de vista técnico, é sempre importante garantir a compatibilidade dos materiais e das técnicas a utilizar com os materiais originais; nesse aspecto o reaproveitamento dos materiais antigos satisfaz em grande parte esse requisito. A exigência da durabilidade dos materiais a colocar nos edifícios antigos é também um aspecto a ter em conta, o que na maioria das situações os materiais antigos conseguem garantir desde que mantenham as suas propriedades físico-mecânicas intactas ou pelo menos pouco alteradas.

Nas listas que se seguem é feita uma síntese de algumas vantagens e desvantagens em realizar o reaproveitamento de materiais antigos (em particular de vigas de madeira) em técnicas de reabilitação estrutural de edifícios antigos.

- ***Vantagens:***

- Em alguns casos o reaproveitamento é menos dispendioso do que o recurso a vigas de madeira novas, excluindo o custo de transporte, de equipamento e materiais complementares (como seja por exemplo elementos metálicos de ligação). Estando este aspecto dependente dos preços estabelecidos por cada fornecedor bem como da secção de viga disponível;
- Diminuição da poluição do meio ambiente;
- Redução da desflorestação;
- Conservação do património histórico-cultural;

-
- **Vantagens (continuação):**
 - Compatibilização da idade dos elementos antigos com o edifício;
 - Boa resistência mecânica dos materiais antigos nos casos em que estes são removidos em condições a partir dos locais originais;
 - Compatibilidade com os materiais existentes, possibilitando em grande parte a não alteração da rigidez dos materiais e do comportamento estrutural.
 - **Desvantagens:**
 - Dificuldade na aquisição de materiais com boa resistência mecânica devido a algumas adversidades na remoção e transporte destes materiais a partir dos locais originais;
 - Necessidade em certificar a qualidade dos materiais antigos a reutilizar.

4.5 Exemplos de Obras de Reabilitação

4.5.1 Considerações gerais

Apresentam-se na presente secção obras de reabilitação estrutural que têm particular interesse para o presente trabalho. As fotografias não referenciadas bibliograficamente foram tiradas pelo autor após a visita às respectivas obras. As restantes fotografias são da responsabilidade das fontes mencionadas nas referências bibliográficas.

Destacam-se na lista abaixo as obras que são descritas na presente secção:

- **Obras com incorporação de resíduos de demolição na reabilitação**
 - Casa de Santa Maria (em Cascais)
 - Edifício na Rua Victor Cordon (em Lisboa)
 - Igreja do Convento de S. Francisco (em Santarém)
- **Obras sem aproveitamento de resíduos de demolição**
 - Torre Sineira Sul do Palácio Nacional de Mafra (em Mafra)
 - Museu de Arte Popular (em Belém)

4.5.2 Obras com incorporação de resíduos de demolição na reabilitação

Casa de Santa Maria (em Cascais)

Nesta obra a cobertura de madeira existente no edifício foi reparada mantendo a sua forma e tipologia, conservando no próprio local uma grande parte dos elementos estruturais que se encontravam em bom estado, e recuperando ou reforçando outros elementos que se encontrassem num estado de degradação avançado e que não garantiam a estabilidade da cobertura no seu futuro. Sempre que possível foram reaproveitados elementos originais ou partes sãs dos mesmos para a recuperação de outros troços da cobertura.



(a) – vista geral do edifício; (b) – vista nascente da cobertura a ser reabilitada; (c) – vista sul da cobertura a ser reabilitada; (d) – vista poente da cobertura a ser reabilitada

Figura 4.9 – Obra de reabilitação estrutural na cobertura da Casa de Santa Maria

Edifício na Rua Victor Cordon (em Lisboa)

Nesta obra foi feita o desmonte integral do interior do edifício. No processo de demolição foram seleccionados e armazenados alguns materiais para serem reutilizados, tais como: elementos cerâmicos (telhas) utilizados no preenchimento de frontais; elementos pétreos utilizados na reconstrução de troços de alvenaria; vigamentos de madeira recuperados cujas secções em bom estado voltaram a ser reutilizadas.



(a) – vista geral do reforço das paredes periféricas no interior do edifício; (b) – nova estrutura interior do edifício (novas paredes de frontal e novo pavimento); (c) – reutilização de secções de vigas de madeira em bom estado; (d) – preenchimento dos frontais com telhas cerâmicas da cobertura

Figura 4.10 – Obra de reabilitação estrutural num edifício na Rua Victor Cordon [91]

Igreja do Convento de S. Francisco (em Santarém)

Em detrimento das condições de segurança deficitárias de alguns elementos estruturais (paredes resistentes e estruturas dos arcos) da Capela-Mor da Igreja do Convento de S. Francisco em Santarém, foi necessário proceder-se ao recalçamento das fundações desses elementos.

Foram realizadas sondagens arqueológicas no interior (ex: Capela-Mor) e exterior do Convento que ficaram abertas durante um período de cerca de 15 anos e que por isso provocaram o descalçamento das fundações das paredes resistentes da Capela-Mor, levando conseqüentemente ao agravar dos problemas de instabilidade que o edifício já tinha. Na sequência da observação destes problemas, a Igreja foi intervencionada, o que levou à reconstrução das fundações com elementos pétreos originais de outras estruturas existentes no próprio Convento, bem como de outras estruturas provenientes de outros edifícios com o mesmo tipo de elementos pétreos. Na figura 4.11 (d) pode ser observada uma fundação reconstruída com esses elementos pétreos aproveitados de outros locais.



(a) – vista geral do Convento; (b) – vista das sondagens arqueológicas deixadas em aberto; (c) – vista de fundação e respectiva parede resistente; (d) – pormenor de fundação reconstruída com elementos pétreos aproveitados

Figura 4.11 – Intervenção estrutural a fundações da Igreja do Convento de S. Francisco em Santarém

4.5.3 Obras sem aproveitamento de resíduos de demolição

Torre Sineira Sul do Palácio Nacional de Mafra (em Mafra)

A visita à Torre Sineira Sul do Palácio Nacional de Mafra ocorreu após ter sido feita a intervenção à estrutura de suporte do carrilhão da mesma. O carrilhão da Torre Sul tem 52 sinos existindo ainda mais 7 sinos soltos, sendo 4 de bamboar e 3 das horas do relógio, sendo que o conjunto dos sinos pertencentes ao carrilhão pesa mais de 200 toneladas. A estrutura de suporte do carrilhão é constituída por madeira, em geral da espécie Sucupira (*Bowdichia Guianensis*). Esta encontra-se num estado de degradação tal que foi necessário fazer uma intervenção *in extremis* de modo a escorar, provisoriamente, a mesma até ser totalmente reparada em definitivo. Esta intervenção consistiu em construir uma estrutura metálica que pudesse sustentar de forma provisória a estrutura de suporte de madeira existente. Foram colocados apoios (vigas) intermédios em madeira na ligação entre a estrutura existente e a estrutura metálica provisória. Esta estrutura metálica provisória será retirada aquando da realização do restauro de toda a estrutura de suporte do carrilhão [69].

A última grande obra de reabilitação da estrutura de suporte do carrilhão foi em 1986. Em seguida são descritos, de forma sucinta, os trabalhos de restauro que foram realizados em 1986 [21]:

- procedeu-se primeiramente ao escoramento geral dos sinos, através duma estrutura metálica;
- em seguida tratou-se de consolidar a estrutura de madeira; para este efeito foram retirados os elementos que se encontravam muito degradados e substituídos integralmente por outros. Nestes casos foi necessário recorrer-se também a um escoramento prévio;
- foi efectuado, na maioria dos casos e sempre que possível, um tratamento das madeiras recorrendo a uma massa composta de serradura de madeira de carvalho e resina epóxida preenchendo as fendas;
- foram substituídas peças em alguns troços da estrutura através de empalmes com recurso a madeira de pinho bravo e resinas epoxídicas;
- aplicou-se nas peças de madeira uma demão de tinta betuminosa de protecção e uma segunda demão com tinta tradicional, à base de óleo de linhaça, fezes de ouro e óxido de ferro;
- por fim substituíram-se integralmente as ferragens de suporte e ligação da estrutura de madeira, dado o seu estado avançado de corrosão.

O estado actual de degradação da estrutura de suporte do carrilhão deve-se essencialmente à proximidade do oceano (especialmente na Torre Sul em comparação com a Torre Norte) e à franca exposição às intempéries. Estes factores levam ao aparecimento de infiltrações, condensações, ataques de fungos e insectos xilófagos, entre outros, que naturalmente provocam a degradação profunda da estrutura. A utilização na reparação recente de 1986 de madeira não adequada ao uso como é o caso do pinho bravo e a utilização de resina epoxídica sem respeito pelas normas de aplicação, também conduziu à degradação das peças de madeira da estrutura do carrilhão [21, 69].

É necessário então recorrer à reparação total desta estrutura através da substituição integral de algumas peças de madeira com elevado grau de deterioração e reparação de alguns troços mediante a aplicação de empalmes. Com vista a preservar o aspecto original da estrutura e de modo a ser utilizada madeira com elevada resistência é recomendável que se empregue madeira de Sucupira (D50 segundo a norma EN 338:2009 [27]) e até se possível madeira antiga desta espécie já utilizada noutros edifícios antigos. Na figura 4.12 encontram-se imagens actuais da estrutura de suporte do carrilhão da Torre Sineira Sul, após a visita à intervenção que foi feita, e anteriormente descrita.



(a) – representação esquemática da estrutura de suporte [69]; (b) – estrutura metálica a sustentar um sino;
(c) – estrutura metálica a sustentar a estrutura de suporte de madeira; (d) – pormenor da cruz da estrutura de suporte de madeira

Figura 4.12 – Intervenção na estrutura de suporte de madeira do carrilhão da Torre Sineira Sul

Museu de Arte Popular (em Belém)

Nesta obra, a estrutura de madeira da cobertura existente foi totalmente restaurada. Houve necessidade de reparar e substituir peças e elementos muito danificados e os reforços estruturais consistiram essencialmente em intervenções em nós das asnas e na criação de travamentos transversais de ligação entre asnas, destinados a assegurar a estabilidade global destas estruturas de cobertura.

Houve também a necessidade de reforço complementar de alguns elementos das asnas de modo a que a estrutura possa suportar adequadamente às solicitações impostas pelo peso proveniente da colocação de passareiras no desvão das coberturas e às correspondentes sobrecargas de uso. Estas passareiras garantem, por sua vez, o acesso a toda a estrutura da cobertura para tarefas de manutenção.



(a) – asnas da estrutura da cobertura; (b) – linha de asna reforçada na ligação com a perna;
(c) – pormenor de ligação de duas peças estruturais; (d) – emendas entre peças de madeira da estrutura

Figura 4.13 – Intervenção na estrutura de madeira existente no Museu de Arte Popular

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Síntese final

Neste trabalho pretendeu-se apresentar uma perspectiva alargada sobre a reabilitação de edifícios antigos, expondo-se situações que podem levar ao reaproveitamento dos resíduos de demolição, provenientes do edifício a reabilitar ou de outros edifícios com a mesma tipologia construtiva, em técnicas de reabilitação de paredes, pavimentos e coberturas de edifícios antigos. Com base nesse pressuposto, o trabalho foi desenvolvido nas seguintes etapas principais:

- Estudo das fundações e paredes dos edifícios antigos de alvenaria de pedra, caracterizando-os quanto às suas soluções construtivas, às anomalias e técnicas de reabilitação estrutural. Para tal, foi efectuada uma pesquisa bibliográfica que permitiu aprofundar conhecimentos de base necessários à realização do trabalho e compreensão do tema.
- Estudo dos pavimentos e coberturas dos edifícios antigos de alvenaria de pedra, caracterizando-os quanto às suas soluções construtivas, às anomalias e técnicas de reabilitação estrutural. Para tal, foi efectuada uma pesquisa bibliográfica que permitiu aprofundar conhecimentos de base necessários à realização do trabalho e compreensão do tema.
- Estudo das possibilidades de incorporação dos resíduos de demolição em técnicas de reabilitação estrutural de edifícios antigos de alvenaria de pedra.
- Avaliação económica, ambiental e patrimonial da incorporação dos resíduos na reabilitação estrutural de edifícios antigos.
- Apresentação de uma série de exemplos de obras de reabilitação com e sem aproveitamento de resíduos de demolição.

A avaliação efectuada permitiu retirar conclusões acerca da viabilidade, em termos técnicos, económicos, ambientais e patrimoniais, da utilização de resíduos de demolição na reabilitação estrutural de edifícios antigos de alvenaria de pedra.

O trabalho desenvolvido afigurou-se algo complexo devido à diversidade das técnicas de reabilitação estrutural existentes para os edifícios antigos de alvenaria de pedra, bem como da variabilidade de secções e preços de materiais existentes no mercado.

A estruturação dos Capítulos 2 e 3 facilitou a selecção das técnicas de intervenção com possibilidade de incorporação de resíduos de demolição provenientes de obras de reabilitação.

5.2 Conclusões e comentários finais

Além da construção de novos edifícios e outras estruturas, também a reabilitação estrutural de edifícios antigos contribuem para a acumulação de RCD, sendo que no caso particular da reabilitação estrutural de edifícios antigos é gerado uma grande percentagem de resíduos provenientes das demolições que ocorrem nas obras de reabilitação.

O conhecimento das características dos principais elementos construtivos dos edifícios antigos e das técnicas de reabilitação estrutural aplicadas nestes elementos permite fazer a correcta selecção das técnicas de intervenção que podem incorporar resíduos de demolição e também fazer a escolha dos materiais antigos mais adequados para essa incorporação.

A listagem das técnicas de reabilitação estrutural e a avaliação económica, ambiental e patrimonial efectuada na presente dissertação permitiu obter algumas conclusões relativas às possibilidades de incorporação de resíduos de demolição na reabilitação de edifícios antigos de alvenaria de pedra, que se encontram sintetizadas nos parágrafos seguintes.

Para a implementação de técnicas de intervenção com recurso a resíduos de demolição, tais como materiais antigos provenientes do edifício a reabilitar ou de outros edifícios com a mesma tipologia construtiva, pode ser necessário que o projectista se certifique da capacidade resistente dos materiais antigos aplicados na obra, através da requisição de ensaios a amostras desses materiais. É importante salientar que algumas condições técnicas, dos materiais e técnicas a implementar, são importantes para o correcto desempenho dos sistemas estruturais reabilitados.

Na reabilitação estrutural de paredes e fundações de edifícios antigos de alvenaria de pedra, o aproveitamento e reutilização de materiais ou elementos construtivos originais (resíduos de demolição) já utilizados na construção das estruturas é muito limitado devido à dificuldade que existe em consolidar ou reforçar paredes e fundações sem que sejam utilizados materiais novos. Isto porque a alvenaria de pedra irregular, que constitui as paredes resistentes e as fundações, apresenta muito fraca capacidade resistente à tracção, fraca resistência ao esforço transversal e alguma resistência à compressão, não sendo por isso um material adequado para ser reaproveitado no reforço e consolidação dos elementos construtivos dos edifícios antigos. Por outro lado, o mesmo problema já não acontece para os pavimentos e as coberturas, uma vez que estas estruturas antigas são constituídas

na sua maioria por madeira, que é um material que, quando se encontra em bom estado e mantém a qualidade sem danos significativos na sua estrutura, pode ser aproveitada para a reabilitação estrutural, pois consegue manter níveis aceitáveis de resistência à flexão e ao esforço transversal. Existe assim uma técnica de reabilitação estrutural de paredes e fundações de edifícios antigos de alvenaria de pedra (desmonte e reconstrução) com possibilidade de incorporação de resíduos de demolição, enquanto para os pavimentos e coberturas existem diversas técnicas de intervenção com essa possibilidade, que se encontram descritas no Capítulo 4.

A estimativa de custos efectuada no Capítulo 4 permitiu retirar algumas conclusões relevantes.

Ao nível da reabilitação de paredes, pôde-se concluir, de acordo com os dados obtidos, que o desmonte e a reconstrução de elementos de cantaria junto a uma abertura de janela com recurso ao aproveitamento de pedras de cantaria antigas, constitui o cenário mais económico comparando com a mesma intervenção mas com materiais novos. Já ao nível da reabilitação de pavimentos e coberturas, concluiu-se, de acordo com os dados obtidos, que o custo total para uma solução de desmonte e reconstrução dum pavimento de madeira, contabilizando apenas com o custo dos materiais (neste caso as vigas de madeira), varia muito consoante o fornecedor dos materiais, bem como da secção dos mesmos e da dimensão dos pavimentos. Assim para a reconstrução de um pavimento cujo vão das vigas é de 3m, o recurso a vigas de madeira novas afigurou-se o cenário mais económico. Por outro lado, o mesmo não aconteceu para a reconstrução de um pavimento cujo vão das vigas é de 4,5m, sendo nesta situação o recurso a vigas de madeira antigas o cenário que se apresentou mais económico. Estas variações de estimativas de custos devem-se essencialmente à variabilidade de preços que se obtém em fornecedores que vendem vigas de madeira antigas.

É importante ainda destacar as vantagens económica, ambiental e patrimonial em adquirir os elementos antigos na própria obra de reabilitação para posterior aproveitamento desses materiais na mesma obra. No entanto sempre que isso não seja possível, deve-se recorrer a armazéns ou estâncias de materiais o mais próximo possível da obra para reduzir o custo e tempo de transporte e que tenham preços mais competitivos.

O aproveitamento dos materiais antigos reduz a escassez dos recursos naturais, a poluição do meio ambiente, evita a acumulação de RCD em aterros, conserva o valor patrimonial dos edifícios e conduz à compatibilidade dos materiais existentes e das técnicas implementadas. Por outro lado, nem sempre é possível adquirir os materiais com a mesma resistência mecânica que se desejaria devido à dificuldade em desmantelar os materiais em condições. Também nem sempre é possível adquirir os materiais com o valor patrimonial que se pretende na obra, existindo também a dificuldade no desmonte e reconstrução de alguns elementos estruturais e, por fim, nem sempre se consegue obter as dimensões e as características dos elementos pretendidos para o fim em vista.

5.3 Desenvolvimentos futuros

Apresentam-se de seguida algumas sugestões que se julga serem pertinentes para o desenvolvimento futuro da investigação:

- Efectuar ensaios experimentais de elementos estruturais reconstituídos através duma técnica de reabilitação que faça a incorporação de resíduos de demolição. Por exemplo ensaiar um elemento estrutural de madeira reconstituído através da aplicação de um empalme com recurso a elementos antigos de madeira.
- Efectuar estimativas de custos para outras soluções estruturais que incorporem resíduos de demolição. Por exemplo fazer a estimativa de custos de uma substituição de elementos de madeira degradados por novos elementos através de empalmes com recurso a materiais novos e materiais antigos (resíduos de demolição).
- Realização de estudos sobre a adaptabilidade de novas técnicas de reabilitação estrutural com incorporação de resíduos de demolição em obras de reabilitação. Mais concretamente poderão estudar-se mais técnicas de reabilitação estrutural em paredes e fundações com possibilidade de aproveitamento de resíduos de demolição.
- Efectuar um estudo económico que compare os custos decorrentes da conservação/intervenção parcial de elementos estruturais com a substituição total desses elementos, na obra de reabilitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AFONSO, João – *Estudo do comportamento térmico de edifícios antigos – Caso de estudo*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, 2009.
- [2] ALMEIDA, João - *Estudo de soluções estruturais para reabilitação de edifícios em alvenaria de pedra*. Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.
- [3] APPLETON, João - *Reabilitação de edifícios antigos - Patologias e tecnologias de intervenção*. Amadora, Edições Orion, 2003.
- [4] ARRIAGA, Francisco *et al.* – *Intervención en estructuras de madera*. Madrid, AITIM, 2002.
- [5] BAIÃO, Manuel *et al.* – *Aspectos da reabilitação de edifícios antigos de alvenaria*. CIREA 2012, Lisboa, 2012.
- [6] BARROS, Joaquim – *Materiais compósitos no reforço de estruturas*. Jornadas de Engenharia Civil 2004, Guimarães, 2004.
- [7] BRANCO, Jorge *et al.* – *Asnas de madeira – a importância da rigidez das ligações*. 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, págs. 1-2, LNEC, Lisboa, 2006.
- [8] BRANCO, Jorge *et al.* – *Asnas tradicionais de madeira : evolução, comportamento e reforço com materiais compósitos*. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série 2:3 (Maio 2008) 5-18, 2008.
- [9] COELHO, Silvério - *Tecnologia de Fundações*. Edições EPGE - Escola Profissional Gustave Eiffel, 1^a Edição, Setembro, 1996.
- [10] COSTA, F. Pereira da - *Enciclopédia prática da construção civil - pavimentos de madeira*. Portugália Editora, Lisboa, 1955.
- [11] COSTA, Luís - *Tipificação de soluções de reabilitação de pavimentos estruturais em madeira em edifícios antigos*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2009.
- [12] CÓIAS, Vítor – *O habitat do futuro inserido no património construído: desafios e oportunidades para o sector da reabilitação*. Workshop de GECORPA – Grémio do Património, Lisboa, 2006.

- [13] CÓIAS, Vítor – *Reabilitação estrutural de edifícios antigos*. Lisboa, Argumentum Editora, 2007.
- [14] CROCI, Giorgio – *General methodology for the structural restoration of historic buildings: the cases of the Tower of Pisa and the Basilica of Assisi*. Journal of cultural heritage 1, 7 - 18, 2000.
- [15] CRUZ, Helena – *Patologia, avaliação e conservação de estruturas de madeira*. II Curso Livre Internacional de Património, Santarém, 2001.
- [16] CRUZ, Helena; CUSTÓDIO, João - *Exposição de estruturas de madeira reforçadas por colagem a temperaturas de serviço elevadas* – Patorreb 2006, Porto, 2006.
- [17] CRUZ, Helena; MACHADO, José Saporiti; *et al.* *Madeira para Construção – M1: Especificação de Madeiras para estruturas*. LNEC, Lisboa, 1997.
- [18] CRUZ, José – *Deterioração, reparação e reforço de estruturas de madeira*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1993.
- [19] Decreto-Lei nº 239/97. Diário da República – I Série-A, nº 208, 9 de Setembro de 1997.
- [20] Decreto-Lei nº. 220/2008, Diário da República – 1.ª série, nº 220, 12 de novembro de 2008.
- [21] DGEMN - *Os Carrilhões de Mafra*. Edição Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais e Instituto Português do Património Cultural, 1989.
- [22] DIAS, Tiago – *Pavimentos de madeira em edifícios antigos – Diagnóstico e intervenção estrutural*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2008.
- [23] DIONÍSIO, Amélia; BARROS, Luís *et al.* – *A degradação das rochas do património cultural construído – o caso das rochas carbonatadas*. Boletim Química SPQ, Nº 93, págs. 61-68. Sociedade Portuguesa de Química, 2009.
- [24] DOLCE, Mauro; MARNETTO, Roberto – *Il rafforzamento delle strutture murarie – il sistema di cuciture attive la muratura CAM*. TIS S.p.A, Novembre 2000.
- [25] DRDÁCKÝ, Miloš – Presentations Prepared for the SAHC Msc, 2007.
- [26] EN 1995-1-1:2004 + A1:2008 – Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1. European Committee for Standardization CEN, Brussels, 2008.
- [27] EN 338:2009 – Structural timber - Strength classes. Instituto Português da Qualidade, 2009.

- [28] EU-India ALA/95/23/2003/077-122 - *Identification of strengthening strategies*. EU-India Economic Cross Cultural Programme, Improving the seismic resistance of cultural heritage buildings, Outubro, 2006.
- [29] FARIA, Maria Paulina – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas - Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2004.
- [30] FERREIRA, Nuno - *Técnicas de ligação pavimentos/paredes em reabilitação de edifícios antigos*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2009.
- [31] FIORELLI, Juliano – *Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira*. Dissertação de mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- [32] FLÓRIDO, Flávio – *Tipificação de soluções de reabilitação de paredes de madeira em edifícios antigos*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [33] GUERREIRO, Luís; AZEVEDO, João - *Reabilitação e reforço da torre do relógio em Santarém*. Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas – JPEE 98, pp.507-515, 1998.
- [34] HENRIQUES, Fernando - *Humidade em paredes*. Lisboa: Coleção Edifícios. LNEC, 1994.
- [35] HOIRISCH, Marisa *et al.* - *Restoration of wood structures of Federal University of Rio de Janeiro*. Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, 2006.
- [36] ICOMOS - *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*. Paris, Setembro, 2001.
- [37] ISCARSAH (International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage) Comissão (ICOMOS) - *Principles for the Preservation of Historic Timber Structures* adaptado pelo ICOMOS na 12ª Assembleia Geral, Cidade do México, 1999.
- [38] JOHNSON, Sidney - *Deterioration, maintenance, and repair of structures*, Krieger Publishing Company, Florida, 1980.
- [39] LANDA, Mikel – *Comportamiento de las unions encoladas para la reparacion de elementos estructurales de Madera que trabajan a flexión*. Universidade de Navarra, Navarra, 1997.

- [40] LANDA, Mikel - *Nuevas técnicas de reparacion de estructuras de madera. Elementos flexionados. Aporte de madera – Unión encolada I. Metodología de puesta en obra*. Revista de Edificación, nº28, Pamplona, 1999.
- [41] LOPES, Miguel – *Tipificação de soluções de reabilitação de estruturas de madeira em coberturas de edifícios antigos*. Dissertação de mestrado em Reabilitação do Património Edificado, Universidade do Porto, Porto, 2007.
- [42] MACHADO, José Saporiti; MONTEIRO, Gilda - *Madeira para Construção – M4: Casquinha*. LNEC, Lisboa, 1997.
- [43] MARRADI, Paolo *et al.* – *Recupero di strutture in legno mediante armature parzialmente presollecitate - Il restauro del legno, Vol. I*. Nardini Editore, Firenze Italia, Págs. 241-247, 1989.
- [44] MELI, Roberto - *Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos*. Fundación ICA, México, 1998.
- [45] MESSINA, Claudio *et al.* – *Il recupero statico delle strutture in legno nel Teatro Niccolini di San Casciano di Pesa – Il restauro del legno, Vol. I*. Nardini Editore, Firenze Italia, Págs. 201-208, 1989.
- [46] MÉTODO REHABIMED – *Arquitectura tradicional mediterránea II – Rehabilitación el edificio*. Herramienta 8 – Las técnicas de rehabilitación: reforzar las estructuras, Barcelona, 2007.
- [47] METTEM, Christopher – *Repair of structural timbers. Part I – Test on experimental beam repairs*. TRADA, Reino Unido, 1993.
- [48] MOREIRA, Marina - *Reabilitação de estruturas de madeira em edifícios antigos – Caso de estudo*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. FEUP, Porto, 2009.
- [49] NEVES, Manuel - *Técnicas de Recalçamento e Reforço de Fundações*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.
- [50] NP 180:1962 – Anomalias e defeitos da madeira. Instituto Português da Qualidade, 1962.
- [51] NP EN 350-1:2008 - Durabilidade de madeira e de produtos derivados. Durabilidade natural da madeira maciça. Parte 1: Guia dos princípios de ensaio e classificação da durabilidade natural da madeira. Instituto Português da Qualidade, 2008.
- [52] PAIVA, José *et al.* – *Patologia da construção – Documento introdutório do tema*. 1º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios de Habitação, LNEC, Lisboa, 1985.
- [53] PAULA, Raquel; CRUZ, Helena – *Reabilitação pouco intrusiva de vigas de madeira – um caso de estudo*. Patorreb 2006, Porto, 2006.

- [54] PAULO, Raquel Sofia – *Caracterização de argamassas industriais*. Dissertação de Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.
- [55] PICCIRILLI, Carmen - *Consolidamento Critico. Premesse Storico-Strutturali*. Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Bonsignori Editore, 1996.
- [56] PINHO, Fernando - *Paredes de alvenaria ordinária – Estudo experimental com modelos simples e reforçados*. Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, 2007.
- [57] PINHO, Fernando – *Paredes em edifícios antigos em Portugal*. Lisboa, Coleção Edifícios. LNEC, 2008.
- [58] PINTO, Luís – *Inventory of repair and strengthening methods timber*. Master’s Thesis, Universidade Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2008.
- [59] Portaria n.º 209/2004. Diário da República – I Série-B, n.º53, 3 de Março de 2004.
- [60] Portaria n.º. 1532/2008. Diário da República - 1.ª série, n.º 250, 29 de dezembro de 2008.
- [61] REIS, Maria de Lurdes *et al.* – *Técnicas de reabilitação de estruturas de madeira*. Patorreb, Porto, 2006.
- [62] RODRÍGUEZ, Ferdinand - *Principles of polymer systems*. 2ª Edição, Washington DC, Hemisphere, Publishing Corporation, 1982.
- [63] RODRIGUES, Jorge – *Principais técnicas de consolidação e reforço de paredes de edifícios antigos*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, 2010.
- [64] ROQUE, João – *Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2002.
- [65] ROQUE, João; LOURENÇO, Paulo - *Técnicas de intervenção estrutural em paredes antigas de alvenaria*. Construção Magazine, vol. 7, págs. 4-10, Outubro 2003.
- [66] ROTAFIX – Resiwood Systems - *Estimating for timber resin repairs, the practical solution to building problems*. ROTAFIX, 1998.
- [67] RUIVO, João; VEIGA, João - *Resíduos de construção e demolição: Estratégia para um modelo de gestão*. Trabalho final de curso, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2004.

- [68] SEGURADO, João - *Trabalhos de carpintaria civil - Biblioteca de Instrução Profissional*. Livraria Bertrand, Lisboa, 1942.
- [69] SERAFIM DA SILVA JERÓNIMO & FILHOS, LDA – *Relatório do diagnóstico das patologias dos carrilhões do Palácio Nacional de Mafra*. Braga, JERÓNIMO – sinos, relógios de torre e órgãos, 2005.
- [70] STĂNILĂ, Oana *et al.* – *Timber elements – traditional and modern strengthening techniques*. Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi” din Iași, Tomul LVI (LX), Fasc. 3, 2010.
- [71] TAMPONE, Gennaro *et al.* – *Rinforzo di puntoni e consolidamento di una capriata del teatro di Sateano mediante centine metalliche – Il restauro del legno, Vol. I*. Nardini Editore, Firenze Italia, Págs. 299-305, 1989.
- [72] TEIXEIRA, Joaquim – *Descrição do sistema construtivo da casa burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX – Contributo para uma história da construção arquitectónica em Portugal*. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica, FAUP, Porto, 2004.
- [73] TOMAZEVIC, Miha - *Repair and strengthening of masonry buildings*. Earthquake-resistant design of masonry buildings, Series on innovation in structures and construction, vol.1, Imperial college press, London, 1999.
- [74] VALLUZZI, Maria - *Comportamento meccanico di murature consolidate con materiali e tecniche a base di calce*. Università di Padova, Itália, 2000.
- [75] VAZ, Nelson *et al.* – *Análise do comportamento de reforços exteriores de betão armado submetidos a elevadas temperaturas*. Congresso de construção metálica e mista, Lisboa, 2003.

Websites:

- [76] Website: http://www.aiccopn.pt/news.php?news_id=1043 - AICCOPN – Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas, *AICCOPN Reclama Dinamização de Mercado de Arrendamento e Reabilitação Urbana*. Consultado a 17/04/2011 às 15h.
- [77] Website: <http://www.a2p.pt/portfolio/projectos/edif-cio-sede-do-bpa> - A2P – Consult, Estudos e Projectos, Lda, *Projectos – Edifício Sede do BPA, Lisboa*. Consultado a 4/2/2012 às 22h.
- [78] Website: <http://www.bethlehemstonechurch.com/restoration-3> - BETHLEHEM STONE CHURCH – *Restoration – Bethlehem Stone Church, Tenth Legion, Virginia*. Consultado a 9/12/2011 às 19h22.
- [79] Website: <http://eol.org/pages/1037411/overview> - EOL – Encyclopedia of Life, *Anobium punctatum - furniture beetle*. Consultado a 9/10/2011 às 13h.

- [80] Website: <http://eol.org/pages/354761/overview> - EOL – Encyclopedia of Life, *Hylotrupes bajulus* - old house borer. Consultado a 9/10/2011 às 15h.
- [81] Website: [http://www.infopedia.pt/\\$calcite](http://www.infopedia.pt/$calcite) - INFOPÉDIA – Enciclopédia e Dicionários Porto Editora – *Calcite*. Consultado a 13/11/2011 às 16h45.
- [82] Website: <http://e-geo.ineti.pt/bds/ornabase/rocha.aspx?Id=102> - LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia - *ORNABASE* - Base de Dados do Catálogo de Rochas Ornamentais Portuguesas. Consultado a 12/11/2011 às 17h.
- [83] Website: http://policromiarestauro.blogspot.com/2007/12/trabalhos-realizados-2006_12.html - POLICROMIA - Policromia conservação e restauro, Lda – *Mosteiro Santa Maria de Alcobaça – 2006*. Consultado a 9/12/2011 às 16h10.
- [84] Website: <http://rotafix.co.uk/solutions-timbercrack.htm> - ROTAFIX - *Methods of repairing splits and fissures*. Consultado a 23/10/2011 às 17h30.
- [85] Website: http://www.moronline.pt/docs/01_DL210_2009.pdf - Decreto-Lei nº 210/2009. Diário da República – 1ª série, nº 171, 3 de Setembro de 2009. Consultado a 5/06/2012 às 17h.
- [86] Website: <http://www.moronline.pt/> - MOR online – *Mercado Organizado de Resíduos online*. Consultado a 5/06/2012 às 18h.
- [87] Website: <http://www.pontoverde.pt/index.html> - Sociedade Ponto Verde. Consultado a 5/06/2012 às 18h15.
- [88] Website: <http://www.ambigroup.com/> - Ambigroup. Consultado a 5/06/2012 às 18h30.
- [89] Website: <http://www.acap.pt/> - ACAP - *Associação Automóvel de Portugal*. Consultado a 5/06/2012 às 18h35.
- [90] Website: <http://www.semapa.pt/default.asp?detectflash=false> – Semapa. Consultado a 5/06/2012 às 18h50.

Créditos: Às empresas abaixo identificadas agradece-se os elementos de apoio cedidos e devidamente mencionados no texto.

- [91] A2P – Consult, Estudos e Projectos, Lda. - Elementos de projecto e registo fotográfico fornecidos pela empresa.
- [92] MONUMENTA – Conservação e Restauro do Património Arquitectónico, Lda. – Elementos de projecto e registo fotográfico fornecidos pela empresa.
- [93] OZ – Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda. - Elementos de projecto e registo fotográfico fornecidos pela empresa.

ANEXOS

Anexo I

Técnicas de reabilitação estrutural de fundações e paredes de edifícios antigos de alvenaria de pedra



Neste anexo descrevem-se as principais técnicas de reabilitação estrutural de fundações e paredes de edifícios antigos de alvenaria de pedra que são enumeradas na lista apresentada na secção 2.4.2 do Capítulo 2 da presente dissertação, excepto as técnicas que são descritas nesse mesmo capítulo.

Técnicas de reabilitação estrutural que são descritas neste anexo:

- ***Em fundações:***
 - Injecção da alvenaria da fundação
 - Injecção do terreno de fundação
 - Alargamento da base da fundação
 - Reforço de fundações com estacas e microestacas

- ***Em paredes:***
 - Injecção de caldas
 - Refechamento de juntas
 - Confinamento transversal simples
 - Tirantes
 - Reboco armado
 - Encamisamento
 - Pré-esforço vertical
 - Reforço com materiais compósitos
 - Gateamento de fendas com grampos metálicos

Em seguida descrevem-se as principais técnicas de reabilitação estrutural de fundações.

Injecção da alvenaria da fundação

O material das fundações de edifícios antigos encontra-se frequentemente desagregado devido a fenómenos como a percolação de águas subterrâneas e de águas residuais domésticas, em conjunto com a própria fragilidade dos materiais e técnicas construtivas, ou a problemas associados a assentamentos diferenciais significativos, que podem provocar fracturas e desagregação das alvenarias. Sempre que se verifique a desagregação da alvenaria é necessário procurar soluções que promovam a melhoria das características do material constituinte das fundações. Uma das soluções consiste na injecção de caldas com base em cimento ou em resinas que preencham as cavidades existentes [3], figura I.1.

As caldas mais utilizadas são constituídas à base de cimento, sendo as menos utilizadas as caldas especiais de silicatos de potássio ou de sódio, as caldas com base em resinas epoxídicas (pouco utilizadas devido ao seu elevado custo) e com base em resinas poliéster que têm vindo a ter aplicação significativa na consolidação de vazios e fracturas de alvenaria, sobretudo quando não se colocam

exigências especiais de resistência mecânica. As injeções são feitas por gravidade ou a baixa pressão (0,1 a 0,2 MPa), de modo a não serem provocados efeitos negativos na alvenaria existente [3].

Pode ainda ser feita a consolidação de fundações indirectas constituídas por estacas de madeira, através da reconstituição das secções degradadas (como as cabeças das estacas) mediante a injeção com caldas à base de resinas epoxídicas ou pela substituição dessas secções [3].

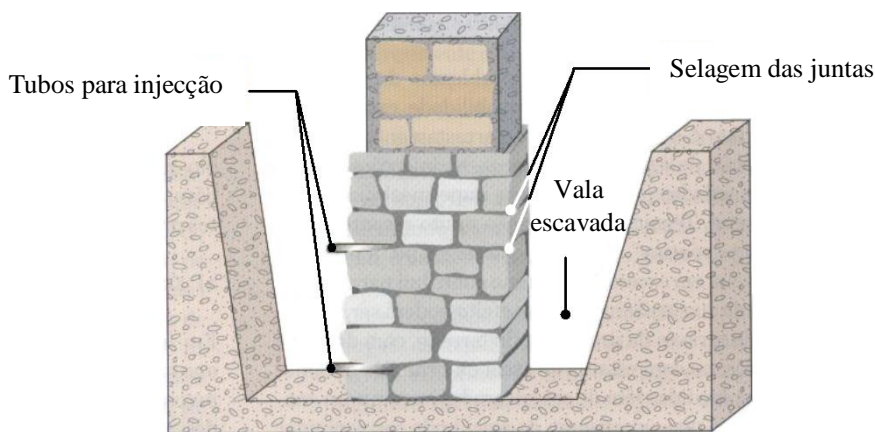


Figura I.1 – Representação esquemática da injeção da alvenaria da fundação [3]

Injecção do terreno de fundação

Sempre que exista necessidade de melhorar as capacidades resistentes do solo num terreno de fundação, é recomendável que se aplique uma injeção do terreno que é geralmente feita com caldas de injeção com base em cimento. No entanto a aplicação desta técnica pressupõe conhecimentos profundos acerca das propriedades dos terrenos e requer certas características de permeabilidade dos mesmos, já que a injeção se destina a melhorar as características do solo, fazendo com que o material de elevada resistência – calda de cimento – ocupe os vazios existentes no terreno.

A utilização de injeções, como é o caso da técnica de “jet-grouting” é empregada quando os problemas associados aos terrenos se relacionam com a permeabilidade excessiva destes e a possibilidade de arrastamento por percolação, assegurando assim uma efectiva impermeabilização do solo. A técnica de “jet-grouting” consiste, genericamente, na injeção sob pressão (entre 30 a 50 MPa) de calda de cimento no solo [3, 9].

Alargamento da base da fundação

Quando o terreno de fundação não dispõe de resistência suficiente para as solicitações impostas, pode-se optar pelo alargamento da área de contacto fundação – terreno. A insuficiência de largura da base de fundação pode dever-se a erros de concepção ou alterações das cargas transmitidas ao terreno.

Uma solução para este tipo de problemas consiste no recalçamento das fundações de alvenaria. No entanto trata-se duma operação complexa, em grande parte devido às elevadas cargas que os edifícios

antigos mobilizam ao nível das fundações. É então necessário que esta tarefa seja executada por troços, sucessivamente escavados e betonados, recorrendo a enchimentos de betão simples ou armado. Para reduzir as cargas transmitidas às fundações, nas zonas onde ocorre o recalçamento, deve realizar-se esta operação faseadamente, de ambos os lados da fundação e simultaneamente impor um escoramento parcial do edifício [3], figura I.2.

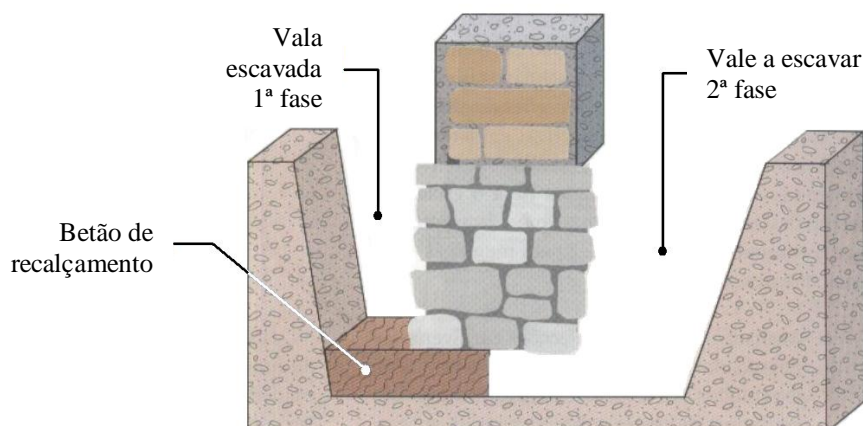


Figura I.2 – Representação esquemática do recalçamento numa fundação em alvenaria [3]

Em algumas situações, o recalçamento de fundações pode apresentar-se como uma solução de execução complexa, dependendo da natureza do solo. Assim em vez de se proceder ao recalçamento da fundação, pode-se optar por fazer o confinamento lateral das fundações, alargando-as em simultâneo, figura I.3. O alargamento é executado com recurso a pregagens laterais que reforçam a ligação entre o betão novo e a alvenaria antiga. Este alargamento será mobilizado para as cargas que actuam na parede, após a remoção de eventuais escoramentos. O efeito de confinamento nas fundações que se pretende pode ainda ser executado com recurso a furações e posteriores atravessamentos das alvenarias por lâminas de argamassa armada. Esta é uma alternativa que pode ser proveitosa quando ocorre também o reforço das paredes respectivas [3].

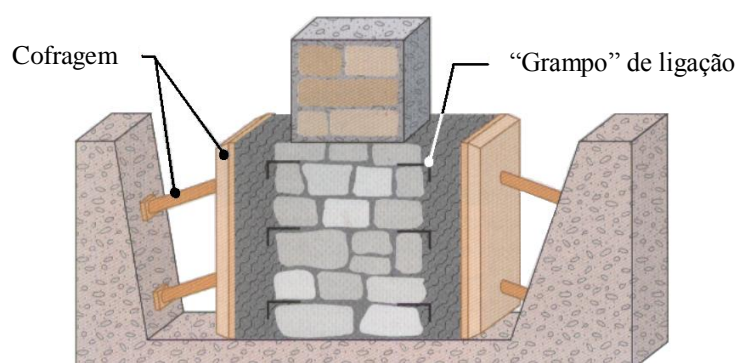


Figura I.3 – Representação esquemática do confinamento e alargamento numa fundação em alvenaria [3]

Reforço de fundações com estacas e microestacas

Quando o terreno de fundação apresenta uma capacidade resistente insuficiente e sempre que o reforço das camadas mais superficiais do terreno de fundação não seja viável, é necessário transferir as cargas de fundação para camadas mais profundas do terreno, com melhores características de resistência e deformabilidade. Para tal, os tipos de recalçamento mais usuais recorrem à execução de estacas metálicas, de madeira ou de betão armado, cravadas no solo ou moldadas, encabeçadas por vigas metálicas ou de betão armado, colocadas sob a fundação existente. Outra solução habitual passa pela utilização de microestacas, que se destaca das anteriores pela possibilidade de execução em espaços limitados e com reduzido diâmetro.

A implementação de soluções com recurso a estacas consiste na execução de travessas-carlingas que atravessem a fundação, e que servirão para o encabeçamento de estacas, previamente executadas em ambos os lados da fundação e o mais próximo possível desta, figura I.4.

A solução por microestacas é considerada uma fundação indirecta, que mobiliza estratos profundos do solo. As injecções sob pressão são executadas nas microestacas, a várias alturas ou apenas na ponta, provocando uma consolidação significativa do solo, fazendo a alteração das suas características de resistência mecânica, constituindo esta solução uma combinação de reforço do solo e da fundação [3, 49].

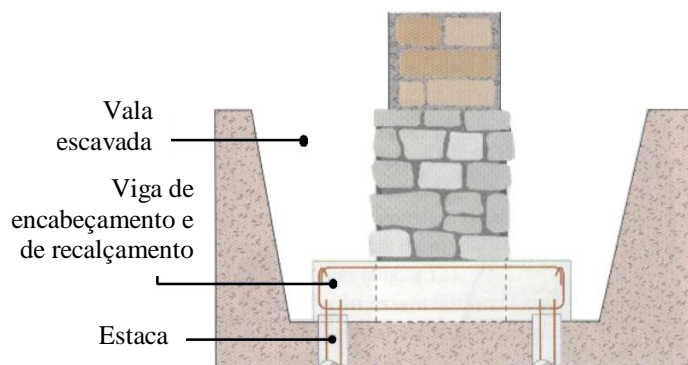


Figura I.4 – Representação esquemática do reforço de fundações com estacas [3]

No que segue descrevem-se as principais técnicas de reabilitação estrutural de paredes.

Injecção de caldas

Esta técnica é implementada essencialmente em paredes de alvenaria de pedra. Trata-se duma solução que é aplicada sempre que se encontrem vazios ou fendas nos paramentos exteriores e consiste na injecção duma calda fluida, através de tubos de injecção colocados em furos, ligeiramente inclinados para baixo, previamente efectuados na parede e criteriosamente localizados, figura I.5. A calda injectada tem como objectivo principal preencher todas as cavidades existentes no paramento, sejam elas pequenas fissuras ou vazios interiores, levando assim à melhoria da resistência à compressão da alvenaria através do seu confinamento, à melhor ligação entre os elementos e consequentemente a uma melhoria da sua coesão. Permite, em geral, uma qualidade e uma resistência mais uniforme da secção de alvenaria [13, 28, 46, 56, 63, 64].



Figura I.5 – Injecção de caldas [92]

A aplicação pode ser avaliada quanto à sua eficácia através de ensaios de ultrasons e/ou extracção de carotes. A eficácia desta técnica depende do índice de vazios da alvenaria, apresentando bons resultados para um índice de vazios compreendido entre 2 a 15% [56, 64].

Existem três tipos diferentes de soluções de injeções que são classificadas consoante o processo utilizado [63, 64]: injeção sob pressão, injeção por gravidade e injeção sob vácuo.

A injeção sob pressão é habitualmente utilizada em paredes de alvenaria, mesmo no caso de alvenarias degradadas, desde que as alvenarias tenham capacidade para conter o impulso da pressão aplicada. A injeção é feita através de tubos de adução, de baixo para cima e dos extremos para o centro de modo a prevenir desequilíbrios na estabilidade estrutural. Devem ser tidos em conta aspectos como a distribuição e o número de furos a efectuar, assim como a pressão de injeção a adoptar [63, 64].

A injeção por gravidade destina-se a paredes de alvenaria muito degradada, sendo feita através de tubos de adução que são inseridos nas fissuras e cavidades da parede. A injeção pode ainda ser efectuada mediante a utilização de seringas hipodérmicas que actuam em tubos preestabelecidos na parede. O processo de emissão da calda é realizado a partir do topo através das fendas e vazios [63, 64].

A injeção sob vácuo é indicada para o reforço de pequenos elementos arquitectónicos tais como pináculos e estátuas, sendo feita de baixo para cima através da aspiração do ar em tubos superiores, enquanto se injectam de calda os tubos inferiores, deste modo a calda irá ascender sob vácuo no interior das cavidades. Para este processo é necessário a utilização de caldas muito fluidas, como por exemplo as caldas com base em resinas orgânicas [64, 74].

No que diz respeito à composição da calda, esta depende do objectivo da intervenção e da compatibilidade com a alvenaria. As características da calda e a pressão a que esta deve ser injectada dependem dos elementos da parede (pedras, tijolo) e da dimensão dos espaços a serem preenchidos. A granulometria do material de enchimento depende directamente da dimensão das fendas ou cavidades existentes, sendo que em geral, são utilizadas caldas que resultam de combinações, em diversas proporções, de cimento, cal hidráulica, cal aérea e água. A utilização de produtos para injeção com base

em argamassas de ligante inorgânico não retráctil confere boa compatibilidade com as paredes antigas de alvenaria de pedra, são exemplos desses produtos as argamassas com base em cal aérea [46, 63, 64].

Quanto às vantagens e desvantagens, a injeção de caldas é uma técnica de intervenção sem reversibilidade, com alguma intrusividade e deve ser apenas efectuada utilizando materiais de injeção compatíveis com o material original. Contudo é uma solução que preserva o aspecto original das paredes, aumenta a resistência mecânica da alvenaria, bem como a sua rigidez e ductilidade [28, 64].

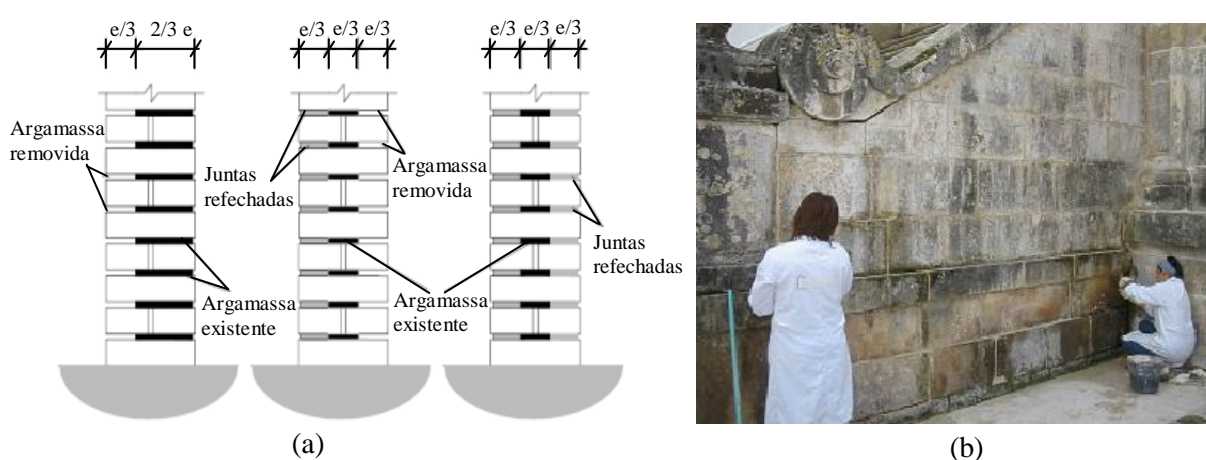
Refechamento de juntas

O refechamento de juntas é uma técnica utilizada em paredes de alvenaria de pedra cuja argamassa nas juntas esteja degradada ou apresente fracas condições devido à erosão e à acção da água. A acção da água constitui o principal agente de degradação da argamassa nas juntas ao longo do tempo [28, 64].

Esta técnica consiste na remoção parcial e substituição da argamassa das juntas nas paredes por nova argamassa, de modo a melhorar as características físicas e mecânicas, bem como a ligação entre os elementos da parede, a protecção das faces das paredes e o consequente aumento de estanquidade à água. A nova argamassa deve ter melhores propriedades mecânicas que a original, ter maior durabilidade e ser escolhida em função da finalidade e das condições de compatibilidade com o suporte [63].

A execução desta técnica pressupõe a realização das seguintes etapas [64]:

- remoção parcial da argamassa das juntas: extracção e limpeza da argamassa existente nas juntas. A intervenção pode ser feita em ambos os lados do paramento e nessa situação é feita a remoção nos dois lados, devendo a profundidade máxima não ultrapassar $1/3$ da espessura total, figura I.6 (a);
- lavagem das juntas abertas com água: limpeza das ranhuras abertas com água a baixa pressão, limitando a absorção da água da argamassa pelo suporte;
- reposição de argamassa nas juntas: preenchimento das ranhuras abertas com várias camadas de argamassa bem compactada desde a zona central até à superfície do paramento, figura I.6 (b).



(a) – representação esquemática da profundidade das juntas abertas (corte vertical) [73];

(b) – preenchimento das juntas com nova argamassa [83]

Figura I.6 – Refechamento das juntas

Confinamento transversal simples

O confinamento transversal da alvenaria é indicado a paredes de alvenaria com múltiplas folhas, cuja interligação seja deficiente ou fraca, conduzindo a uma melhoria da resistência à compressão da alvenaria e também da ligação entre os dois paramentos da parede. Esta técnica consiste no confinamento transversal da alvenaria que é realizado mediante a colocação de elementos metálicos (confinadores como varões roscados de aço inoxidável ou de aço corrente eficazmente protegido contra a corrosão) e de chapas de ancoragem (aço), em furos abertos transversalmente à espessura da parede. São usados elementos metálicos como os conectores em situações em que o comprimento dos varões é igual à espessura dos elementos estruturais a reforçar ou pregagens nos casos em que esse comprimento é inferior à espessura dos elementos a reforçar [13, 56].

Para se obter o efeito de confinamento da alvenaria são colocadas as chapas de ancoragem em aço nas extremidades dos conectores e das pregagens. As chapas são apertadas contra a alvenaria através da introdução de porcas. São usadas duas chapas por cada conector dum lado e doutro da parede e apenas uma chapa por cada pregagem [13, 56].

Os conectores são introduzidos em furos abertos perpendicularmente ao plano das paredes enquanto as pregagens são introduzidas em furos com inclinação e posteriormente preenchidos com caldas de injeção adequadas [13, 56].

O confinamento transversal pode ter outras variantes como é o caso das “pregagens – costura” que podem servir para assegurar a resistência à tracção ou melhorar a ligação entre paredes perpendiculares, ou o caso da técnica do “retículo cimentato” cujo confinamento transversal é realizado mediante um conjunto reticulado de barras (ou varões) de aço, inclinadas, em furos na alvenaria que posteriormente são injectados com caldas de injeção á base de cimento [56].

Em seguida são descritos com mais pormenor os modos de confinamento transversal em paredes de alvenaria de pedra.

- ***Pregagens transversais***

As pregagens são elementos muito utilizados no reforço de paredes de alvenaria de pedra em complemento com outras técnicas, figura I.7. A sua utilização, em intervenções extensas, pode modificar significativamente as propriedades mecânicas da alvenaria, aumentando a sua capacidade de resistência à compressão e também a esforços de tracção e corte [64].

Consiste na aplicação de varões metálicos ou de material compósito em furos de pequeno diâmetro, previamente abertos e criteriosamente localizados nas paredes, que posteriormente são selados por via química, quando a selagem é feita mediante a injeção de caldas de injeção apropriadas, por via mecânica quando os varões são ancorados no exterior das paredes ou em ambas as situações [65].

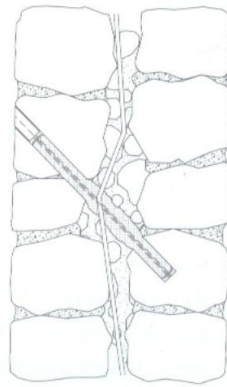


Figura I.7 – Representação esquemática de pregagem (corte vertical) [13]

- **Pregagens costura**

As pregagens costura aplicam-se em paredes de alvenaria que necessitem de melhorar a ligação entre paredes ortogonais ou aumentar a coesão dessas paredes, figura I.8. Esta intervenção de “costura” (pregagens de “costura”) resume-se à execução de pregagens, injectadas com caldas ou argamassas fluidas de selagem na interface entre os varões de aço e as furações previamente feitas na alvenaria. Em geral os varões são tirantes curtos de aço com protecção anti-corrosão e que podem ter maior comprimento (cerca de quatro metros) quando utilizados nas ligações em cumhal de parede, como por exemplo nas intersecções de duas paredes ortogonais [65].

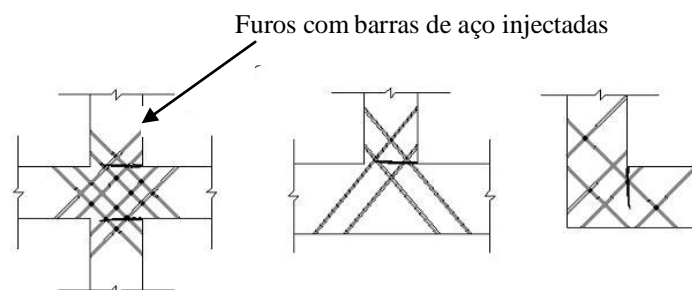


Figura I.8 – Representação esquemática de pregagens costura (secção transversal) [44]

Os sistemas comerciais mais recentes são constituídos por varões de aço inoxidável inseridos em mangas deformáveis, de poliéster com propriedades expansivas para adaptar-se ao perfurador e ao suporte (sistema *Cintec*), ou geotêxtil, onde é colocada a calda de selagem, evitando deste modo a dispersão das caldas de injeção no interior da parede e permitindo assim a adaptação às irregularidades das furações [13, 63].

Esta técnica é muito utilizada no reforço sísmico e na reparação de danos devidos a assentamentos diferenciais de fundações e a sismos, pois os tirantes curtos de aço atravessam os planos de intersecção entre paredes ortogonais, garantindo-se a ancoragem das extremidades desses varões em paredes diferentes, concedendo à estrutura melhorias na resposta face a acções estáticas e dinâmicas [3].

- **Reticolo cimentato**

Esta técnica consiste no confinamento transversal que é realizado mediante a introdução na alvenaria de um conjunto reticulado de barras ou varões de aço, dispostos em direcções cruzadas, em furações executadas na parede e posteriormente injectadas com caldas à base de cimento, figura I.9.



Figura I.9 – Representação esquemática do reforço de alvenaria com recurso à técnica do reticolo cimentato (corte vertical) [3]

Trata-se duma solução que permite alterar local ou generalizadamente, as características mecânicas do próprio material, através da introdução de elementos que conferem uma maior capacidade de resistência à tracção e corte, bem como uma melhoria significativa da resistência à compressão da alvenaria através do seu confinamento [3, 56].

- **Conectores**

A utilização de conectores em toda a secção da parede, tem como objectivo principal confinar a secção transversal das paredes, especialmente em paredes compostas, melhorando a ligação entre os dois paramentos e conseqüentemente promovendo a melhoria da resistência à compressão da alvenaria, figura I.10. A aplicação destes confinadores de aço inoxidável reduz as hipóteses de instabilização e controla o possível abaulamento sob acção de cargas verticais.

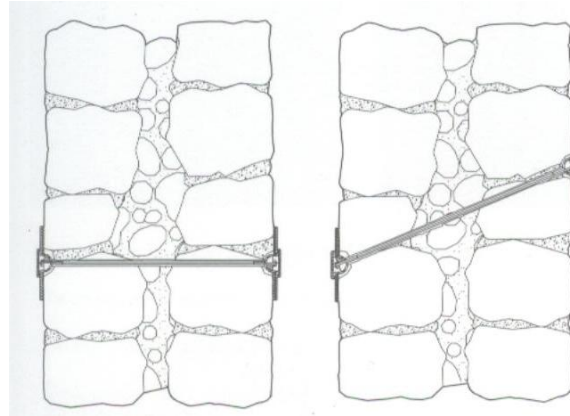
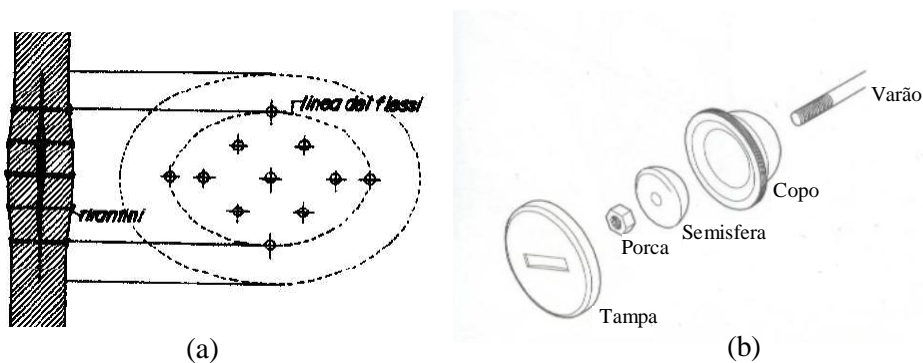


Figura I.10 – Representação esquemática de conectores (corte vertical) [13]

São praticados furos de pequeno diâmetro, criteriosamente localizados, nos quais são inseridos e apertados confinadores, com chapas de ancoragem. A distribuição dos furos deve ser feita em quincôncio¹⁹, figura I.11 (a), sendo que os furos podem ser injectados com caldas de injeção. Os sistemas mais comuns de fixação são os gatos metálicos, placas de distribuição ou o sistema de rótulas [13, 64], figura I.11 (b).



(a) – representação esquemática da distribuição localizada de conectores [55];

(b) – representação esquemática do sistema de rótula para ancoragem dos conectores [13]

Figura I.11 – Confinamento transversal de paredes através de conectores

- **Confinamento transversal contínuo**

Esta é uma técnica que tem pouca investigação em Portugal. Actualmente encontra-se em curso, no Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL, um trabalho de investigação sobre esta solução e sob a orientação de Fernando Pinho [56]. Existem também estudos em Itália de sistemas de confinamento transversal contínuo com fitas metálicas que já têm aplicação no mercado, como é o caso do sistema CAM desenvolvido por Mauro Dolce e Roberto Marnetto [24].

¹⁹ Quincôncio é a designação para a reunião de objectos dispostos de cinco em cinco: quatro em quadrado, em rectângulo ou em losango, e um no meio.

Esta técnica consiste na aplicação de elementos metálicos como fios ou fitas em furos previamente abertos na alvenaria e que confinam o elemento a reforçar através dum processo contínuo de “cosedura” da alvenaria, devendo ser complementados com a utilização de rebocos armados, figura I.12. É uma solução que aumenta substancialmente a resistência ao corte, à flexão e à compressão da alvenaria através do seu confinamento [13, 56].



Figura I.12 – Confinamento transversal contínuo [56]

Tirantes

Os tirantes destinam-se a prevenir o colapso de paredes paralelas com fraca ligação, deformação transversal progressiva nestas paredes, aparecimento de fendilhação devido aos esforços de tracção causados pelo seu afastamento e a rotação das fachadas. Um dos objectivos principais é a melhoria do comportamento global da estrutura face às acções sísmicas, através da restrição aos mecanismos de colapso para fora do plano das paredes.

Os tirantes constituem uma solução tradicional comum na reabilitação sísmica de construções em alvenaria, nomeadamente em estruturas afectadas por assentamentos de fundações e por sismos. A sua execução não altera as condições de equilíbrio das paredes e a sua mobilização ocorre em situações de alteração dos equilíbrios anteriores, como por exemplo, novos assentamentos, efeito de sismos, impulsos horizontais, etc.

Os tirantes são elementos metálicos que funcionam à tracção, em geral: cabos de aço que servem para unir, exteriormente, duas paredes paralelas onde estes são fixados através de chapas de ancoragem que asseguram a sua ligação e, conseqüentemente, evitem a perda da capacidade resistente [3, 46, 63], figura I.13.



Exemplo de aplicação num edifício em Faro

Figura I.13 – Tirantes de reforço aplicados pelo exterior [93]

As ancoragens devem ser colocadas exteriormente às paredes de alvenaria e os tirantes são colocados, em geral, ao nível dos pavimentos e coberturas (por cima ou por baixo destes), podendo ser também colocados no interior dos elementos estruturais. Quando colocados ao longo das duas direcções principais do edifício, os tirantes devem ser colocados simetricamente, em planta, de modo a evitar efeitos de torção após a ocorrência dum sismo [3, 46, 63].

Reboco armado

A técnica do reboco armado é muito divulgada actualmente e é aplicada em estruturas de alvenaria que apresentam degradação superficial significativa, como é o caso de paredes de alvenaria de pedra com desagregação ou fendilhação do reboco.

A execução desta solução pressupõe o saneamento e limpeza da alvenaria, a aplicação dum reboco com argamassa de formulação adequada, incorporando uma armadura metálica ou polimérica de reforço, fixada por pontos na parede. O reboco pode ser realizado mediante a projecção de lâminas de argamassa ou micro-betão armadas com a rede de armadura metálica, figura I.14.

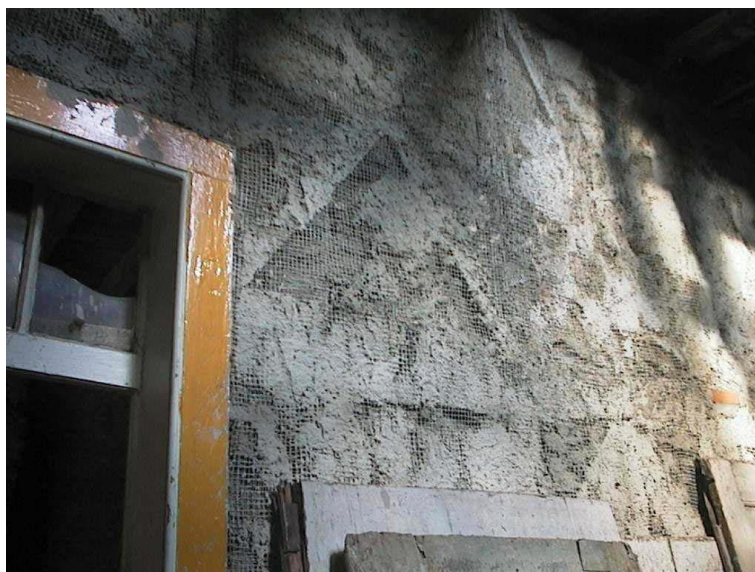


Figura I.14 – Reboco armado em parede de alvenaria de pedra [12]

As argamassas devem ser, de preferência, pré-doseadas de modo a poderem ser projectadas através de equipamento específico. Podem ser argamassas tradicionais com base em cimento ou sintéticas. Actualmente é usual a utilização de argamassas bastardas de cimento, cal aérea e areia para que seja respeitada a compatibilidade com as paredes antigas, pois as argamassas tradicionais com base em cimento provocam diferenças de rigidez com o suporte e maior retracção dando origem ao surgimento de tensões tangenciais nas superfícies de contacto entre a alvenaria velha e a nova, que por sua vez leva à ocorrência de fendas no reboco.

Quanto à armadura, são usadas malhas de aço electrossoldadas com protecção anti-corrosão e mais recentemente malhas sintéticas, como a rede de fibra de vidro com protecção anti-alkalina, apresentando melhor facilidade de aplicação, custo reduzido e boa compatibilidade. No entanto as capacidades resistentes são inferiores às da malha de aço [13, 56, 64].

Encamisamento

O encamisamento é uma técnica utilizada em paredes sujeitas a esforços de compressão elevados, deformação lateral excessiva ou em alvenarias “fracas”, muito irregulares, com argamassas muito deterioradas e com fraca ligação dos materiais.

O reforço de uma parede por encamisamento consiste no aumento da secção transversal pela adição de uma armadura suplementar (malha de aço) e de uma lâmina de betão que envolve a secção inicial e na qual ficam inseridas as novas armaduras.

É uma solução que aumenta a resistência das zonas comprimidas e que resiste à deformação transversal. O betão pode ser projectado ou colocado entre a parede e as cofragens, sendo a sua espessura da ordem dos 0,10m.

A malha deve ser colocada apenas no lado interior das paredes resistentes ou então em ambos os lados duma parede interior resistente, pois a grande espessura desta solução pode criar dificuldades do ponto de vista arquitectónico quando aplicada pelo exterior. A malha é fixa à parede por meio de pregagens, num processo semelhante à técnica do reboco armado. O principal objectivo do encamisamento é a obtenção dum confinamento contínuo e a melhoria da resistência e rigidez da alvenaria [28, 46, 64], figura I.15.



Figura I.15 – Aplicação de encamisamento em paredes de alvenaria de pedra [77]

Pré-esforço vertical

O pré-esforço aplicado em edifícios antigos é uma solução ainda pouco utilizada. De um modo geral, o pré-esforço vertical em edifícios antigos consiste na aplicação de cabos de aço de alta resistência que pretendem melhorar o comportamento das paredes face a acções no próprio plano (acção sísmica). Como em qualquer outra solução de pré-esforço, o objectivo passa pela imposição de uma força de compressão de modo a aumentar a resistência à tracção e ao corte. A existência de tensões de compressão permite ainda melhorar a durabilidade do elemento por conduzir ao refechamento de fissuras que eventualmente pudessem existir. No entanto a aplicação do pré-esforço pode agravar a susceptibilidade da parede a fenómenos de instabilidade e nas zonas de ancoragem a fenómenos de esmagamento e de punçoamento [13, 64].

O pré-esforço vertical pode constituir uma solução de reforço reversível e que permite o aumento substancial da segurança estrutural perante uma acção sísmica, como é exemplo o reforço da Torre do Relógio em Santarém, figura I.16 [33].

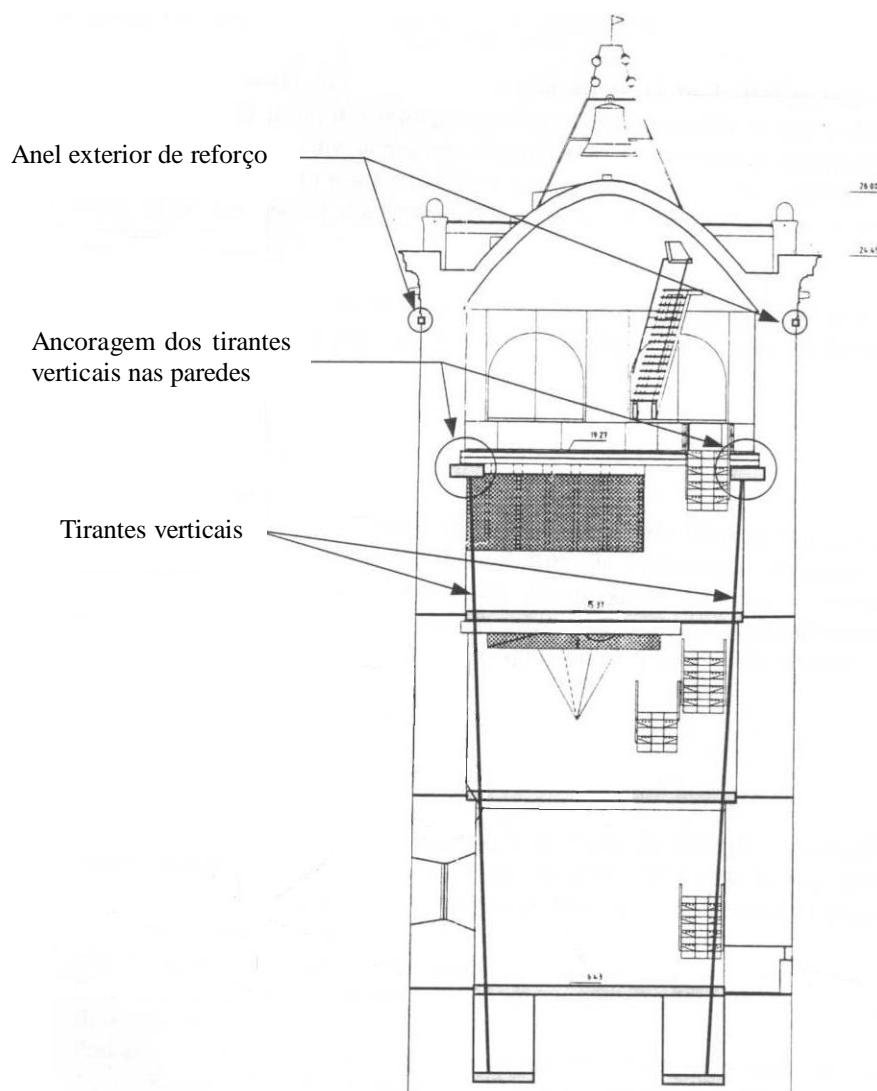


Figura I.16 – Representação esquemática do reforço com pré-esforço na Torre do Relógio em Santarém [33]

Reforço com materiais compósitos

Os materiais compósitos FRP (*Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras) são utilizados no reforço de estruturas de betão. No entanto, são pouco utilizados em estruturas de alvenaria por ainda se encontrarem numa fase de estudo, não se conhecendo resultados quanto ao seu comportamento a longo prazo. Estes materiais compósitos FRP são constituídos, essencialmente, por fibras embebidas numa matriz polimérica. As fibras contínuas mais correntes nos FRP para aplicações no reforço estrutural são de vidro (G), de aramida (A), e de carbono (C), sendo os respectivos compósitos denominados por GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro), AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida) e CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono). A matriz polimérica é constituída por resinas termoplásticas (polietileno, polipropileno, poliéster, policarbonatos) e resinas termoendurecíveis (epoxídicas, fenólicas, de poliéster, de

poliuretano ou de poliamida), sendo as mais utilizadas as de poliéster e as epoxídicas. As fibras apresentam-se sob a forma de filamentos de pequeno diâmetro, têm módulo de elasticidade e resistência à tração elevados, baixa densidade e apresentam comportamento frágil, sendo responsáveis pela resistência e rigidez axial do reforço, enquanto a matriz tem como função garantir que as fibras funcionem em conjunto, protegendo-as das agressões ambientais, dos danos mecânicos e dos fenómenos de instabilidade [6].

Como foi referido, a utilização deste tipo de materiais como reforço de paredes de alvenaria é ainda limitada. O reforço, mais frequente nestas estruturas, consiste na aplicação por colagem (ao suporte) de faixas de tecido compósito, procurando repor o monolitismo do elemento em zonas das alvenarias que apresentem fendilhação ou fracturação [13], figura I.17.

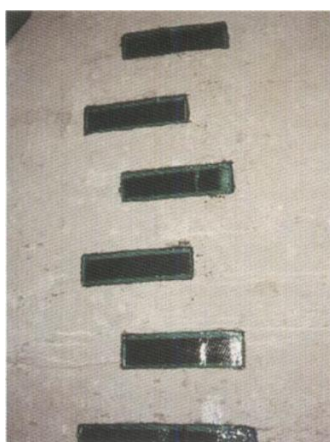


Figura I.17 – Reforço de zona de fendas com faixas de material compósito FRP [13]

Gateamento de fendas com grampos metálicos

Para a reparação de fendas, fracturas, deformações ou desmoronamentos locais de alvenarias podem ser executados gateamentos nas zonas fendilhadas ou fracturadas mediante a utilização de grampos de aço, devendo existir a preocupação de assegurar que os gatos atravessem completamente as fendas, em ambas as faces da parede, preferencialmente interligando-os, de modo a assegurar a solidarização profunda da parede. Este gateamento é geralmente complementar de uma injeção de fendas, até para impedir uma concentração de tensões excessivamente elevadas nestes elementos metálicos [3], figura I.18.



Figura I.18 – Gateamento de fenda com grampo de aço [93]

Anexo II

Técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos e coberturas de edifícios antigos de alvenaria de pedra



Neste anexo descrevem-se as principais técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos e coberturas de edifícios antigos de alvenaria de pedra que são enumeradas no quadro 3.2 da secção 3.4.2 do Capítulo 3 da presente dissertação, excepto as técnicas que são descritas nesse mesmo capítulo.

Técnicas de reabilitação estrutural que são descritas neste anexo:

- ***Em pavimentos e coberturas:***
 - Fixação de elementos metálicos à madeira antiga (**em pavimentos e coberturas**)
 - Aplicação de folha ou tecido de material compósito FRP colado em elementos estruturais (**em pavimentos e coberturas**)
 - Reconstrução da parte superior da secção do elemento estrutural com cola epoxídica (**em pavimentos e coberturas**)
 - Reforço com tirantes metálicos – aplicação de pré-esforço pelo exterior (**em pavimentos e coberturas**)
 - Reparação de fendas com elementos metálicos, compósitos FRP e/ou cola epoxídica (**em pavimentos e coberturas**)
 - Reforço de asnas com tirantes em aço (**em coberturas**)
 - Consolidação de ligações em asnas (**em coberturas**)

Em seguida descrevem-se as principais técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos e coberturas.

Fixação de elementos metálicos à madeira antiga

Esta técnica é semelhante à solução que utiliza peças de madeira (“Fixação de novas peças de madeira às antigas”) e visa a resolução das mesmas anomalias. Consiste em colocar elementos de reforço metálicos tais como chapas ou perfis metálicos, nas faces laterais das vigas originais, figura II.1.

A ligação entre as vigas e as peças de reforço é estabelecida com recurso a elementos de fixação, nomeadamente parafusos com porca e é feita na parte sã da viga. De forma a garantir uma melhor solidarização das peças, o comprimento de sobreposição do perfil sobre a madeira sã deve ser entre 0,5 a 0,8m [4].

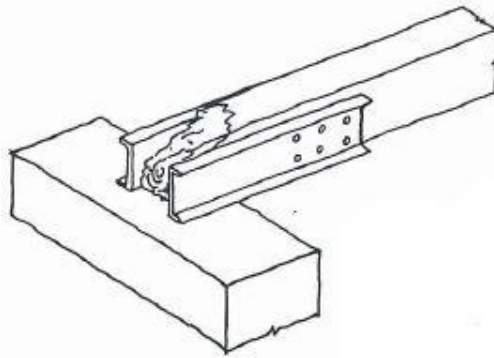


Figura II.1 – Representação esquemática do reforço (localizado) por fixação de elementos metálicos à madeira antiga [4]

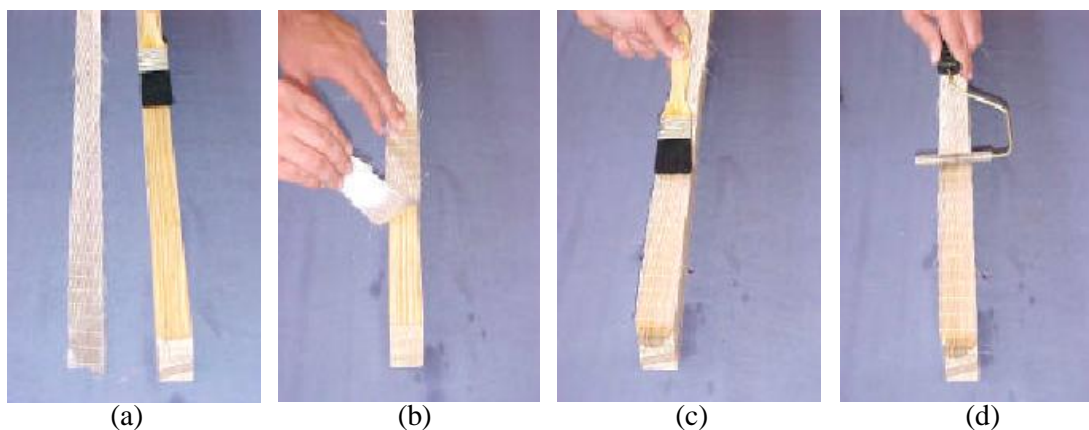
Esta técnica é eficaz quando se pretende evitar a propagação de fendas existentes nas vigas, enclausurando as mesmas entre os dois elementos metálicos dispostos paralelamente. As peças provocam uma compressão na direcção perpendicular à abertura das fendas de modo a parar a sua propagação [70].

Tem como principais vantagens o facto de ser uma técnica que não necessita de um prévio escoramento dos pavimentos, pois as partes degradadas das vigas não são retiradas e também por proporcionar um acréscimo de capacidade de carga às vigas. No entanto é uma solução de difícil aplicabilidade em vigas com secção circular e também uma solução de baixa rigidez, uma vez que os elementos só entram em carga quando acarretam deformações consideráveis, facto que leva por vezes a deformações excessivas para o conjunto a longo prazo [30].

Aplicação de folha ou tecido de material compósito FRP colado em elementos estruturais

Esta técnica serve para reforçar elementos estruturais de madeira que estejam frágeis ou com risco de rotura. Após a remoção dos revestimentos e preparação das superfícies dos elementos de madeira, o reforço é feito por adição de laminados ou de tecidos de material compósito colados com resina de epóxido, figura II.2. É então efectuada uma cintagem que permite confinar a secção e aumentar a sua capacidade resistente. Tem como principais vantagens ser uma solução de reduzida intrusividade e conservar os materiais originais. O facto de ser um método bastante utilizado no reforço local de zonas de ligação mecânica entre elementos de madeira, permite aumentar a ductilidade das estruturas [13].

Actualmente existem estudos que comprovam a viabilidade da aplicação de fibras de vidro e de fibras de carbono no reforço e na recuperação de vigas de madeira: esta técnica, além de fácil execução, proporciona um aumento da resistência e da rigidez dos elementos estruturais reforçados [31].



(a) – aplicação de resina sobre a viga de madeira; (b) – colagem do tecido de fibra de vidro; (c) – aplicação da 2ª camada de resina; (d) – retirada de bolhas de ar

Figura II.2 – Procedimento de aplicação de fibras de vidro em vigas de madeira [31]

Reconstrução da parte superior da secção do elemento estrutural com cola epoxídica

Em algumas situações, as peças estruturais de madeira apresentam degradações originadas por insectos xilófagos que progridem essencialmente na parte superior das vigas ou outros elementos estruturais (como linhas e pernas de asnas de madeira) e em todo o comprimento do elemento. Para a reparação da secção original devido a este problema ou por falta de secção do elemento é aconselhável fazer a reconstrução dos elementos ou aumentar a inércia com recurso a cola epoxídica, figura II.3.

Este método consiste na instalação de uma camada de “argamassa epoxídica” na parte superior do elemento estrutural a reforçar, cumprindo-se os seguintes procedimentos [4]:

- execução de entalhes transversais do elemento a reforçar;
- introdução de elementos de ligação;
- colocação de cofragem;
- enchimento com cola epoxídica;

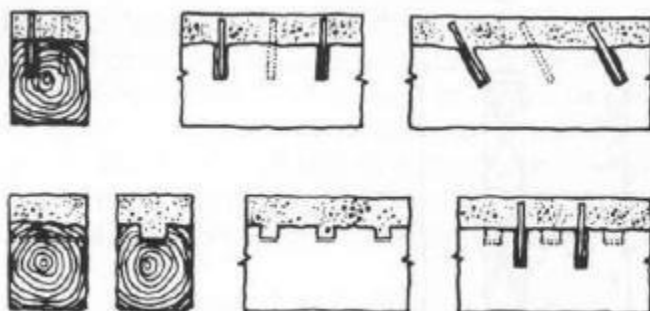


Figura II.3 – Representação esquemática da reconstrução da parte superior de vigas com a cola epoxídica (corte transversal) [4]

Em geral a aderência entre a cola e a madeira é suficiente para a transmissão adequada do esforço transversal, no entanto são normalmente utilizados elementos de conexão ou entalhes para garantir a correcta união entre os dois materiais e evitar um possível efeito de desencaixe perpendicular à superfície de contacto. São assim instalados elementos de conexão como varões de aço inox ou de fibras de vidro/poliéster. Como alternativa são ainda executados caixas ou entalhes na madeira, transversais ao elemento e com espaçamentos variáveis onde a cola vai penetrar. Os espaçamentos dos entalhes deverão ser menores junto aos apoios do elemento estrutural a reforçar, aumentando com a proximidade a meio-vão, pois o esforço transversal é maior junto aos apoios do elemento estrutural [4, 22].

Reforço com tirantes metálicos – aplicação de pré-esforço pelo exterior

Este tipo de solução consiste na instalação de um sistema pré-esforçado, através da colocação de tirantes de aço na parte inferior das peças e exteriormente a estas, figura II.4. O objectivo principal é a correcção de deformações excessivas de vigas ou de outros elementos estruturais. Permite aumentar a inércia do elemento e a sua capacidade resistente embora não significativamente [4].

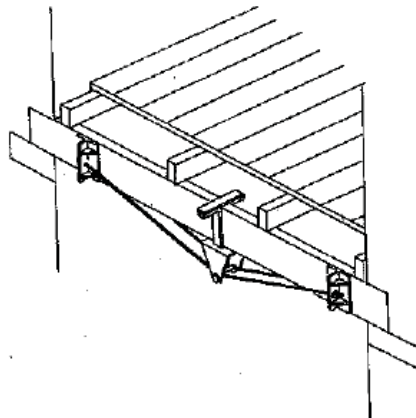


Figura II.4 – Representação esquemática da aplicação de tirantes pré-esforçados para reforço estrutural [61]

O tirante é colocado, em tensão, nas extremidades da viga ou estrutura de madeira e é espaçado desta através de elementos metálicos que se encontram comprimidos. O tirante fica traccionado e o elemento estrutural passa a trabalhar à flexão composta (com compressão) mas com valores de momentos flectores menores. É então criada uma contra-flecha no elemento igual ao valor de deformação do pavimento ou estrutura, anulando a flecha inicial provocada pela fluência do material ou pela redução de secção resistente. A estrutura deve ser escorada e as ancoragens nas extremidades do elemento são de difícil execução e como consequência podem implicar o desmonte do elemento estrutural [4, 11, 61].

Reparação de fendas com elementos metálicos, compósitos FRP e/ou cola epoxídica

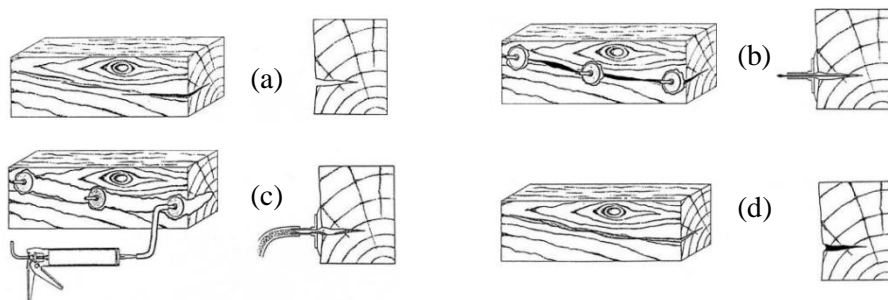
A secagem não controlada da madeira, a assimetria de cargas, ou o mau dimensionamento das estruturas pode levar ao surgimento de fendas e empenamentos nos elementos de madeira dos edifícios antigos. As fendas reduzem a capacidade resistente dos elementos, podendo conduzir a mecanismos de colapso da estrutura, além de facilitarem a infiltração de humidade e o conseqüente ataque de agentes bióticos. A eliminação destes problemas sem a substituição dos elementos, requer a utilização de técnicas que utilizem elementos metálicos, compósitos FRP e/ou colas epoxídicas. Destacam-se as seguintes técnicas:

- **Injecção de resinas epoxídicas em fendas**

Esta técnica de reparação de fendas consiste na injecção de resinas epoxídicas (adesivo epóxi) de baixa viscosidade e pressão nas fendas, figura II.5.

O método resume-se nos seguintes passos:

- limpar a zona das fendas;
- inserir tubos de injecção nas fendas;
- injectar a resina, sob pressão, por um dos tubos de injecção, deixando os restantes para a saída de ar;
- após a saída de resina pelos tubos de saída de ar, deverão ser tapados os tubos e a resina deverá continuar a ser injectada por mais 10 segundos.



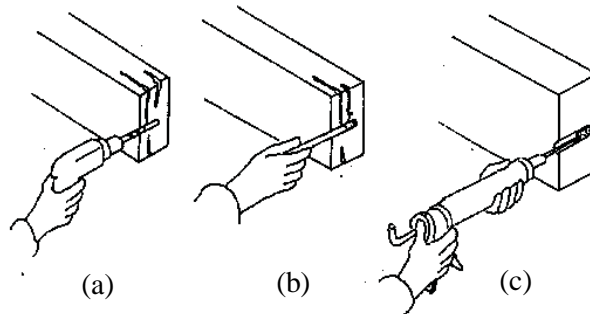
(a) – limpeza da zona das fendas; (b) – colocação de tubos de injecção nas fendas;
(c) – injecção de resina nos tubos de injecção; (d) – fenda reparada

Figura II.5 – Representação esquemática de injecção de resinas epoxídicas em fendas [84]

Após a polimerização, a zona injectada apresentará um comportamento idêntico ao do resto da secção. Esta técnica é aplicada na reparação de fendas de topo, ou fendas interiores longitudinais [61, 84].

- ***Injecção de resinas epoxídicas em fendas com inserção de varões de reforço***

O método é semelhante ao anteriormente descrito, embora neste caso sejam inseridos varões de reforço, nomeadamente de aço inoxidável, ou de materiais compósitos FRP (reforçados com fibras de vidro ou poliéster), figura II.6.



(a) – execução de furos; (b) – colocação dos varões de material compósito FRP; (c) – injecção de resina nas fendas

Figura II.6 – Representação esquemática de injecção de resinas epoxídicas em fendas com varões de material compósito FRP [61]

O método resume-se nos seguintes passos [61]:

- as fendas devem ser limpas com jacto de ar ou aspirador para remoção de poeira solta ou friável;
- a furação deve ser efectuada transversalmente à fenda;
- colocação dos varões de material compósito FRP, após serem submetidos a um tratamento abrasivo com lixa fina, seguido de limpeza com diluente;
- injecção das fendas com a resina epoxídica após a verificação do teor em água da madeira.

- ***Reparação de fendas com parafusos***

Esta técnica consiste em apertar as faces da fenda, uma contra a outra, com recurso a parafusos. São instalados perpendicularmente ao plano da fenda (em fendas de topo ou fendas interiores longitudinais) parafusos de porcas de pequeno diâmetro, figura II.7.

É efectuada um furo na direcção perpendicular à fenda, depois é introduzido o parafuso com a respectiva anilha e fecha-se posteriormente a fenda por aperto do parafuso.

Os parafusos só devem ser apertados até ao início do seu tensionamento, devendo ser posicionados a uma distância de 0,05 a 0,08m do topo da peça [61].

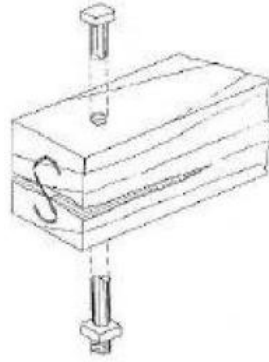


Figura II.7 – Representação esquemática da introdução de parafusos para reparação de fendas [38]

- ***Reparação de fendas por cintagem***

Esta técnica é outra alternativa na reparação de fendas e consiste na utilização de tiras metálicas para fechar as fendas através de aperto, figura II.8. A fixação das cintas é feita recorrendo a pregos electrozincados ou de aço.

Esta técnica aplica-se em fendas de topo ou em fendas interiores longitudinais, no entanto não permite reajustes na sua colocação pois é um método que usa pregos, podendo tornar-se um sistema ineficaz, além de não existirem regras de dimensionamento bem definidas, não sendo deste modo uma técnica indicada para todos os tipos de fendas [22, 61].

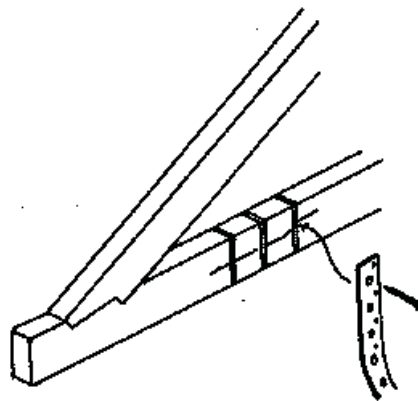
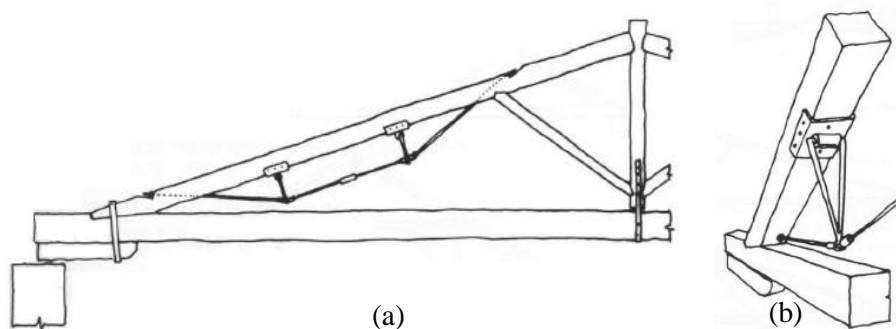


Figura II.8 – Representação esquemática da reparação de fendas por cintagem em linha de cobertura [61]

Reforço de asnas com tirantes em aço

Nos casos em que as pernas duma asna se encontram com secção insuficiente ou quando estas ficam submetidas a tensões muito superiores às admissíveis, o reforço através da colocação de tirantes em aço pode constituir uma solução eficaz.

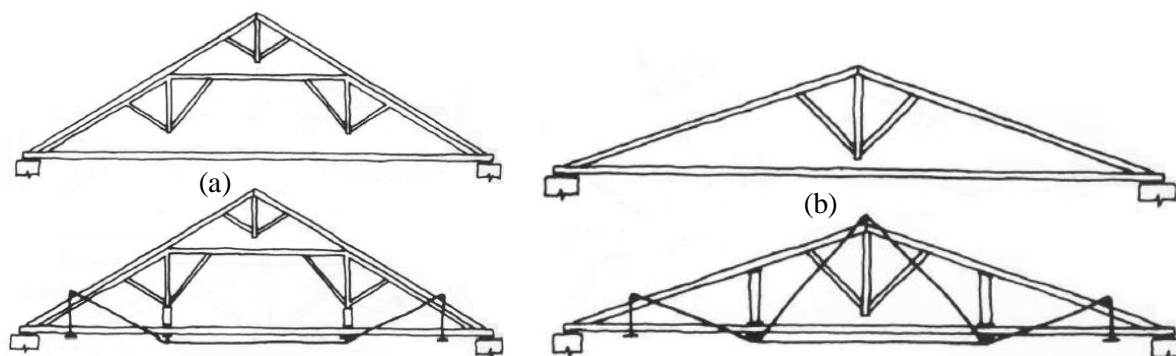
O reforço realiza-se mediante a colocação dum tirante de aço distanciado da peça estrutural de madeira através de elementos metálicos que ficam comprimidos, figura II.9. A colocação em tensão do tirante faz reduzir as deformações das pernas e melhoram o estado de tensão na madeira [4].



(a) – vista geral do reforço; (b) – pormenor do reforço na ligação perna-linha

Figura II.9 – Representação esquemática do reforço de perna de asna mediante a colocação de um tirante de aço (inferiormente) [71]

Marradi [43] e Messina [45] em 1989 experimentaram outro tipo de reforços também com tirantes de aço. Na sequência dessas experiências observaram que as deformações da estrutura eram consideravelmente menores. As soluções consistiam num sistema de tirantes de aço ligados lateralmente e sob os elementos estruturais, figura II.10.



(a) – exemplo de reforço de tirante aplicado inferiormente à linha da asna (alçado);

(b) – exemplo de reforço mediante um sistema com tirantes em forma de “W” (alçado)

Figura II.10 – Representação esquemática de reforço com tirantes metálicos em asnas de madeira [4]

Consolidação de ligações em asnas

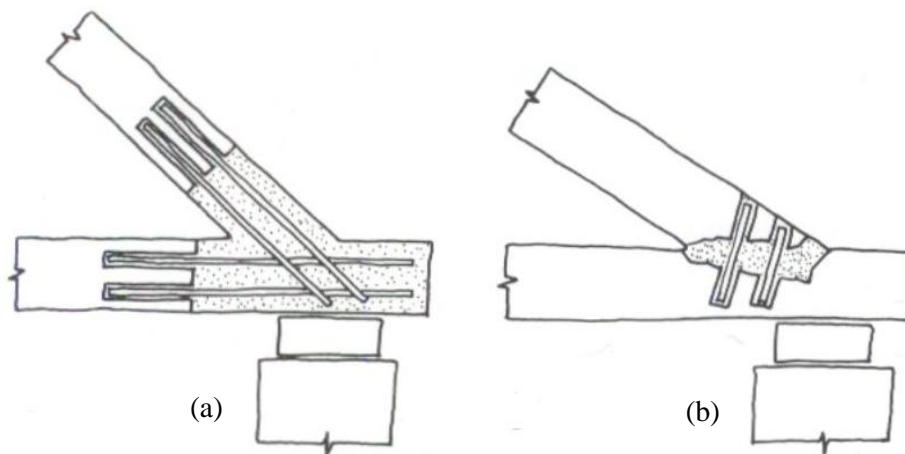
Nas coberturas e mais especificamente nas asnas das coberturas é comum encontrar falhas nas uniões ou roturas dos ligadores dos elementos estruturais que compõem as asnas de madeira. Estas falhas ou roturas são uma consequência das más práticas de projecto das asnas de madeira, bastando o mau dimensionamento, desenho ou execução incorrectas para levarem à rotura ou falha das ligações, bem

como dar origem a deformações excessivas. É necessário portanto proceder à consolidação ou reparação destas ligações através de técnicas de intervenção expeditas. Destacam-se assim as seguintes técnicas:

- **Consolidação de apoio de perna ou de encontro entre perna e tirante numa asna de madeira**

Trata-se dum problema similar ao dum apoio numa viga de pavimento com a vantagem de ser mais fácil a sua execução pelo facto do apoio da perna e da linha da asna se encontrar mais a descoberto em relação ao apoio numa viga de pavimento.

A reconstrução das zonas degradadas com recurso a uma prótese de “argamassa epoxídica” e varões de aço ou compósitos FRP a ligar a zona sã da madeira pode constituir uma boa solução. Quando a degradação é generalizada em todo o apoio, é necessário introduzir as barras ou varões com um comprimento considerável para dentro da parte sã da madeira, figura II.11 (a), caso a degradação se encontre limitada à zona de samblagem, então o reforço da união pode-se cingir a esta zona através da introdução de varões mais curtos e colados, figura II.11 (b) [4].



(a) – substituição total de encontro com “argamassa epoxídica” (corte transversal);

(b) – reparação de samblagem degradada (corte transversal)

Figura II.11 – Representação esquemática da consolidação do encontro entre perna e linha numa asna de madeira com recurso a prótese de “argamassa epoxídica” e varões de aço ou compósitos FRP [4]

Existe outra possibilidade de reforço, em encontro entre perna e linha de asna de madeira, que é menos frequente mas que já foi implementado em diversas estruturas deste tipo. Esta alternativa consiste na aplicação de peças de madeira ou placas de aço inoxidável como elementos de reforço.

A técnica de reforço da ligação com placas de madeira ou de aço inox consiste na execução de um corte com o tamanho da placa a inserir e que se localiza no canto de ligação entre as duas peças, nesta zona de corte será inserida a placa e posteriormente injectada a resina epóxi [4, 41], figura II.12.

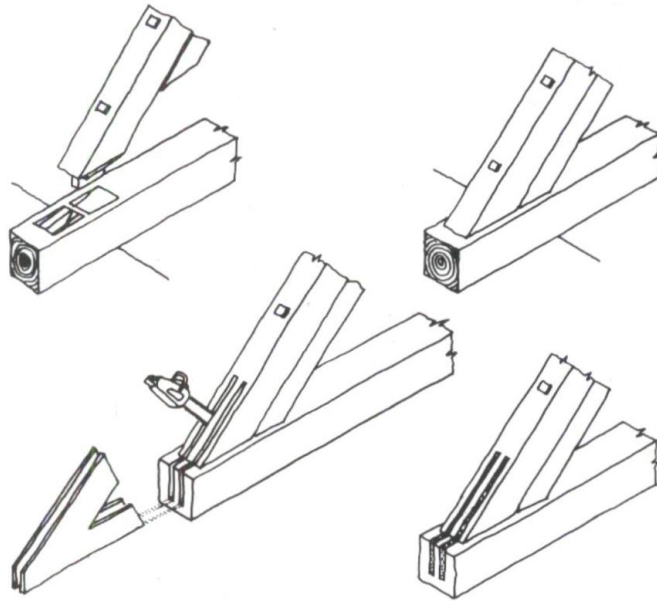
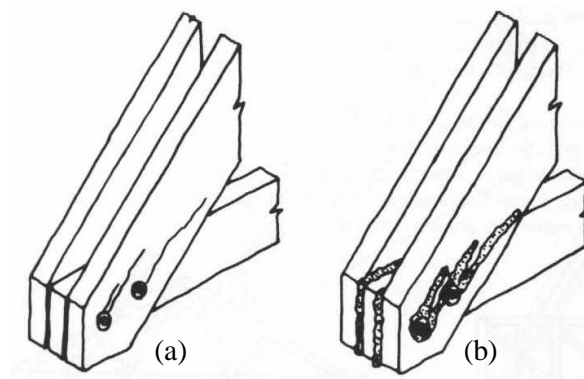


Figura II.12 – Representação esquemática do reforço num encontro entre perna e linha de asna mediante a introdução de placas de aço inox [4]

- ***Reparação de nós das estruturas de madeira com injeção de cola epoxídica***

É muito frequente a degradação, por acção de agentes biológicos, localizada em torno de um nó estrutural em consequência de infiltrações e de retenção de humidade nos interstícios criados pela junção de várias barras que concorrem no nó. A reparação ou reforço dos nós pode envolver a injeção com cola epoxídica, figura II.13. Nestes casos, é essencial que estas intervenções sejam precedidas por uma análise estrutural, de forma a avaliar os efeitos da redistribuição de esforços associados à rigidificação dos nós estruturais.



(a) – antes da reparação; (b) – após a reparação

Figura II.13 – Representação esquemática da reparação de um nó de ligação através de injeção de cola epoxídica [4]

Anexo III

Mercado Organizado de Resíduos em Portugal



O Mercado Organizado de Resíduos (MOR) surge em Portugal através do Decreto-Lei n.º 210/2009 [85] e consiste num instrumento de negociação de diversos tipos de resíduos, que tem por objectivos potenciar a valorização e a reintrodução de resíduos no circuito económico, diminuir a procura de matérias-primas e promover simbioses industriais, contribuindo para a modernização tecnológica dos respectivos produtores. O MOR compreende todas as plataformas de negociação objecto de reconhecimento por parte da Agência Portuguesa para o Ambiente (APA).

O MOR online [86] é a 1ª plataforma electrónica integrada no Mercado Organizado de Resíduos em Portugal, que permite a transação e valorização de diversos tipos de resíduos. Trata-se duma sociedade anónima constituída pela Sociedade Ponto Verde, S.A. [87], a Ambigroup [88], a ACAP (Associação Automóvel de Portugal) [89] e a Seminv - Investimentos SGPS, S.A [90].

Esta plataforma electrónica permite assim encaminhar os detentores e produtores de resíduos até aos locais e entidades apropriadas que fazem a retoma, reciclagem e valorização desses resíduos. Os produtores poderão assim colocar os seus resíduos no MOR Online em concurso, e os retomadores/recicladores poderão comprar os mesmos.

No caso particular dos RCD, se por exemplo houver uma obra de reabilitação em curso, cujo encarregado de obra pretenda eliminar/valorizar os RCD e não saiba quais os locais e entidades apropriadas para fazer essa operação, a MOR online ajuda e permite a transação desses resíduos com essas entidades.