



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Estado de Arte em Sistemas de Reforço de Estruturas de Madeira Baseados em Aço e FRPs**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas

Autor

**Mariana Figueiredo Martins de Castro Vide**

Orientador

**João Henrique Jorge de Oliveira Negrão**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Fevereiro, 2016**

## **AGRADECIMENTOS**

A realização da presente dissertação só foi possível graças ao contributo e apoio de algumas pessoas a quem não posso deixar de agradecer particular e sentidamente. Desta forma, expresso o meu sincero reconhecimento:

Ao meu orientador, o Professor Doutor João Henrique Negrão, pelo rigor, pela análise partilhada e pela partilha de conhecimentos, pela disponibilidade demonstrada, pela experiência, pela sua preocupação e ajuda nas dificuldades com que me fui deparando, pela segurança que me transmitiu. Sinto, por isso, que fiz uma boa escolha;

Aos meus colegas e amigos de curso, mas muito e especialmente à Sara Brito, à Solange Caetano, ao João Azevedo e ao André Escudeiro, companheiros de muitos momentos e presenças firmes nas situações de maior tensão. Sem o seu apoio, amizade e incentivo, tudo teria sido muito mais difícil;

Ao João Sena Martins, um agradecimento especial pela sua companhia, pela motivação, pelo incentivo quando o cansaço dominava, por todo o apoio dado ao longo deste trabalho e por ter sido simplesmente incansável;

À minha família um agradecimento também especial. Aos meus Pais, Olga e José, sempre presentes e disponíveis, sem o seu apoio incondicional, o seu suporte e o seu incentivo, nada teria sido possível. Mas também à minha irmã Beatriz, aos meus avôs, Glória e Artur, pelo carinho constante e ao meu tio Sérgio Martins pelo incentivo e conselhos.

Muito Obrigada!

## RESUMO

Nos últimos anos, os conceitos de reabilitação e sustentabilidade têm assumido cada vez mais importância por razões como a preservação de valores culturais, a proteção ambiental ou até mesmo por questões económicas. É neste contexto que o tema do reforço estrutural assume cada vez mais importância. Por um lado, assiste-se à necessidade de recuperação do património edificado; por outro, as exigências construtivas são cada vez maiores e os materiais novos têm de acompanhar essa evolução, apresentando características cada vez melhores e sendo mais eficazes.

Face ao descrito anteriormente, têm vindo a ser desenvolvidos inúmeros estudos e investigações no âmbito do reforço estrutural, existindo uma grande variedade de propostas e soluções. É neste âmbito que se insere a presente dissertação cujo núcleo central, ou objetivo principal, é o estudo de sistemas de reforço de estruturas de madeira com elementos de aço e FRP's (Fiber Reinforced Polymers) apresentados até ao presente.

A investigação efetuada constitui, assim, essencialmente, uma base de consulta dos estudos previamente realizados por vários autores e peritos desta área. Na sua elaboração, procurou-se conceber um documento de fácil consulta e utilização, com alguns pormenores, julgados suficientemente claros e elucidativos, cuja leitura possa vir a contribuir para um maior e melhor conhecimento sobre um assunto que nos nossos dias assume grande importância e sobre o qual existe pouca organização.

Complementarmente é ainda exposta uma pequena pesquisa destinada a apresentar as características e potencialidades dos materiais envolvidos nestas soluções, incluindo a própria madeira, e a fornecer algumas ideias base para a compreensão dos sistemas de reforço mencionados.

## **ABSTRACT**

Over the last few years, the concepts of rehabilitation and sustainability have assumed an increasing importance for reasons such as the preservation of cultural values, environmental protection or even due to economic issues. It is within this context that the structural reinforcement issue is becoming increasingly important. On one hand, there is the need to rehabilitate existing heritage buildings; on the other hand, construction requirements are gradually more demanding and the new materials have to follow this trend, with increasingly better and more effective features.

A large number of studies and research projects on structural reinforcement have been conducted due to the above-described; leading to a great variety of proposals and solutions. It is in this context that the present thesis emerges. Its core or primary aim is the study of existing reinforcement systems of wooden structures with steel elements and FRPs (Fiber Reinforced Polymers).

The conducted research is thus essentially a source to access the studies previously carried out by multiple authors and experts in this field of expertise. In developing the thesis, efforts were made to design a document easy-to-read and easy-to-use, with some sufficiently clear and instructive details, whose reading might contribute to a greater and better understanding of an issue with such a great current importance and on which there is little organization.

In addition, it will also be submitted a brief research on the features and potential of the materials entailed in these solutions, including wood itself. This research also aims at providing the basic concepts for understanding the mentioned reinforcement systems.

---

## ÍNDICE

1	introdução .....	15
1.1	Enquadramento Geral .....	15
1.2	Objetivos .....	16
1.3	Estrutura da Dissertação .....	16
2	Materiais .....	18
2.1	Madeira .....	18
2.2	Aço.....	19
2.2.1	Propriedades relevantes .....	19
2.3	Materiais Compósitos .....	22
2.3.1	Resinas.....	23
2.3.2	Fibras .....	26
3	Reforço de Elementos .....	29
3.1	Introdução de elementos em Aço .....	29
3.1.1	Intervenção nas faces laterais das vigas .....	29
3.1.2	Intervenção na face inferior de vigas .....	35
3.1.3	Intervenção na face superior de vigas .....	41
3.1.4	Reforço de vigas com cintas metálicas.....	50
3.1.5	Colocação de tirantes metálicos .....	52
3.1.6	Colocação de perfis metálicos sob as vigas.....	56
3.1.7	Colocação de perfis metálicos paralelos ao vigamento .....	57
3.1.8	Colocação de perfis metálicos a dividir o vão das vigas.....	59
3.1.9	Colocação de novas estruturas de suporte nas coberturas .....	60
3.1.10	Colocação de chapas metálicas sobre o pavimento .....	61
3.2	Introdução de colas epoxídicas com peças metálicas ou materiais compósitos .....	63
3.2.1	Introdução de placas de reforço seladas com formulações epoxídicas.....	63
3.2.2	Introdução de varões de reforço selados com formulações epoxídicas.....	68

---

3.2.3	Envolvimento do elemento a reforçar com tecidos, mantas ou telas de FRP selados com cola epoxídica .....	74
3.2.4	Reforço de vigas por aumento de inércia .....	75
3.2.5	Introdução de fibras de aço de alta resistência .....	77
4	reforço de Apoios e LIGAÇÕES .....	80
4.1	Introdução de Elementos em Aço .....	80
4.1.1	Colocação de cantoneira metálica entre a viga e a parede .....	80
4.1.2	Colocação de perfis sob as vigas .....	82
4.1.3	Colocação de chapas ou perfis metálicos .....	82
4.1.4	Introdução de elementos em aço no interior da secção .....	85
4.1.5	Colocação de perfil metálico a envolver o apoio .....	87
4.1.6	Reforço da ligação Pavimento-parede .....	89
4.2	Introdução de colas epoxídicas com peças metálicas ou materiais compósitos .....	90
4.2.1	Introdução de varões metálicos ou de FRP selados com cola epoxídica .....	90
4.2.2	Introdução de placas de aço ou de FRP no interior da viga selados com cola epoxídica 95	
4.2.3	Reforço local em zonas de ligação mecânica .....	98
5	Conclusão .....	100
	Referências Bibliográficas .....	102

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva tensão-extensão de um aço estrutural .....	21
Figura 2.2 - Molécula epoxi .....	25
Figura 2.3 – Diagramas tensão- extensão de diversas fibras .....	28
Figura 3.1 - Exemplo de intervenções de reforço através da colocação de elementos metálicos nas faces laterais (Pinto, 2008).....	29
Figura 3.2 - Exemplo de reforço de viga através da colocação de chapas metálicas nas faces laterais (Carneiro, 2012) .....	30
Figura 3.3 - Exemplo de reforço através da colocação de chapas laterais (Mariani, 2004).....	30
Figura 3.4- Reforço por introdução de chapas laterais (Appleton, 2003).....	31
Figura 3.5- Reforço de viga através da colocação de chapas de aço colocadas lateralmente até metade da altura da viga existente (Carneiro, 2012).....	31
Figura 3.6 – a) Reforço de viga através da colocação de perfis UNP ligados por um tirante metálico à viga existente; b) Colocação de perfis UNP ligados por dois tirantes metálicos e por duas chapas (Mazzolani, 1991) .....	32
Figura 3.7 – Reforço de viga através da colocação de perfis UNP (Mariani, 2004) .....	33
Figura 3.8 – Reforço de viga através da colocação de perfis UNP lateralmente (Arriaga, 2002) .....	33
Figura 3.9 – a) Colocação lateral de perfis IPE com empalmes de madeira nas faces laterais na zona de tração (Mazzolani, 1991); b) Colocação lateral de perfis IPE com empalmes de madeira nas faces laterais na zona de compressão (Pinto, 2008) .....	34
Figura 3.10 - Solução realizada através da colocação lateral de Perfis IPE segundo (Mariani, 2004) ..	34
Figura 3.11 - Reforço de viga através da colocação de chapa metálica na face inferior, conectada mecanicamente por parafusos a 45º: a) Proposta de (Mazzolani, 1991); b) Proposta de (França, 2007) .....	35
Figura 3.12 - Reforço de viga através da colocação de chapa metálica na face inferior .....	36
Figura 3.13 - Reforço através da colocação de chapa metálica na face inferior da seção, ligada por parafusos de porcas a toda a altura (Carneiro, 2012).....	37
Figura 3.14 - Reforço realizado através da colocação de perfis em forma de "L" na face inferior da viga: a) (Mariani, 2004); b) (Brites, 2011) .....	38
Figura 3.15 - Reforço de viga através da colocação de perfil UNP na face inferior, conectado mecanicamente com ligadores metálicos (Brites, 2011) .....	38
Figura 3.16 - Reforço de viga através da colocação de perfil "T" invertido na face inferior (Mariani, 2004) .....	39
Figura 3.17 - Reforço de viga através da colocação de perfil "T" invertido na face inferior (França, 2007) .....	39
Figura 3.18 - Reforço de viga através da colocação de perfil "U" na face inferior (França, 2007) .....	40

---

Figura 3.19 - Reforço de viga através da colocação de chapa metálica na face superior (Arriaga, 2002) .....	41
Figura 3.20 - a) Reforço através da colocação de chapas metálicas sobre as vigas (corte transversal), b) Exemplo prático de aplicação da solução num pavimento de madeira (Gattesco, 2006) .....	42
Figura 3.21 -Reforço de viga através da colocação de chapa metálica e conector mecânico na face superior (Mazzolani, 1991) .....	42
Figura 3.22 - Reforço de viga através da colocação de chapa vertical soldada a chapa horizontal na face superior da viga (Mariani, 2004) .....	43
Figura 3.23 - Reforço de viga através da colocação de chapas metálicas no interior da secção, através de parafusos de porcas (Mariani, 2004) .....	44
Figura 3.24 - Reforço de viga através da colocação de perfil IPE ou HEA na face superior, conectado mecanicamente com ligadores metálicos que percorrem toda a altura da secção de madeira (Mazzolani, 1991) .....	45
Figura 3.25 – Exemplos de reforço de viga através da colocação de perfil IPE ou HEA na face superior, conectado com ligadores metálicos que percorrem toda a altura da secção de madeira (Brites, 2011) .....	45
Figura 3.26 - Reforço de viga através da colocação de perfil IPE ou HEA na face superior, conectado mecanicamente com ligadores metálicos que perfuram apenas parte da viga (Mariani, 2004) .....	45
Figura 3.27 - Reforço de viga através da colocação de perfil IPE ou HEA na face superior e com chapa auxiliar, conectados mecanicamente com ligadores metálicos que perfuram apenas parte da viga ..	46
Figura 3.28 - Propostas de reforço de viga através da colocação de perfil IPE ou HEA com cinta metálica (Gómez) (Mariani, 2004) .....	46
Figura 3.29 – a) Corte transversal da estrutura antes da intervenção (Jurina, 2004) (Jurina, 2011); b) Corte transversal da estrutura após a intervenção (Jurina, 2004) (Jurina, 2011).....	47
Figura 3.30 - Reforço de viga através da colocação de uma chapa vertical soldada a perfil IPE ou HEA (Mariani, 2004).....	47
Figura 3.31 – a) Reforço de viga através da colocação de chapa vertical soldada a perfil UNP; b) Exemplo de aplicação do perfil metálico e dos conectores (González-Bravo, 2011) (C. González-Bravo, 2007) .....	48
Figura 3.32 - Reforço de viga através da colocação de duas chapas verticais soldadas a perfil UNP (González-Bravo, 2011) .....	49
Figura 3.33 – a) Exemplo de uma das vigas ensaiadas (e. a. González-Bravo, 2010) ; b) Exemplo de viga de madeira com perfil metálico na face superior (C. González-Bravo, 2007); c) Ensaio de flexão de viga de madeira reforçada (C. González-Bravo, 2007) .....	49
Figura 3.34 – a) Reforço de viga através da colocação de cintas metálicas com chapas metálicas nas faces superior e inferior; b) Pormenor da ligação mecânica efetuada por cintas com aperto regulável (Mariani, 2004).....	50
Figura 3.35 – Esquema de montagem das chapas metálicas, parafusos de porca e cintas reguláveis (Mariani, 2004).....	51
Figura 3.36 – Uso de cintas metálicas para reforço de vigas no Convento de Corpus Christi, Vila Nova de Gaia (Ilharco;2008).....	51

---

---

Figura 3.37 - Exemplos de reforço de viga através de tirantes metálicos (Arriaga, 2002) .....	52
Figura 3.38 - Reforço de viga através da aplicação de pré-esforço com tirantes metálicos: a) .....	53
Figura 3.39 – Reforço de viga por aplicação de pré-esforço com tirantes metálicos (Mariani, 2004) .	53
Figura 3.40 – a) e b) Exemplo de reforço de viga através de tirante metálico (Dias, 2008) .....	54
Figura 3.41 – a) e b) Reforço de cobertura através da aplicação de pré-esforço; c) Linha da asna reforçada com tirantes metálicos a impedir a deformação da perna (Arriaga, 2002) .....	54
Figura 3.42 – Exemplos de reforço de asnas através da aplicação de tirantes metálicos (Arriaga, 2002) .....	55
Figura 3.43- a) Pormenor das ligações dos tirantes de aço; b) Esquema geral da aplicação dos tirantes (Pinto, 2008).....	55
Figura 3.44 – a) Reforço do pavimento com tirantes de aço; b) Pormenor da ligação nos cantos (Branco, 2007) .....	56
Figura 3.45 – Reforço por colocação de perfis metálicos sob as vigas (Arriaga, 2002) .....	57
Figura 3.46 - Exemplo de reforço de pavimento através da colocação de vigas metálicas paralelas ao vigamento existente: a) (Brites, 2011); b) (Carneiro, 2012) .....	58
Figura 3.47 – Exemplo de reforço através da aplicação de vigas metálicas paralelas ao vigamento existente (T. Ilharco, 2008).....	58
Figura 3.48 - Exemplo de reforço através da aplicação de vigas metálicas perpendiculares ao vigamento (T. Ilharco, 2008) .....	60
Figura 3.49 - Reforço de pavimento através de chapas metálicas ligadas ao soalho existente .....	61
Figura 3.50 – a) Esquema de ensaio do reforço de pavimento; b) Pormenor da ligação (Baldessari, 2010) .....	62
Figura 3.51 - Reforço de pavimento através da aplicação de chapas metálicas finas (Marini, 2006) ..	62
Figura 3.52 - Reforço através da aplicação de placas de reforço internas seladas com cola epoxídica (Arriaga, 2002).....	63
Figura 3.53 – Procedimentos do reforço de vigas através da aplicação de placas de reforço internas, seladas com cola epoxídica (Pinto, 2008).....	64
Figura 3.54 - Viga reforçada com laminado de carbono (Arriaga, 2002) .....	65
Figura 3.55 – a) Reforço na zona tracionada; b) e c) reforço na zona tracionada e comprimida (Pinto, 2008) .....	65
Figura 3.56 – Reforço de viga através da colocação de placas de CFRP seladas com cola epoxídica: a) (Pinto, 2008); b) (Costa, 2009) .....	65
Figura 3.57 – Reforço de viga com recurso a chapas de FRP na face tracionada (Garcia, 2013).....	66
Figura 3.58 – a) Reforço de viga através da colocação de chapas de aço no interior da seção colocadas com cola epoxídica; b) Através da colocação de chapas de aço nas faces laterais colocadas com cola epoxídica (Jasienko & Nowak, 2014).....	66
Figura 3.59 – Reforço de viga através da colagem de tecido de FRP (D'Ambrisi, 2014).....	67
Figura 3.60 –Exemplos de aplicação de varões de reforço com cola epoxídica (Pinto, 2008) .....	68
Figura 3.61 - a) Consolidação com varões de reforço horizontais; b) Consolidação com varões de reforço inclinados.....	68
Figura 3.62 –Reforço na zona tracionada com varões GFRP (Gentile, 2002) .....	70

---

---

Figura 3.63 - Sistema de reabilitação com varões A400 NR (Duarte, 2004) .....	70
Figura 3.64 - Solução de empalme de peças de madeira com varões de reforço de aço e cola epoxídica (Arriaga, 2002) .....	72
Figura 3.65 - Reforço com varões num sistema de treliça .....	72
Figura 3.66 –Exemplos de reparação de linha asna com varões de aço e resina de epóxido (Arriaga, 2002) .....	73
Figura 3.67 - Reforço de viga através da colocação de mantas de FRP (Balseiro, 2007) .....	74
Figura 3.68 - Reforço de viga através do aumento de seção com cola epoxídica e ligadores de aço ou FRP (Arriaga, 2002).....	76
Figura 3.69 - Reforço de seção de viga através da reconstrução da face superior com colas epoxídicas e ligadores (Arriaga, 2002) (Pinto, 2008) .....	77
Figura 3.70 - Ensaio de viga reforça com fibras de aço de alta resistência coladas com resina epoxy (Corradi, 2011) .....	78
Figura 3.71 - Resultados dos ensaios realizados com fibras de aço de alta resistência (Corradi, 2011) .....	79
Figura 4.1 - Reforço de apoio através da colocação de cantoneira metálica entre a viga e a parede (Arriaga, 2002).....	80
Figura 4.2 - Reforço de apoio através da colocação de cantoneira metálica entre a viga e a parede .	81
Figura 4.3 – Reforço de apoio através da colocação de cachorro metálico (Costa 2008a) .....	81
Figura 4.4 - Reforço de apoio através da fixação mecânica de chapas metálicas nas faces (T. Ilharco, 2010 b) .....	82
Figura 4.5 - Reforço de apoio com recurso a chapas “L” nas faces laterais conectadas mecanicamente .....	83
Figura 4.6 - Reforço de apoio através da colocação de dois perfis UNP nas faces laterais .....	84
Figura 4.7 - Reforço de apoio através da colocação de perfil UNP (Mariani, 2004) .....	84
Figura 4.8 – Comparação entre solução com chapas nas faces e chapas no interior da seção.....	85
Figura 4.9 – Reforço de apoio através da colocação de elementos metálicos no interior da secção: a) (Ashurst, 1988); b) (Ilharco 2007b) .....	86
Figura 4.10 -Reforço de apoio através da introdução de chapas metálicas no interior da secção (Mariani,2004).....	86
Figura 4.11 – Reforço de apoio através da introdução de elementos metálicos no interior da viga (Cóias, 2007).....	87
Figura 4.12 - Reforço através da aplicação de perfil metálico a envolver a seção na zona de apoio (Mariani, 2004).....	88
Figura 4.13 – Exemplo de aplicação de dois perfis a envolver seções consecutivas (Mariani, 2004) ..	88
Figura 4.14 - Reforço da ligação entre o pavimento e a parede (Brignola, 2008) .....	89
Figura 4.15 – Exemplos de reforço com varões selados com cola epoxídica .....	91
Figura 4.16 – Processos construtivos (Cunha, 2011) .....	91
Figura 4.17 - Reforço com varões em furos nas faces laterais.....	92
Figura 4.18 - Processos relativos à execução de três sistemas de reabilitação .....	92
Figura 4.19 –a) solução com entalhe na face superior: b) solução com entalhe na face lateral.....	93

---

---

Figura 4.20 –Reforço com barras com remoção apenas da parte degradada (Arriaga, 2002) .....	93
Figura 4.21 – a) Prótese de reforço de pernas de cobertura; b)Prótese de apoio de asna/frechal em resina reforçada com varões de fibra de vidro .....	94
Figura 4.22 – Exemplos de próteses de reforço de ligações e apoios de coberturas (CAMEIRA LOPES, 2009) .....	94
Figura 4.23 – Exemplos de reconstrução da base de pilar através de resina epoxídica com varões de reforço (Cunha, 2011) .....	95
Figura 4.24 – Reforço de apoio através da colocação de chapas de aço no interior da seção seladas com resina epoxídica (Ilharco 2007b) .....	96
Figura 4.25 – Próteses metálicas em apoios de asnas (Arriaga, 2002) .....	97
Figura 4.26 – Reforço de ligação mecânica através de fibra de vidro (GFRP): a) (Duarte, 2004); b)(Cruz, 2000) .....	98

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Dados comparativos das propriedades de materiais estruturais correntes (Duarte, 2004) .....	18
Quadro 2 - Valores da tensão de cedência $f_y$ e da tensão de rotura $f_u$ dos aços macios correntes (EN 10025-2) .....	20
Quadro 3 - Valores das propriedades mecânicas dos compósitos FRP (Balseiro, 2007) .....	23
Quadro 4- Propriedades das resinas epoxídicas .....	26
Quadro 5 - Quadro resumo da solução: Colocação de chapas ou perfis metálicos nas faces laterais de vigas.....	35
Quadro 6- Quadro resumo da solução: Colocação de chapas ou perfis metálicos na face inferior de vigas.....	40
Quadro 7 - Quadro resumo da solução: Colocação de chapas ou perfis metálicos na face superior de vigas.....	50
Quadro 8 - Quadro resumo da solução: Colocação de cintas metálicas em vigas.....	52
Quadro 9 - Quadro resumo da solução: Colocação de tirantes metálicos. ....	56
Quadro 10 - Quadro resumo da solução: Colocação de perfis metálicos sob as vigas.....	57
Quadro 11 - Quadro resumo da solução: Colocação de vigas metálicas paralelas ao vigamento existente.....	59
Quadro 12 - Quadro resumo da solução: Colocação de vigas metálicas perpendiculares ao vigamento existente.....	60
Quadro 13 - Quadro resumo da solução: Colocação de novas estruturas de suporte nas coberturas	61
Quadro 14 - Quadro resumo da solução: Colocação de chapas metálicas sobre o pavimento.....	63
Quadro 15 - Quadro resumo da solução: Introdução de placas de reforço seladas com cola epoxídica. .....	67
Quadro 16 - Quadro resumo da solução: Introdução de varões de reforço selados com cola epoxídica. .....	73
Quadro 17 - Quadro resumo da solução: Envolvimento com tecidos, mantas ou telas de FRP selados com cola epoxídica.....	75
Quadro 18 - Quadro resumo da solução: Introdução de cola epoxídica e varões de reforço na face superior da viga.....	77
Quadro 19 - Quadro resumo da solução: Introdução de fibras de aço de alta resistência. ....	79
Quadro 20 - Quadro resumo da solução: Colocação de cantoneira metálica entre a viga e a parede.	82
Quadro 21 - Quadro resumo da solução: Colocação de chapas ou perfis metálicos nas faces da viga junto ao apoio. ....	85
Quadro 22 - Quadro resumo da solução: Introdução de elementos em aço no interior da secção na zona de apoio.....	87
Quadro 23 - Quadro resumo da solução: Colocação de perfil metálico a envolver o apoio. ....	89
Quadro 24 - Quadro resumo da solução: Colocação de chapas de aço entre a parede e o pavimento. .....	90

Quadro 25 - Quadro resumo da solução: Introdução de varões metálicos ou de FRP selados com cola epoxídica. ....	95
Quadro 26 - Quadro resumo da solução: Introdução de chapas de aço ou de FRP no interior da viga selados com cola epoxídica. ....	97
Quadro 27 - Quadro resumo da solução: Colocação de tela de fibra de vidro envolvida em torno da zona abrangida pela ligação. ....	99

## ABREVIATURAS

**AFRP** – *Aramid Fiber Reinforced Polymer (polímeros reforçados com fibras de aramida);*

**CEN** – *Comité Européen de Normalisation;*

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

**cm** – *Centímetro*

**E.L.U.** – *Estados Limites Últimos*

**E.L.S.** – *Estados Limites de Serviço*

**FRP** – *Fiber Reinforced Polymer (polímeros reforçados com fibras)*

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

**HM** – *High Modulus (alto módulo)*

**HS** – *High Strength (alta resistência)*

**IM** – *Intermediate modulus*

**LM** – *Low modulus*

**HS** – *High Strength (alta resistência)*

**LNEC** – *Laboratório Nacional e Engenharia cívil*

**MLC** – *Madeira Lamelada Colada*

**mm** – *Milímetro*

## **SIMBOLOGIA**

$E$  – Módulo de elasticidade;

$E$  – Módulo de elasticidade da argamassa epoxídica;

$E$  – Módulo de elasticidade do aço;

$E$  – Módulo de elasticidade;

$E$  – Módulo de elasticidade da madeira;

$f_m$  – Resistência à flexão;

$f_y$  – Tensão de cedência no aço;

$f_u$  – Tensão de rotura no aço;

$G$  – Módulo de distorção;

$I$  – Inércia da secção;

$\varepsilon$  – Extensão;

$\nu$  – Coeficiente de Poisson;

$\alpha$  – Coeficiente de Dilatação Térmica Linear;

$\rho$  – Massa volúmica;

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento Geral

Nos últimos séculos, o Homem tem praticado estilos de vida e atividades com impactes ambientais que ultrapassam a capacidade que os ecossistemas têm quer de fornecerem os recursos naturais disponíveis, quer de absorverem as repercussões associadas. O constante crescimento populacional e a sua concentração em grandes centros urbanos aliados ao seu estilo de vida produzem uma pressão cada vez menos sustentável sobre o meio ambiente. A mudança de mentalidade e tomada de consciência deste problema têm levado à procura da sustentabilidade.

É neste contexto que o desenvolvimento de sistemas de reforço de estruturas de madeira tem sido cada vez mais motivo de interesse no campo da engenharia civil, sendo diversas as investigações que têm sido levadas a cabo sobre este assunto. Se há umas décadas se começou a construir indiscriminadamente, atualmente a ideia é construir menos e melhor e reabilitar o que existe. Assim, o conceito de reforço assume uma dupla importância, por um lado, devido à grande necessidade de reabilitar as construções existentes; por outro, as exigências construtivas são cada vez maiores e os materiais têm de as acompanhar. Face ao descrito anteriormente, os inúmeros estudos desenvolvidos têm contribuído para a apresentação de uma grande variedade de propostas e soluções. É neste âmbito que se insere a presente dissertação cujo núcleo central, ou objetivo principal, é efetuar uma revisão sobre o atual estado do conhecimento, no que concerne os sistemas de reforço de estruturas de madeira com elementos de aço e FRP's.

Os sistemas de reforço têm como objetivo reduzir as deformações e ao mesmo tempo aumentar a capacidade de carga. Na escolha do sistema mais adequado, é necessário, em primeiro lugar, identificar as patologias existentes no elemento (deformação excessiva, degradação dos apoios, fissuração, etc.) e posteriormente ter em consideração alguns fatores, tais como o grau de degradação, o objetivo da intervenção, o custo, as vantagens e os inconvenientes.

O reforço de estruturas de madeira com elementos metálicos é uma prática relativamente “antiga”. A maior rigidez do aço face à madeira e a fluência da madeira permitem uma transferência mais significativa de esforços da estrutura original para os elementos em aço, conseguindo-se desta forma uma diminuição dos esforços na estrutura de madeira de forma parcial ou mesmo total. As técnicas de reforço com elementos em aço consistem sobretudo na introdução de varões ou chapas embutidas nas peças, no reforço das secções por empalmes com perfis ou chapas e na criação de uma estrutura metálica de apoio.

O aparecimento de materiais compósitos permitiu desenvolver novos métodos de reforço de estruturas de madeira, nomeadamente através do uso de resinas epoxídicas e de fibras de vidro, de carbono ou de aramida. Estes materiais são bastante mais resistentes do que a madeira e permitem aumentar a durabilidade e reduzir as necessidades de manutenção. Além disso, aumentam a rigidez e a resistência à flexão de elementos novos ou existentes.

## **1.2 Objetivos**

O grande objetivo da presente dissertação é elaborar um estado de arte dos sistemas de reforço de estruturas de madeira com elementos de aço ou FRP's. Mais especificamente pretende-se que, após uma pesquisa exaustiva de publicações e estudos diretamente relacionados com o tema, se consiga sistematizar as principais intervenções de reforço propostas até à data de realização desta dissertação. Para cada solução, apresentar-se-á uma breve descrição de enquadramento geral, abordando as características técnicas mais relevantes, as aplicações práticas e enfatizando as suas vantagens, limitações.

Complementarmente, através de uma pequena pesquisa inicial, pretende-se contribuir para o melhor conhecimento dos materiais utilizados e fornecer informação importante à identificação das suas potencialidades para aplicações em sistemas estruturais.

## **1.3 Estrutura da Dissertação**

Para a consecução dos objetivos definidos na secção anterior, a presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, incluindo a introdução e as conclusões finais.

No presente capítulo introdutório, é exposto o tema de dissertação, bem como o seu enquadramento e organização.

No segundo capítulo, é feita uma abordagem geral dos materiais, não só dos utilizados nas técnicas de reforço apresentadas, mas também da própria madeira. A pesquisa bibliográfica inclui uma descrição das características físicas e mecânicas mais relevantes, das suas aplicabilidades e potencialidades, envolvendo uma análise dos materiais nas suas componentes mais intrínsecas e respetiva influência no desempenho estrutural.

No terceiro capítulo, são enunciadas e apresentadas diversas soluções construtivas de reforço de elementos de madeira em resposta a inúmeros problemas, tanto a nível local como global. Inicialmente, apresentam-se soluções que envolvem a colocação de elementos em aço conectados mecanicamente e posteriormente soluções que envolvem materiais compósitos ou em aço com resinas epoxídicas.

No quarto capítulo, são expostas diversas soluções construtivas de reforço de apoios e ligações. À semelhança do terceiro capítulo, começa-se por apresentar soluções que envolvem a colocação de elementos em aço conectados mecanicamente e posteriormente apresentam-se as soluções que envolvem materiais compósitos ou em aço com resinas epoxídicas.

A presente dissertação termina com o quinto capítulo onde são explicitadas as considerações finais obtidas com a realização deste estudo.

## 2 MATERIAIS

### 2.1 Madeira

A madeira é um material de eleição pela sua abundância, características mecânicas e durabilidade. Por isso mesmo, desde muito cedo começou a ser utilizada como material de construção. Deste modo, com o decorrer do tempo e o crescente uso, as suas características foram sendo melhor compreendidas e estudadas, podendo neste momento o homem utilizá-la como material estrutural com elevado nível de fiabilidade. A madeira é um material fácil de trabalhar e tem um aspeto visual agradável. A sua origem biológica conduz a que às suas propriedades esteja associada uma grande variabilidade, tornando-se uma tarefa complicada prever o seu comportamento físico e mecânico.

Relativamente ao comportamento mecânico, a madeira apresenta elevada tensão resistente na direção das fibras (tração e compressão paralela às fibras), em comparação com o baixo peso volumico. Conforme é possível verificar no quadro seguinte, a relação entre estas duas propriedades, designada por resistência específica, é superior à de outros materiais. Quanto mais elevado é este parâmetro, maior é a reserva de resistência utilizável.

Material	Consumo Energético MJ/m <sup>3</sup>	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$f$ (kPa)	$E$ (MPa)	$f/\gamma$
Betão C20	1920	24,0	20 000	29 000	833
Aço A400	234 000	78,0	400 000	200 000	5 128
Madeiras resinosas Classe C24	600	4,2	24 000	11 000	5 714
Madeiras folhosas Classe D50	600	7,8	50 000	14 000	6 410

Quadro 1 - Dados comparativos das propriedades de materiais estruturais correntes (Duarte, 2004)

No que concerne ao comportamento físico, a madeira apresenta alterações dimensionais em consequência da sua higroscopicidade. Quando estas alterações ocorrem de forma rápida,

---

surgem fendas e deformações. Um elemento de madeira, ao ser colocado num determinado ambiente, perde ou absorve moléculas de água até atingir um estado de equilíbrio, designado teor de água de equilíbrio. A higroscopicidade leva também a alterações das suas propriedades mecânicas e ao perigo de deterioração biológica.

Apesar de ser um material inflamável, as peças estruturais com grande dimensão apresentam um bom comportamento ao fogo, superior ao de muitos materiais em condições severas de exposição.

## **2.2 Aço**

O aço pode ser considerado como o mais antigo dos materiais não tradicionais. Foi durante a Revolução Industrial (1760-1830), após inovações que introduziram conceitos novos na sua técnica construtiva, que o seu uso se começou a intensificar, ainda sob a forma de ferro. Ao longo do tempo, foram surgindo novos materiais derivados deste cada vez mais eficiente e aperfeiçoados. Este aperfeiçoamento levou a que o aço frequentemente utilizado na construção seja composto por uma liga ferrocarbónica, cujos principais componentes são, como o próprio nome indica, ferro e carbono. De uma maneira geral, o aço como material de construção, nas suas mais variadas formas (perfis enformados a frio, laminados a quente, seções onduladas ou planas, etc), apresenta uma excelente condição estrutural e excepcional flexibilidade, capaz de resolver grande parte dos problemas existentes na construção de uma forma consolidada.

(Mazzolani) caracteriza o aço como material de reforço, apresentando cinco vantagens essenciais: resistência; reversibilidade; dureza; facilidade de montagem; “novo material”.

Para (Cóias, 2007), o uso deste material em reforço de estruturas tem como vantagens o facto de não necessitar de tempos de espera entre a execução e a entrada em serviço, ocupar menos espaço, ser mais leve e permitir uma notável diminuição do tempo de execução, o que compensa o custo unitário superior do material. De acordo com (Campos, 2006) os principais requisitos que os aços estruturais devem apresentar são os seguintes: elevada tensão de cedência e tenacidade, boa soldabilidade, homogeneidade microestrutural, boa trabalhabilidade em operações de furação e corte sem causar fissuras ou outros defeitos.

Relativamente à compatibilidade da utilização do aço com outros materiais, (Campos;2006) refere que este material é compatível com qualquer outro utilizado em construção. (Jiménez) justifica este facto pela sua constituição ser homogénea e isotrópica, apresentando propriedades semelhantes em todas as direções, sendo assim adaptável em qualquer situação.

### **2.2.1 Propriedades relevantes**

Conforme referido anteriormente, a composição base do aço é o ferro e o carbono, contudo existem outros componentes, alguns deles considerados como impurezas que resultaram do processo de fabrico, outros foram adicionados em dosagens rigorosas de forma a melhorar

propriedades (Simões; 2007). De acordo com (Simões; 2007), as propriedades mecânicas e tecnológicas do aço dependem da sua constituição química. A percentagem de carbono presente é a que mais influência tem na microestrutura do aço e, desta forma, nas suas propriedades mecânicas.

Os aços mais utilizados na construção são laminados a quente, também denominados como aços macios, e caracterizam-se por apresentarem percentagens de carbono baixas (na ordem dos 0,2%).

Os valores da tensão de cedência  $f_y$  e da tensão de rotura à tração  $f_u$  dos tipos de aço macios correntes (definidos segundo a norma EN-10025-2, e tomados como valores característicos), são indicados no quadro seguinte.

Classe de aço	Espessura nominal $t$ [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 < t \leq 80$ mm	
	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550

Quadro 2 - Valores da tensão de cedência  $f_y$  e da tensão de rotura  $f_u$  dos aços macios correntes (EN 10025-2)

Para os aços macios correntes devem ainda ser consideradas as seguintes propriedades complementares (Simões; 2007):

- Módulo de elasticidade  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ ;
- Módulo de distorção  $G = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 81000 \text{ N/mm}^2$
- Coeficiente de Poisson  $\nu = 0.3$ ;
- Coeficiente de Dilatação Térmica Linear  $\alpha = 12 \times 10^6 \text{ (até } 100 \text{ } ^\circ\text{C)}$
- Massa volúmica  $\rho = 77 \text{ a } 78,5 \text{ KN/mm}^3$ .

De forma a introduzir uma melhor percepção do comportamento do aço quando sujeito a esforços é exposto o gráfico:

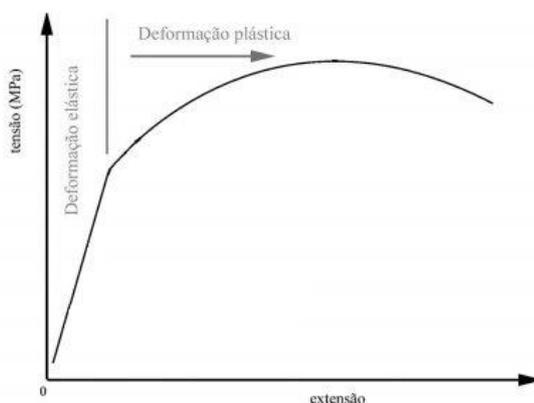


Figura 2.1 - Curva tensão-extensão de um aço estrutural

Através da análise do gráfico anterior, é possível concluir que o aço é um material dúctil, ou seja, sofre uma deformação plástica antes da rotura. Esta é uma propriedade importante e uma grande vantagem deste material uma vez que estas deformações constituem um aviso prévio de rotura final, o que permite que sejam tomadas medidas e, conseqüentemente, se previnam acidentes.

A durabilidade deste material é dependente do efeito da corrosão, do desgaste por fadiga e desgaste mecânico. A corrosão manifesta-se na presença de oxigénio, humidade e de matérias poluentes existentes no meio e é o elemento preponderante da durabilidade. Este fenómeno origina a redução da secção transversal do elemento, comprometendo assim o seu desempenho. Segundo (Simões;2007), independentemente do sistema de proteção utilizado para reduzir este fenómeno, devem ser tomadas medidas adicionais de forma a precaver a acumulação de água e detritos nestes elementos. O desgaste por fadiga ocorre quando a estrutura é solicitada por ações cíclicas (provenientes, por exemplo, de equipamentos de elevação, vibrações de máquinas, etc.), sendo nestas situações necessário verificar a resistência à fadiga.

As propriedades mecânicas do aço são muito afetadas por temperaturas elevadas. Temperaturas superiores a 500°C podem conduzir a: alterações da microestrutura; deformação irreversível quando sujeito a esforços relativamente pequenos; corrosão ou erosão da superfície e conseqüentemente perda de funcionalidade do componente; diminuição do módulo de elasticidade (200GPa à temperatura ambiente, diminui para 170Gpa a 480°C e a partir daí decresce abruptamente) o que resulta em perda de rigidez. Destas alterações das propriedades com a temperatura resulta que a exposição prolongada ao fogo pode originar a perda de capacidade do elemento de aço.

### 2.3 Materiais Compósitos

Os materiais compósitos começaram a desempenhar papéis estruturais importantes na década de 1940, no campo das engenharias militar, aeroespacial, náutica e automobilística. Mais tarde, devido ao êxito verificado com a utilização destes materiais, a engenharia civil começou a ter interesse em aplicá-los, nomeadamente sob a forma de produtos “Compósitos Reforçados com Fibras”, representados pela sigla FRP com origem na terminologia inglesa “Fiber Reinforced Polymer”. Inicialmente estes novos materiais aplicavam-se apenas em elementos secundários. Ao longo do tempo, e com a realização de inúmeros estudos, foi possível ter um conhecimento mais profundo sobre as suas características e potencialidades. Então, mais recentemente, começaram a ser utilizados no reforço e/ou reabilitação de elementos estruturais principais.

Na composição base dos compósitos, estão presentes dois constituintes: as fibras, que são o material de reforço, e a matriz, em geral uma resina termoplástica ou termoendurecível, que envolve totalmente as fibras permitindo a transferência de tensões entre elas. A matriz tem uma grande influência em diversas propriedades mecânicas do material compósito (propriedades de corte, propriedades na compressão, módulo e força transversos). As suas funções são unir as fibras, protegê-las dos agentes mais agressivos do meio e dos danos mecânicos e ainda distribuir as cargas. Uma característica comum das matrizes é a sua baixa densidade, o que proporciona ao compósito uma ótima relação peso/resistência. No que diz respeito à sua constituição, podem ainda conter aditivos ou outros produtos, como, por exemplo, promotores, aceleradores ou agentes catalisadores. Da conjugação destes constituintes surge um novo material com importantes propriedades químicas e físicas quando comparadas com os restantes materiais existentes. O comportamento final de um compósito de FRP depende não só dos materiais que o constituem, mas também das suas proporções, da interação entre eles e ainda da disposição das fibras principais. Neste comportamento, os fatores intervenientes são o comprimento, a orientação, a composição e a forma das fibras, as propriedades mecânicas da resina e a adesão entre a matriz e as fibras.

Entre as principais vantagens destes materiais, destacam-se os elevadíssimos valores de resistência e rigidez para uma baixa massa volúmica e uma boa resistência à corrosão. O principal inconveniente é ainda o seu elevado custo, embora tenha vindo a sofrer reduções significativas. O quadro 3 apresenta as propriedades mecânicas mais relevantes dos principais FRP utilizados e a sua comparação com o aço.

Tipo de FRP	Resistência à tração [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Extensão na rotura (mm/mm)	Coefficiente de dilatação térmica [ $10^{-7}/C$ ]	Densidade específica
GFRP	1379 - 1724	-	48 - 62	0.03 - 0.045	9,9	2,40
CFRP	1650 - 2610	-	152 - 165	0.01 - 0.015	0,0	1,55
AFRP	1200 - 2068	-	50 - 74	0.02 - 0.026	-1,0	1,25
Aço	1379 - 1862	1034 - 1396	186 - 200	>0.04	11,7	7,90

Quadro 3 - Valores das propriedades mecânicas dos compósitos FRP (Balseiro, 2007)

As aplicações mais utilizadas de FRP's são as mantas e os laminados ou varões embutidos no elemento. Em ambos os casos as fibras são fixadas ao elemento através de resinas epoxídicas. As mantas são normalmente fixadas à superfície da peça, envolvendo-a em todo o seu perímetro, enquanto os perfis laminados podem ser colados à superfície do elemento ou mais habitualmente em entalhes efetuados em locais estrategicamente escolhidos. Por seu lado, os varões são sempre colocados no interior da peça, em rasgos ou em furos efetuados.

O dimensionamento dos elementos reforçados com estes materiais pode ser realizado, admitindo de que se trata de uma secção mista madeira-compósito, em que as propriedades do material compósito são as definidas pelo seu fabricante e onde se considera que na rotura o elemento se encontra totalmente plastificado em compressão e com comportamento linear em tração.

### 2.3.1 Resinas

As resinas são polímeros, isto é, materiais que se caracterizam mecanicamente por serem uma associação de simples moléculas que se repetem ao longo de cadeias moleculares.

Considerando o comportamento em função da temperatura, as resinas classificam-se em dois grandes grupos:

- Termoplásticas - amolecem com o aumento da temperatura, podendo eventualmente fundir, com o arrefecimento voltam a solidificar, O processo pode ser repetido infinitamente sem alterar as propriedades do material. Este tipo de resinas evidencia uma grande viscosidade e fracas propriedades adesivas, o que conduz a maiores dificuldades na impregnação das fibras;
- Termoendurecíveis - obtidas pela junção de um endurecedor ou catalisador a uma resina, todos em estado líquido, dando origem a um produto sólido. A reação

química designada “cura da resina” é irreversível, desde o momento em que a sua estrutura molecular se forma. A sua irreversibilidade leva a que não seja possível reprocessá-las. Estas resinas apresentam baixa viscosidade, o que leva a uma boa impregnação das fibras.

De acordo com o referido anteriormente, as resinas mais adequadas a utilizações estruturais são assim as termoendurecíveis dos tipos epoxídica, poliéster, e as de vinil.

### **Propriedades relevantes das resinas**

De uma forma geral, as resinas são materiais que apresentam boas características mecânicas, tais como: elevado módulo de elasticidade, elevada resistência última e a apreciável deformação na rotura. As resinas, inicialmente rígidas, têm um patamar de cedência antes do colapso, fator que evita uma rotura frágil.

As propriedades mecânicas das resinas são influenciadas pela temperatura durante o processo de cura. Verifica-se que existe um incremento nas propriedades mecânicas finais quando a cura ocorre sob temperaturas elevadas. Muitas resinas curadas à temperatura ambiente não alcançam as suas propriedades mecânicas máximas a não ser que sejam sujeitas a uma pós-cura. Este processo de pós-cura consiste no aumento de temperatura do compósito após a cura à temperatura ambiente e tem como objetivo estimular ligações que ainda não se tenham concretizado. Estas ligações poderão ocorrer naturalmente quando existem temperaturas ambiente elevadas, contudo as propriedades serão um pouco inferiores às de um processo de pós-cura.

No que diz respeito à retração, apresentam valores muito reduzidos, característica que é desejável para a qualidade dos compósitos. Este fenómeno deve-se à reorientação e rearranjo das moléculas de resina na fase líquida. Das três resinas referidas anteriormente, a epoxídica é a que apresenta menor retração (na ordem dos 2%).

A tenacidade é uma propriedade difícil de quantificar num material compósito, no entanto, a curva tensão-extensão da resina fornece algumas indicações. De uma forma geral, quanto maior for a deformação antes da rotura mais tenaz e menos suscetível à fendilharão será a resina.

As propriedades das resinas são também afetadas por agentes de degradação próprios do meio ambiente e ainda por substâncias químicas agressivas. Um dos problemas mais frequentes é a degradação do compósito devido à infiltração de água. Ao longo do tempo as resinas podem absorver pequenas quantidades de água que provocam uma diminuição da aderência entre os materiais. Uma forma de prevenir a degradação pela água consiste em aplicar na superfície laminados de películas impermeáveis.

## **Resinas Epoxídicas**

As resinas que irão ser utilizadas como reforço de elementos de madeira no presente trabalho são as resinas epoxídicas, por esse motivo vão ser alvo de uma análise mais detalhadas.

As resinas epoxídicas apresentam características mecânicas e resistência à agressividade ambiental muito superiores às das restantes resinas conhecidas, o que justifica o facto de serem as mais utilizadas.

O termo “epoxi” significa literalmente oxigénio entre carbonos, isto porque corresponde a um grupo químico composto por um átomo de oxigénio ligado a dois átomos de carbono, os quais já se encontram ligados entre si de alguma maneira (ver Figura 2.2).

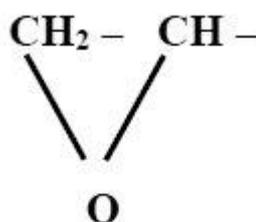


Figura 2.2 - Molécula epoxi

As resinas epoxídicas apresentam inúmeras propriedades úteis, entre as quais se destacam as seguintes:

- Baixa retração durante o processo de cura;
- Baixa viscosidade no estado líquido;
- Elevada adesividade;
- Propriedades mecânicas excelentes;
- Cura a temperaturas entre os 5° e os 150°;
- Boa resistência química;
- Bom isolamento térmico;
- Impermeabilidade.

O quadro 4 apresenta alguns intervalos de valor relativos às propriedades mais importantes.

Resina	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de rotura [MPa]	Extensão na rotura [%]
Epoxi	2.5 – 4.1	55 – 130	1.5 – 9.0

Quadro 4- Propriedades das resinas epoxídicas

O processo de cura das resinas epoxídicas obtém-se pela reação entre a resina e um endurecedor. Entre estes dois componentes é estabelecida uma reação de adição, não havendo a emissão de subprodutos. As moléculas epoxi combinam-se com as moléculas do endurecedor numa proporção fixa, sendo fundamental colocar os dois componentes com as dosagens adequadas para que se dê a reação completa. Dosagens incorretas conduzem a que dentro do polímero exista endurecedor ou resina não reagidos, o que afetará as propriedades finais. O tipo de endurecedor colocado é que controla a velocidade de cura.

### 2.3.2 Fibras

De acordo com o que foi referido anteriormente, as fibras são o componente resistente dos materiais compósitos. Geralmente são caracterizadas pelo pequeno diâmetro e pela elevada relação diâmetro/comprimento. O produto base é o fio contínuo, que pode ser empregue diretamente no fabrico de produtos por pultrusão para obter fitas, mantas, etc.

As principais características das fibras utilizadas são as seguintes:

- Reduzida variação de resistência individual entre fibras;
- Elevada resistência e módulo de elasticidade;
- Manutenção das suas propriedades durante o processo de fabrico e manuseio.

No campo da engenharia civil, as fibras mais utilizadas são as de vidro, carbono e ainda as de aramida.

---

### **Fibras de Vidro**

As fibras de vidro (GFRP - *Glass Fiber Reinforced Polymer*), geralmente de cor branca, são as fibras de reforço mais utilizadas nos compósitos e também as mais económicas, mas as que apresentam maior peso específico, menor resistência à fadiga e maior sensibilidade a ambientes alcalinos. Estas fibras são o resultado de uma mistura de areia rica em sílica, caulino, pedra calcária, boratos e ainda alguns produtos químicos. A variação da dosagem de cada componente constituinte determina a existência de uma grande variedade destas fibras (E,C,R,S e T). As mais utilizadas são as do tipo E e S.

Estas fibras não são normalmente utilizadas para pré-esforço.

### **Fibras de Carbono**

As fibras de carbono, de coloração preta, são produzidas por oxidação, carbonização e grafitização a elevadas temperaturas, a partir um carbono orgânico polimérico. Estas fibras são as que apresentam as melhores propriedades mecânicas (resistência à tração e à compressão), resistência superior à ação de agentes químicos, imunidade à corrosão e caracterizam-se também por não absorverem água. Também apresentam as melhores características de estabilidade, já que não absorvem água, são imunes a ambientes químicos mais severos e à corrosão. No entanto, têm como grande desvantagem o elevado custo. São usualmente classificadas com uma escala em função do respetivo módulo de elasticidade. Assim, considerando o aumento desta propriedade mecânica, existem as de resistência elevada (HS – *high strength*), resistência ultra elevada (UHS – *ultra high strength*), rigidez elevada (HM – *high modulus*), rigidez intermédia (IM – *intermediate modulus*) e rigidez ultra elevada (UHM – *ultra high modulus*).

Relativamente à aplicação deste tipo de fibras, verifica-se que as mais utilizadas são as de elevada resistência (HS).

### **Fibras de Aramida**

As fibras de aramida são produzidas por um desfiamento de um polímero orgânico numa solução cristalina líquida. Deste processo, resultam fibras cujas moléculas rígidas se encontram alinhadas segundo o eixo do filamento. Posteriormente, e com o objetivo de impermeabilização e incompatibilidade com as resinas, a superfície das fibras sofre um tratamento. No que diz respeito às suas propriedades, estas resinas apresentam elevada resistência à tração, alto módulo de elasticidade e boa resistência ao impacto. É também de referir o bom comportamento ao fogo, ao calor e aos químicos. Como inconvenientes, destacam-se as dificuldades de moldagem,

a baixa resistência à compressão e sensibilidade a altas temperaturas, raios ultra-violetas e fenómenos de fluência.

### **Propriedades relevantes das fibras**

As propriedades relevantes de cada uma das fibras mais utilizadas já foram sendo analisadas anteriormente, no entanto, considerou-se conveniente apresentar os diagramas da figura 2.3 (ver Figura 2.3) que expressam o comportamento mecânico de diversos tipos de fibras ensaiadas à tração e fornecem uma ideia mais concreta. As fibras apresentam um comportamento linear elástico, sendo as principais propriedades o módulo de elasticidade e a tensão de rotura.

Como foi referido, as fibras de carbono são as que apresentam maior módulo de elasticidade, seguidas pelas de aramida e por último pelas fibras de vidro.

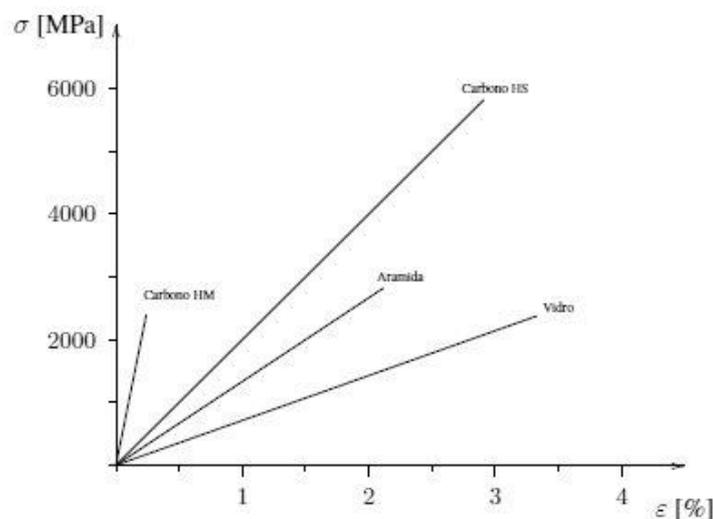


Figura 2.3 – Diagramas tensão- extensão de diversas fibras

## 3 REFORÇO DE ELEMENTOS

### 3.1 Introdução de elementos em Aço

#### 3.1.1 Intervenção nas faces laterais das vigas

A colocação de chapas ou perfis, conectados mecanicamente, ao longo das faces laterais da viga é uma solução comum e enunciada em diversos trabalhos (Figura 3.1). Este facto deve-se à liberdade de aplicação, facilidade de colocação e montagem em obra das próteses, possibilidade de conservação do pé direito existente e aos resultados satisfatórios que apresenta tanto a nível de rigidez como de resistência mecânica. Com a aplicação deste reforço, pretende-se aumentar a rigidez da viga perante solicitações de flexão e recuperar uma parte da continuidade da mesma que havia sido perdida devido aos problemas estruturais.

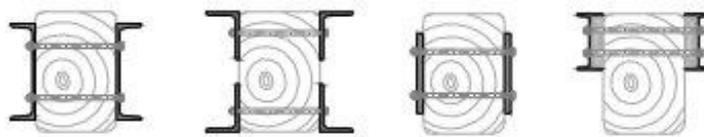


Figura 3.1 - Exemplo de intervenções de reforço através da colocação de elementos metálicos nas faces laterais (Pinto, 2008)

É importante salientar que, nas soluções em que os elementos metálicos fiquem sujeitos a esforços de compressão, é necessário ter especial atenção à zona comprimida e verificar a sua segurança, uma vez que há possibilidade do aço instabilizar localmente (Carneiro, 2012).

Nas intervenções de reforço através da colocação de chapas nas faces laterais (Figura 3.2) a ligação mecânica tem um papel importante no sentido de precaver uma possível instabilização das chapas. Segundo (Carneiro, 2012), quanto maior o número de conectores colocados verticalmente ou quanto maior o espaçamento dado na direção vertical, dentro dos limites construtivos e regulamentares impostos, menor será a altura do perfil suscetível de instabilizar. Outra forma de evitar o problema da instabilidade local consiste em colocar chapas com largura maior mas altura mais reduzida, de preferência desde a face inferior até metade da altura, ficando deste modo a trabalhar apenas em tração. Esta segunda hipótese foi alvo de estudo do autor e será abordada mais adiante nesta secção.



Figura 3.2 - Exemplo de reforço de viga através da colocação de chapas metálicas nas faces laterais (Carneiro, 2012)

(Mariani, 2004) propõe uma solução com chapas, caracterizando-a como bastante eficaz, dada a simplicidade de execução, embora um pouco arcaica (Figura 3.3) A proposta apresentada por este autor consiste na colocação de placas de aço perfilado em contacto com as duas faces laterais da viga, conectadas por meio de barras roscadas ou parafusos.

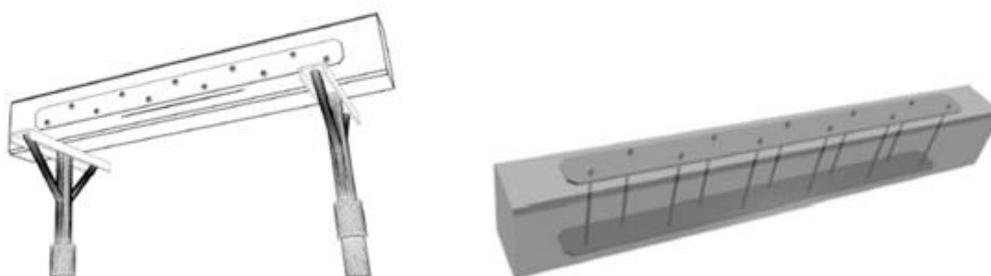


Figura 3.3 - Exemplo de reforço através da colocação de chapas laterais (Mariani, 2004)

(Appleton, 2003) apresenta uma solução bastante idêntica à anterior (Figura 3.4), com a colocação de chapas nas faces laterais ao longo de toda a altura da viga e conectadas mecanicamente através de parafusos ou barras roscadas. O autor refere que, no dimensionamento da altura e espessura dos elementos metálicos a utilizar, deve-se atender à relação entre os módulos de elasticidade da madeira e do aço, no sentido de homogeneizar a seção composta. Assim, aconselha a utilização de um coeficiente de homogeneização de 20:1, de forma a otimizar a compatibilização dos dois materiais em termos de rigidez.

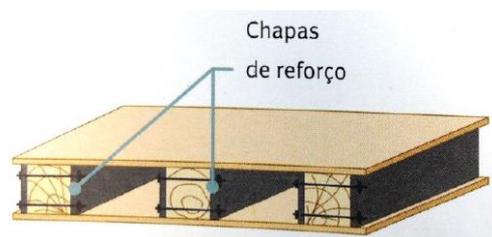


Figura 3.4- Reforço por introdução de chapas laterais (Appleton, 2003)

Conforme o referido anteriormente, em (Carneiro, 2012), é exposta outra variante desta solução, com a diferença de que as chapas de aço colocadas nas faces laterais têm apenas metade da altura das vigas (Figura 3.5). Pretende-se com isto que o perfil fique sujeito a esforços de compressão muito reduzidos, diminuindo significativamente a possibilidade de se darem fenómenos de instabilidade.



Figura 3.5- Reforço de viga através da colocação de chapas de aço colocadas lateralmente até metade da altura da viga existente (Carneiro, 2012)

No seu estudo, o autor refere que o modelo apresentado contempla apenas um reforço da viga à flexão e considera que esta é simplesmente apoiada e submetida a carga uniformemente distribuída. Desta forma, não irá prevenir outras verificações em E.L.U que não tenham sido cumpridas (esforço transversal, compressão perpendicular ao fio e bambeamento), sendo, caso se constate, necessário recorrer a outra solução para acautelar estas situações. O pressuposto descrito anteriormente constitui uma limitação ao modelo elaborado por este autor já que só apresenta resultados satisfatórios no caso de apenas a verificação da segurança da flexão não ser cumprida. No entanto, é referido que há a possibilidade de fazer uma adaptação do modelo para fazer face a solicitações de esforço transversal, dimensionando para isso a espessura de aço e ligadores necessários. É ainda importante salientar que a viga de madeira não deve estar

demasiadamente degradada, uma vez que vai ter uma importante função resistente, essencialmente de compressão. Caso isso não aconteça, a espessura de reforço necessária para que a estrutura mista apresente um comportamento satisfatório apresentará valores bastante elevados, tornando-se uma solução mais intrusiva e desadequada. A colocação destas chapas de reduzida espessura ao longo do comprimento mínimo para garantir a segurança à flexão apresenta bons resultados de rigidez e comportamento mecânico em E.L.U. e E.L.S. Além de incrementar a rigidez à flexão, tem também um comportamento razoável em serviço.

Como alternativa à colocação de chapas metálicas retangulares (Mazzolani, 1991), apresenta duas outras soluções que consistem na colocação de perfis UNP (Figura 3.6). Na primeira solução, o autor coloca igualmente dois perfis UNP nas faces laterais da viga, ligados apenas por um conector, centrado, na direção vertical do perfil. Esta solução pode apresentar problemas de instabilidade na parte superior dos perfis, quando solicitada a esforços de compressão naquele local. Na segunda solução apresentada, os perfis são conectados por dois ligadores e ainda por duas chapas metálicas colocadas na parte superior dos banzos, ligadas mecanicamente ao perfil e ao pavimento. Nesta solução, os problemas de instabilidade estão prevenidos pela colocação das chapas a ligar o pavimento ao perfil, impedindo desta forma que o perfil metálico instabilize localmente.

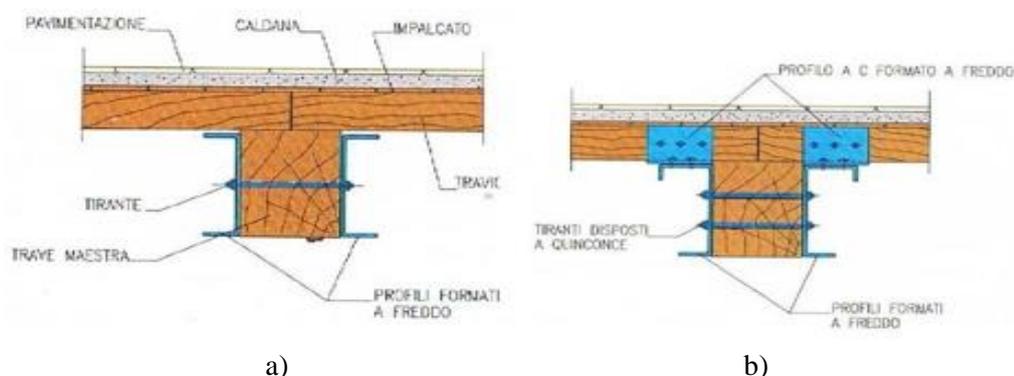


Figura 3.6 – a) Reforço de viga através da colocação de perfis UNP ligados por um tirante metálico à viga existente; b) Colocação de perfis UNP ligados por dois tirantes metálicos e por duas chapas (Mazzolani, 1991)

O autor acrescenta que, caso se utilizem perfis iguais nas duas soluções, a segunda é a que apresenta um comportamento mecânico e rigidez maiores. Isto ocorre devido à influência que os ligadores mecânicos têm nos parâmetros resistentes, apresentando a segunda solução um

deslizamento entre a viga e os perfis muito inferior, permitindo assim otimizar o comportamento dos dois materiais em conjunto.

(Mariani, 2004) apresenta também uma solução com perfis UNP (Fogura3.7). O autor defende ser conveniente proceder à realização de uma contra flecha na viga de madeira antes de a perfurar e colocar os perfis e os ligadores. Com esta ação, pretende-se que, após a instalação do reforço e colocação da estrutura em serviço, a grande parte das cargas sejam absorvidas pelos perfis e que a viga recupere as deformações presentes até à altura.

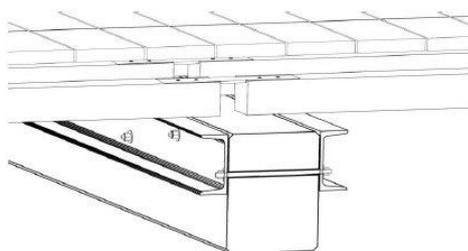


Figura 3.7 – Reforço de viga através da colocação de perfis UNP (Mariani, 2004)

Com a colocação de dois perfis UNP lateralmente (Figura 3.8), ligados através de parafusos ou parafusos, (Arriaga, 2002) defende que é possível aumentar a resistência da peça à flexão, assim como recuperar uma parte considerável da continuidade da viga degradada. O autor considera que é uma solução eficaz para a reparação de roturas ou de fendas de grande dimensão.

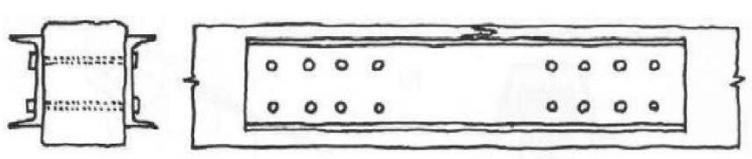


Figura 3.8 – Reforço de viga através da colocação de perfis UNP lateralmente (Arriaga, 2002)

As desvantagens desta solução estão relacionadas com a eventual necessidade regular de ajuste dos parafusos e ainda com o elevado impacto visual.

Para além do uso de chapas metálicas retangulares e perfis UNP, existem ainda algumas soluções que recorrem à utilização de perfis IPE. Nos trabalhos de (Mariani, 2004), (Mazzolani, 1991) e (Pinto, 2008), são apresentadas soluções deste tipo. As propostas expostas por (Mazzolani, 1991) e (Pinto, 2008) são bastante idênticas e consistem na colocação de dois perfis

juntamente com dois empalmes de madeira, que têm a função de preencher os vazios existentes entre a alma do perfil e a face da viga (Figura 3.9). Desta forma, o ligador mecânico irá dispor-se ao longo do perfil, do empalme de madeira e da viga, originando uma ligação de grande rigidez entre as secções. Na proposta de (Mazzolani, 1991), é utilizado apenas um tirante, e o reforço é colocado na zona de tração da viga de madeira, enquanto na solução exposta por (Pinto, 2008), são utilizados dois tirantes, e o reforço é colocado na zona de compressão. É importante salientar que os novos elementos de madeira a colocar devem ser da mesma espécie e possuir características (como, por exemplo, a resistência e o módulo de elasticidade) semelhantes à madeira existente, (Dias, 2008).

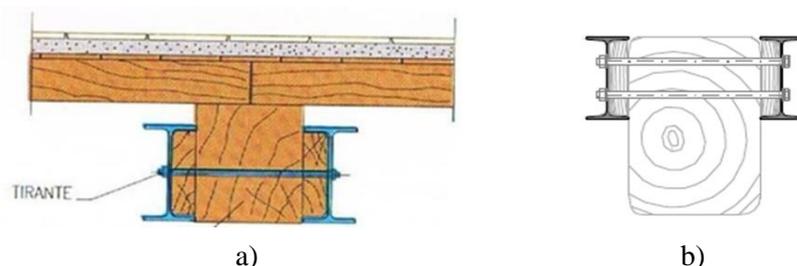


Figura 3.9 – a) Colocação lateral de perfis IPE com empalmes de madeira nas faces laterais na zona de tração (Mazzolani, 1991); b) Colocação lateral de perfis IPE com empalmes de madeira nas faces laterais na zona de compressão (Pinto, 2008)

(Mariani, 2004) expõe uma solução semelhante às de (Mazzolani, 1991) e (Pinto, 2008) com a diferença de não utilizar os empalmes de madeira entre os perfis e a viga (Figura 3.10). Desta forma, existe um vazio, e a alma do perfil apresenta-se assim como um ponto sensível, com possibilidade de instabilidade local quando sujeita a esforços de compressão, sendo, por isso, necessário verificar a segurança. Como forma de reduzir a suscetibilidade desta zona, é aconselhável dispor mais ligadores verticalmente, diminuindo assim a altura suscetível de instabilizar.

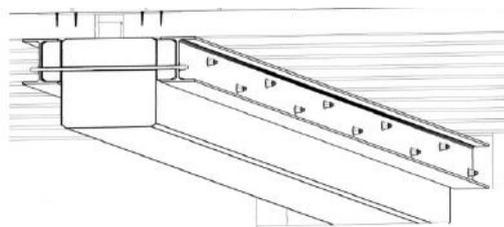


Figura 3.10 - Solução realizada através da colocação lateral de Perfis IPE segundo (Mariani, 2004)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
Colocação de chapas ou perfis metálicos nas faces laterais de vigas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformações excessivas;</li> <li>• Roturas locais.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidade de execução;</li> <li>• Conservação do pé direito;</li> <li>• Reversível;</li> <li>• Liberdade de aplicação;</li> <li>• Rapidez de execução;</li> <li>• Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausência de proteção ao fogo;</li> <li>• Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>• Impacto visual;</li> <li>• Dificil aplicação em secções circulares;</li> <li>• Possibilidade de instabilização local.</li> </ul>

Quadro 5 - Quadro resumo da solução: Colocação de chapas ou perfis metálicos nas faces laterais de vigas.

### 3.1.2 Intervenção na face inferior de vigas

As intervenções realizadas nas faces inferiores das vigas de madeira são também soluções possíveis para incrementar a sua resistência mecânica.

(Mazzolani, 1991) propõe a colocação de um chapa metálica na face inferior da viga (Figura 3.11 a)). Nesta proposta, a ligação do perfil à viga de madeira é realizada através de ligadores mecânicos introduzidos com um ângulo de 45°, medido desde o plano horizontal do perfil. Segundo o autor, apesar de a colocação dos ligadores metálicos com esta inclinação provocar uma menor resistência ao esmagamento localizado de cada um, este procedimento aumenta a aderência entre as fibras de madeira e melhora o comportamento da secção segundo solicitações de esforço transverso. Também (França, 2007) faz referência a uma solução bastante semelhante (Figura 3.11 b)).

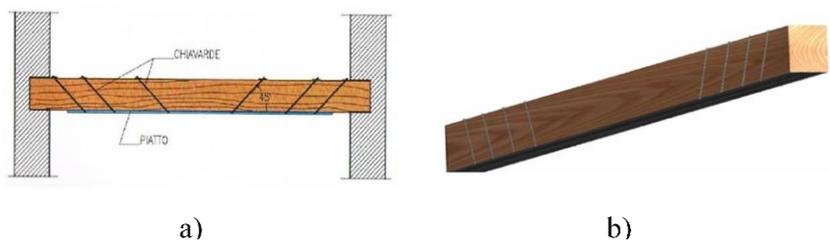


Figura 3.11 - Reforço de viga através da colocação de chapa metálica na face inferior, conectada mecanicamente por parafusos a 45°: a) Proposta de (Mazzolani, 1991); b) Proposta de (França, 2007)

(Arriaga, 2002) apresenta uma solução idêntica à aqui descrita, com a diferença de que os elementos de fixação mecânicos são colocados na vertical. Esta solução tem como objetivo absorver esforços de tração presentes na estrutura (Figura 3.12). De acordo com o autor, a viga de madeira tem um papel fundamental no trabalho em flexão, uma vez que irá absorver a totalidade dos esforços de compressão e ainda um pouco dos esforços de tração. Desta forma, para que esta solução apresente um comportamento satisfatório, a viga de madeira não se pode então encontrar em más condições, nem apresentar uma perda significativa da capacidade resistente em flexão.

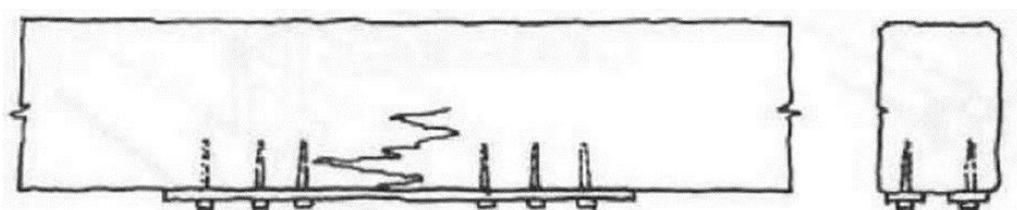


Figura 3.12 - Reforço de viga através da colocação de chapa metálica na face inferior

(P.B. Lourenço, 2014) refere que esta intervenção é utilizada com o objetivo de reduzir e evitar propagação de roturas ou fendas de grande dimensão ao longo do comprimento das vigas. Para (T. Ilharco, 2008) este é um sistema pouco prático pois, para que funcione, é importante apertar com alguma regularidade os parafusos (devido à sua fluência e à retração da madeira).

(Carneiro, 2012) apresenta também uma proposta com a colocação de uma chapa metálica na face inferior (Figura 3.13). Nesta solução, a prótese colocada reforça a resistência à flexão da secção e tem como função absorver grande parte dos esforços de tração a que será solicitada. Segundo o autor, a implantação de elementos metálicos na face inferior irá resultar num abaixamento do eixo neutro da secção conseguindo, desta forma, que a secção de madeira trabalhe essencialmente é compressão. Este pressuposto implica que a viga a reforçar não se encontre muito deteriorada e com uma redução considerável da sua resistência, uma vez que terá uma importante função mecânica aquando o funcionamento misto da secção. No caso de a viga se apresentar muito danificada e com uma resistência à flexão bastante reduzida, esta solução na face inferior não é aconselhável, pois não apresenta resultados satisfatórios. Seria necessário introduzir uma espessura considerável de chapa para a secção apresentar o comportamento pretendido, tornando-se desta forma uma solução muito intrusiva e de custo elevado.



Figura 3.13 - Reforço através da colocação de chapa metálica na face inferior da secção, ligada por parafusos de porcas a toda a altura (Carneiro, 2012)

A ligação entre a chapa e a viga de madeira deve ser efetuada mediante a introdução de um conector metálico, perpendicularmente à face inferior da viga. De acordo com o exposto, em função da altura da chapa e da viga, e também da disponibilidade do fabricante, este conector deve dispor-se ao longo de toda a altura da viga, sendo apertado com uma anilha e porca na face superior da viga de madeira. Esta situação aumenta a rigidez da ligação, originando desta forma menores deslizamentos entre a chapa e a viga e um melhor funcionamento da secção mista. Caso não seja possível colocar um conector ao longo de toda a altura da viga, devido às razões já mencionadas, o seu comprimento deve cumprir as disposições mínimas apresentadas na regulamentação (CEN;2004). Esta solução apresenta a desvantagem de originar a redução do pé direito existente na estrutura. Ao colocar uma chapa metálica na face inferior da viga, o teto será rebaixado numa proporção equivalente à espessura da chapa.

(Mariani, 2004) apresenta uma proposta de intervenção pela face inferior da viga, que consiste na colocação de dois perfis em forma de “L” nos vértices da secção. Nesta proposta, a viga de madeira assenta sobre os perfis, que se encontram ligados através de barras roscadas ou parafusos de porca à viga, garantindo assim a compatibilização e continuidade da secção. Esta solução é um pouco diferente das apresentadas neste subcapítulo, uma vez que a ligação não é realizada pela face inferior do perfil, mas sim pelas faces laterais, e também pelo facto de a aba superior do perfil poder suportar esforços de compressão existentes na secção. Sendo assim, esta solução é também uma intervenção nas faces laterais. (Brites, 2011) também faz referência a esta solução.

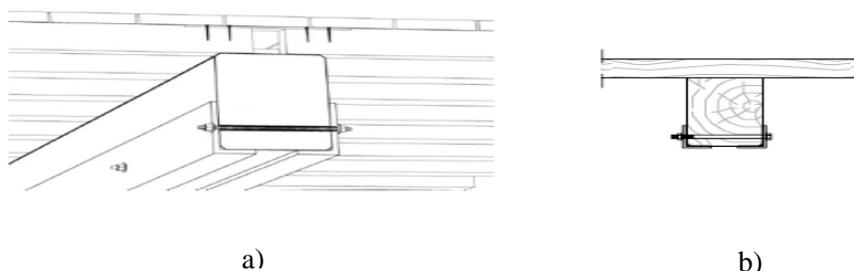


Figura 3.14 - Reforço realizado através da colocação de perfis em forma de "L" na face inferior da viga: a) (Mariani, 2004); b) (Brites, 2011)

A aplicação de perfis tipo UPN na face inferior da viga de madeira é outra possibilidade de reforço, referida em alguns estudos. Na proposta apresentada por (Brites, 2011), estes perfis são colocados dispondo os banzos em direção à parte superior. A ligação consiste na colocação de dois ligadores mecânicos na face inferior.

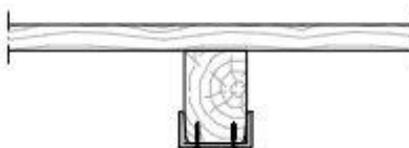


Figura 3.15 - Reforço de viga através da colocação de perfil UNP na face inferior, conectado mecanicamente com ligadores metálicos (Brites, 2011)

Para (Carneiro, 2012), esta solução não é muito aconselhável uma vez que apresenta bastantes inconvenientes. O autor considera que são necessários no mínimo três ligadores (dois lateralmente e um na face inferior) para a secção mista obter bons resultados. Também apresenta dificuldades na montagem e um custo levado, devido à quantidade de conectores de que necessita.

(Mariani, 2004) e (França, 2007) propõem ainda outra intervenção na face inferior (Figura 3.16 e 3.17) que consiste na colocação de um perfil metálico em forma de "T" invertido, constituído por uma chapa de aço vertical soldada a meio de outra chapa horizontal. Para a inserção deste elemento vertical na viga, é necessário realizar uma abertura no centro da seção da mesma. De acordo com o primeiro autor, o corte longitudinal a meio da seção deve ser efetuado através de uma "moto-serra" ou outro equipamento semelhante que apresente uma espessura sensivelmente dois centímetros superior à alma do perfil metálico. Para preencher os vazios

existentes dentro da viga de madeira, é aconselhável, em ambas as propostas, a colocação de uma resina epoxídica. Esta resina deve ser colocada antes da inserção do perfil. É importante salientar que, apesar da resina epoxídica utilizada ter características mecânicas e físicas que promovem uma aderência praticamente perfeita entre os dois materiais, estas condições não foram consideradas no dimensionamento da viga mista destas propostas. Nas duas soluções apresentadas, considerou-se que o aumento da resistência da seção foi apenas em função do perfil metálico e da ligação entre os dois materiais através de parafusos de porca ou outro tipo de conectores. Desta forma, a resina introduzida teve unicamente a função de preencher os vazios entre a abertura e os limites da chapa.

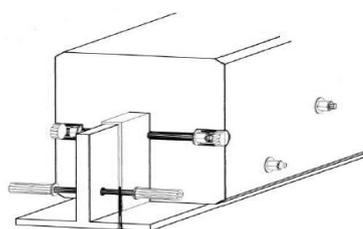


Figura 3.16 - Reforço de viga através da colocação de perfil "T" invertido na face inferior (Mariani, 2004)

A ligação do perfil metálico à viga é efetuada através de ligadores mecânicos, dispostos longitudinalmente ao longo de todo o comprimento de reforço, atravessando toda a sua largura e alma do perfil e também por ligadores inseridos na face inferior da chapa. Estes ligadores da face inferior da chapa devem ser colocados nos extremos da mesma e é necessário ter em atenção que o seu comprimento deve ser estimado de modo a não interferir com o comportamento dos ligadores dispostos na direção perpendicular.



Figura 3.17 - Reforço de viga através da colocação de perfil "T" invertido na face inferior (França, 2007)

De acordo com (Mariani, 2004), esta intervenção apresenta um comportamento satisfatório perante solicitações à flexão. Grande parte destes esforços é absorvida pela face inferior da chapa (face horizontal). A face vertical, além de absorver alguns destes esforços de flexão, promove uma boa resistência a esforços de corte. Esta solução alia, assim, uma boa resistência mecânica em relação aos dois tipos de solicitações, flexão e corte.

Em (França, 2007), é ainda exposta uma solução de intervenção na face inferior da viga de madeira que consiste na colocação de um perfil UNP. Para a inserção do perfil, é necessário realizar duas aberturas de espessura reduzida na viga de madeira, o que, segundo o autor, constitui uma desvantagem. Esta desvantagem está relacionada com a dificuldade de realizar uma abertura tão reduzida, levando assim a um desperdício de secção de madeira que será retirada. De acordo com o autor, o comportamento mecânico desta solução é idêntico ao da solução descrita anteriormente. Apresenta uma boa resistência à flexão, através da alma do perfil e através dos banzos, uma boa resistência ao corte.



Figura 3.18 - Reforço de viga através da colocação de perfil "U" na face inferior (França, 2007)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Colocação de chapas ou perfis metálicos na face inferior de vigas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformações excessivas;</li> <li>• Roturas locais.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Liberdade de aplicação;</li> <li>• Rapidez de execução;</li> <li>• Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminuição do pé direito;</li> <li>• Ausência de proteção ao fogo;</li> <li>• Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>• Impacto visual;</li> <li>• Desaconselhável para grandes degradações.</li> </ul>

Quadro 6- Quadro resumo da solução: Colocação de chapas ou perfis metálicos na face inferior de vigas.

### 3.1.3 Intervenção na face superior de vigas

As intervenções que serão descritas neste subcapítulo referem-se ao reforço de vigas de madeira à flexão a meio vão, através da colocação de chapas ou perfis, conectados mecanicamente, na face superior das mesmas. Normalmente, as soluções que envolvem intervenções na face superior das vigas requerem que seja removido o soalho e/ou outros elementos presentes no piso, de forma a ser possível implementá-las. No entanto, são bastante vantajosas quando existem elementos histórico-arquitetónicos no teto inferior às vigas, que devem ser preservados, ou quando a viga de madeira se encontra em bom estado de conservação, merecendo por isso ser deixada à vista (Mariani, 2004). Outra vantagem reside no facto de ser possível conservar o pé direito existente (Carneiro, 2012). Na sua tese de doutoramento, (C. González-Bravo, 2007) defende que, apesar destas intervenções serem realizadas pela face superior, em alguns casos, e por motivos de segurança, se deve intervir a partir da face inferior para a colocação do escoramento necessário. A colocação de uma chapa metálica conectada à viga de madeira através de elementos de fixação mecânicos, apresentada por (Arriaga, 2002), já foi abordada no presente trabalho, mais especificamente no subcapítulo 3.1.2., apresentando-se como uma intervenção pela face inferior e tendo como objetivo absorver esforços de tração presentes na estrutura. Neste subcapítulo, a solução é exposta novamente (Figura 3.19) contudo, diferencia-se pelo local onde será colocada a chapa e os esforços que irá suportar.

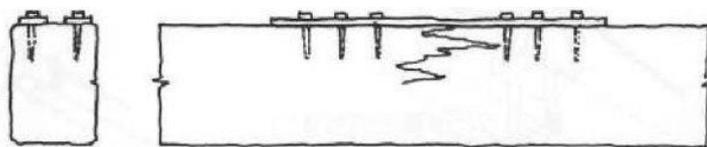


Figura 3.19 - Reforço de viga através da colocação de chapa metálica na face superior (Arriaga, 2002)

Nesta intervenção, a chapa metálica é colocada na face superior da viga e conectada mecanicamente através de pernos ou parafusos, ficando apenas sujeita a esforços de compressão. Segundo o autor, a viga de madeira continuará a ter um papel fundamental no trabalho em flexão, uma vez que irá absorver uma parte dos esforços de compressão e a totalidade dos esforços de tração. Este pressuposto implica que, para esta solução apresentar um comportamento satisfatório, a viga de madeira não se pode então encontrar em más condições, nem apresentar uma perda significativa da capacidade resistente em flexão. Tal como foi dito anteriormente, este é um sistema pouco prático, pois, para que funcione, é importante apertar com alguma regularidade os parafusos (devido à sua fluência e à retração da madeira) (T. Ilharco, 2008).

(Gattesco, 2006) apresenta também uma solução de reforço através da introdução de chapas (ver Figura 3.20). De acordo com o autor, esta é uma forma eficaz de conseguir uma maior rigidez não só da viga mas também de todo o pavimento. O método exposto consiste na fixação de uma chapa metálica, com cerca de 90mm de largura e 10mm de espessura, na face superior de cada viga através de ligadores metálicos, introduzidos com pancadas em furos previamente executados nas vigas.

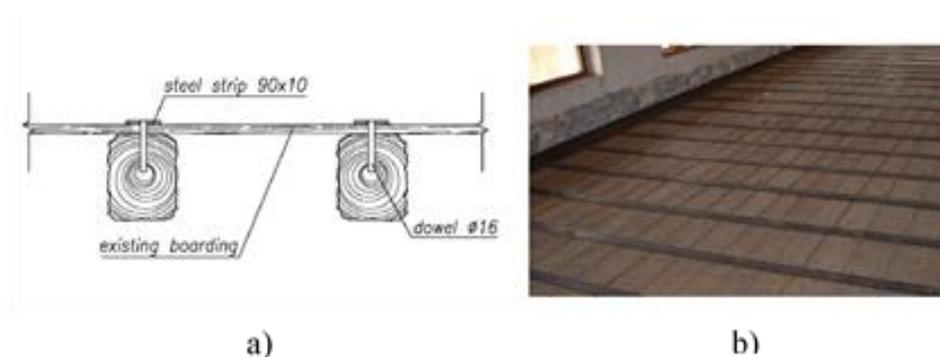


Figura 3.20 - a) Reforço através da colocação de chapas metálicas sobre as vigas (corte transversal), b) Exemplo prático de aplicação da solução num pavimento de madeira (Gattesco, 2006)

A intervenção proposta e aplicada por (Mazzolani, 1991) numa habitação em Milão, Itália, é bastante semelhante à solução descrita anteriormente (ver Figura 3.21). Sobre uma viga de madeira com 370mm de altura, foi colocada uma chapa de aço com 40mm de espessura, conectada por um parafuso de porcas com 20mm de diâmetro.

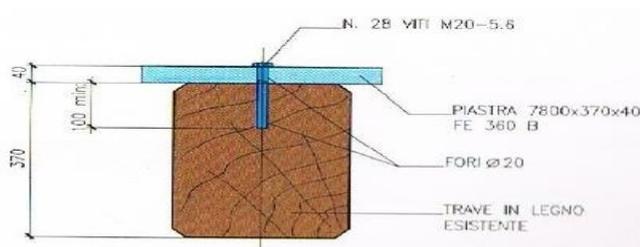


Figura 3.21 -Reforço de viga através da colocação de chapa metálica e conector mecânico na face superior (Mazzolani, 1991)

(Mariani, 2004) apresenta uma solução com funcionamento e disposição em tudo semelhante às descritas anteriormente, com a diferença de introduzir uma chapa vertical soldada à chapa horizontal no interior da secção de madeira, originando assim um perfil em “T” (ver Figura 3.22). Nesta intervenção, a chapa vertical irá absorver tanto esforços de compressão como de tração, enquanto a chapa horizontal irá trabalhar essencialmente à compressão. Com a colocação da chapa vertical, consegue-se também obter uma boa resistência aos esforços de corte. Para a introdução da chapa metálica vertical, é necessário realizar previamente uma abertura. A ligação é realizada por conectores mecânicos dispostos ao longo de todo o comprimento de reforço, atravessando a viga e a chapa vertical, e por conectores colocados na chapa horizontal a perfurar a face superior da viga. O autor aconselha ainda a colocação de uma formulação epoxídica, unicamente para preencher os espaços vazios.

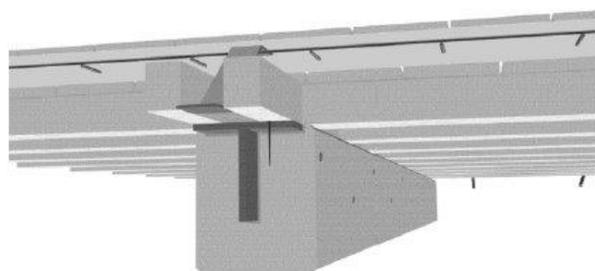


Figura 3.22 - Reforço de viga através da colocação de chapa vertical soldada a chapa horizontal na face superior da viga (Mariani, 2004)

A solução de intervenção exposta de seguida difere um pouco das descritas anteriormente pelo facto da chapa metálica ser inserida no interior da secção da viga de madeira (ver Figura 3.23). Esta proposta, apresentada por (Mariani, 2004) e adaptada de (Tampone, 1996), consiste, então, na colocação de chapas metálicas no interior da secção conectadas à viga através de ligadores mecânicos. Segundo o autor, é muito útil em vigas onde seja possível identificar localmente roturas ou fendas de dimensões consideráveis, procedendo à colocação de chapas no interior desses locais. Esta intervenção permite recuperar grande parte da rigidez e resistência mecânica da secção e, caso se efetue um dimensionamento cuidadoso, possibilita também uma melhoria na capacidade de flexão e de corte da viga. Quando solicitada a esforços de compressão, não apresenta problemas de instabilidade local uma vez que se encontra travada lateralmente pela viga de madeira e também pelos conectores mecânicos dispostos nas faces laterais.

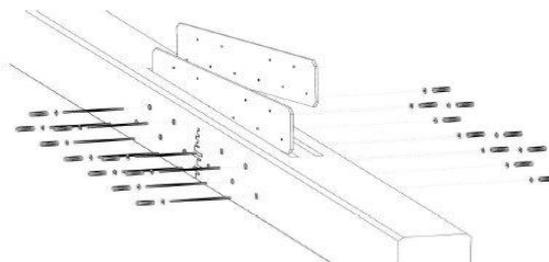


Figura 3.23 - Reforço de viga através da colocação de chapas metálicas no interior da secção, através de parafusos de porcas (Mariani, 2004)

A ligação das chapas metálicas à viga é realizada unicamente através de conectores mecânicos, espaçados transversal e longitudinalmente. A disposição destes deve ser ponderada e corretamente dimensionada em função dos espaçamentos mínimos requeridos não só pela madeira, mas também pelo aço, no sentido de desempenharem a sua função corretamente (Mariani, 2004). De forma a preencher os vazios existentes na secção de madeira após a realização da abertura, aconselha-se a colocação de resina epoxídica. De acordo com vários autores, a dimensão da abertura a realizar é função da chapa de reforço que se pretende colocar. (Brites, 2011) descreve uma proposta, que consta no trabalho de (Apolo, 1995), referindo ser aconselhável a realização de uma abertura com 10 milímetros superior à espessura da placa. No seu estudo, (Dias, 2008) defende que, no sentido de assegurar uma largura suficiente para que a formulação epoxídica penetre com facilidade, a abertura a realizar deve ter uma largura equivalente à espessura da chapa de reforço mais oito milímetros.

Outro tipo de intervenção na face superior alvo de inúmeros estudos consiste na colocação de perfis comerciais IPE e HEA. Um facto importante desde logo a ter em consideração no dimensionamento destas soluções é a possibilidade de instabilidade local a que o perfil está sujeito, por se encontrar quase na sua totalidade a trabalhar em compressão. O banzo superior pode estar salvaguardado da ocorrência deste fenómeno, uma vez que se encontra travado pelo pavimento. Também no banzo inferior não é suscetível a ocorrência de encurvadura local, pois está conectado à viga de madeira através de conectores que impedem este fenómeno. Desta forma, a alma do perfil, devido à sua maior exposição e dimensão, apresenta-se como o local mais frágil e por isso mais suscetível de demonstrar problemas desta ordem. Uma possibilidade de acautelar estes problemas é travar também a alma com o pavimento (Carneiro, 2012).

Segundo (Carneiro, 2012), a ligação do perfil à viga pode ser feita de dois modos diferentes. A primeira hipótese, apresentada nas propostas (Mazzolani, 1991) (ver Figura 3.24) (Brites, 2011) (ver Figura 3.25) e (Mariani, 2004) (ver Figura 3.26), consiste na utilização de conectores mecânicos, como, por exemplo, parafusos de porcas, dispostos a partir do banzo inferior do

perfil e perfurando a face superior da viga de madeira. O ligador mecânico pode perfurar toda a secção da viga de madeira (sendo fixo por uma porca na face inferior, apresentando desta forma necessidade de intervir também pela face inferior da viga) ou apenas uma parte da mesma. Para auxiliar a ligação entre as duas secções, pode ainda ser utilizada uma chapa metálica entre o banzo inferior e a face da viga (Mazzolani, 1991) (ver Figura 3.27). É muito importante salientar que, caso a ligação seja mal dimensionada ou conectada à face de madeira, o perfil metálico passa a atuar como carga aplicada na viga, o que conduz a uma situação bastante gravosa, podendo mesmo levar à rotura da viga (Carneiro, 2012).



Figura 3.24 - Reforço de viga através da colocação de perfil IPE ou HEA na face superior, conectado mecanicamente com ligadores metálicos que percorrem toda a altura da secção de madeira (Mazzolani, 1991)

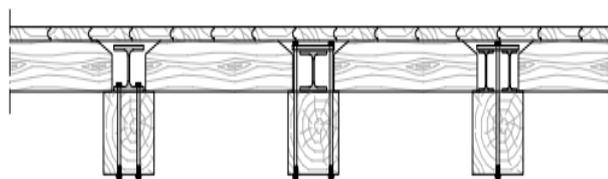


Figura 3.25 – Exemplos de reforço de viga através da colocação de perfil IPE ou HEA na face superior, conectado com ligadores metálicos que percorrem toda a altura da secção de madeira (Brites, 2011)

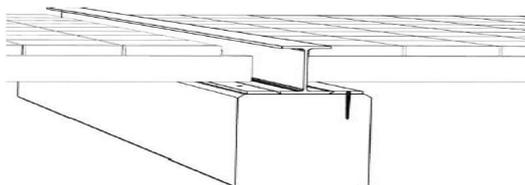


Figura 3.26 - Reforço de viga através da colocação de perfil IPE ou HEA na face superior, conectado mecanicamente com ligadores metálicos que perfuram apenas parte da viga (Mariani, 2004)



Figura 3.27 - Reforço de viga através da colocação de perfil IPE ou HEA na face superior e com chapa auxiliar, conectados mecanicamente com ligadores metálicos que perfuram apenas parte da viga

A segunda hipótese exposta em (Gómez) e (Mariani, 2004) consiste no envolvimento do perfil e da viga com uma cinta metálica, conectada por parafusos aos dois materiais. Segundo os autores, a cinta metálica é moldada *in situ* de acordo com a geometria da viga. Em alternativa, a cinta pode ser soldada ao perfil metálico, contudo, este procedimento envolve cuidados especiais de execução.

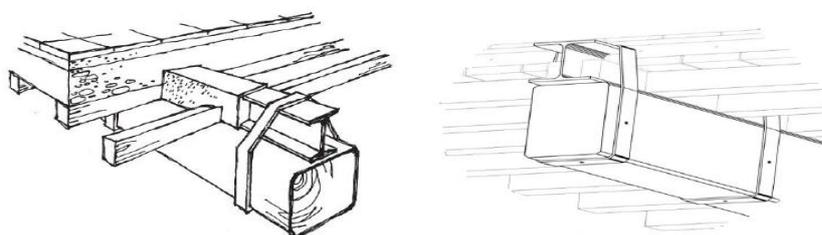


Figura 3.28 - Propostas de reforço de viga através da colocação de perfil IPE ou HEA com cinta metálica (Gómez) (Mariani, 2004)

Em (Jurina, 2004) e (Jurina, 2011), é exposto um exemplo prático da implementação de perfis HEA na reabilitação de um pavimento antigo em madeira na Casa Bossi, em Novara, Itália. No caso apresentado, o piso tinha uma deformação considerável que se encontrava disfarçada devido a um teto rebocado, tendo sido já realizada uma intervenção anterior com a colocação de tijolos cerâmicos entre as camadas de revestimentos existentes, mas que não foi eficaz nem suficiente para resolver o problema. A solução adotada pelo autor consiste no aproveitamento do espaço existente abaixo do pavimento, através da colocação de dois perfis HEA 120 ligados por uma chapa metálica nos banzos inferiores. Nesta chapa, foram introduzidos dois conectores metálicos com 16 mm de diâmetro a perfurar as camadas de pavimentos existentes até à viga de madeira.

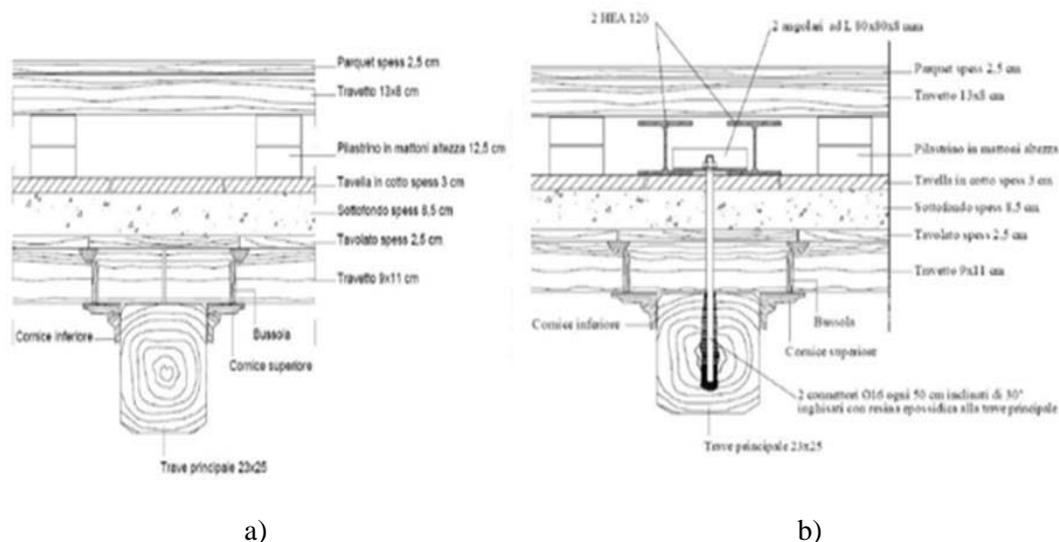


Figura 3.29 – a) Corte transversal da estrutura antes da intervenção (Jurina, 2004) (Jurina, 2011); b) Corte transversal da estrutura após a intervenção (Jurina, 2004) (Jurina, 2011)

Em (Mariani, 2004) é ainda exposta outra proposta de intervenção na face superior, que consiste na colocação de uma chapa metálica soldada ao banzo inferior de um perfil IPE ou HEA (ver Figura 3.30). Esta chapa metálica vertical vai ser introduzida na viga de madeira, sendo necessário realizar previamente uma abertura. A ligação da chapa à viga de madeira é realizada através de conectores mecânicos dispostos longitudinalmente. O autor refere que esta intervenção se justifica nos casos em que a viga de madeira se encontra muito degradada e sem capacidade mecânica para sustentar os esforços de tração a que iria estar sujeita, introduzindo-se assim a chapa no interior na viga para que, em conjunto, realizem essa função.

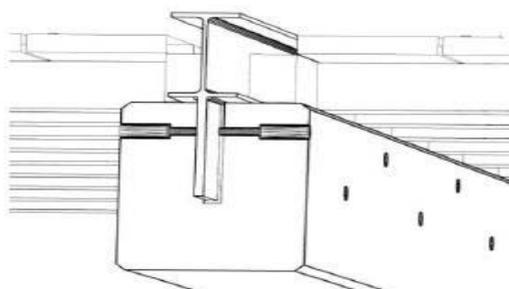


Figura 3.30 - Reforço de viga através da colocação de uma chapa vertical soldada a perfil IPE ou HEA (Mariani, 2004)

Existe ainda outro tipo de intervenção pela face superior da viga, que tem sido desenvolvida e descrita em alguns trabalhos por um conjunto de investigadores de Madrid, em Espanha, tendo sido realizados diversos ensaios experimentais e modelações numéricas para comprovar o seu comportamento. A finalidade dos diversos trabalhos era analisar o comportamento do reforço de vigas de madeira recorrendo à utilização de perfis metálicos UNP ligados à viga por parafusos na face superior, sem necessidade de intervir na face inferior (e. a. González-Bravo, 2010). Esta solução consiste na colocação de uma chapa metálica vertical soldada a meio de um perfil UNP (ver Figura 3.31). Esta chapa vai ser inserida dentro da secção de madeira, sendo necessário realizar previamente uma abertura. A ligação do perfil à viga de madeira é efetuada através de dois parafusos de porca dispostos longitudinalmente.

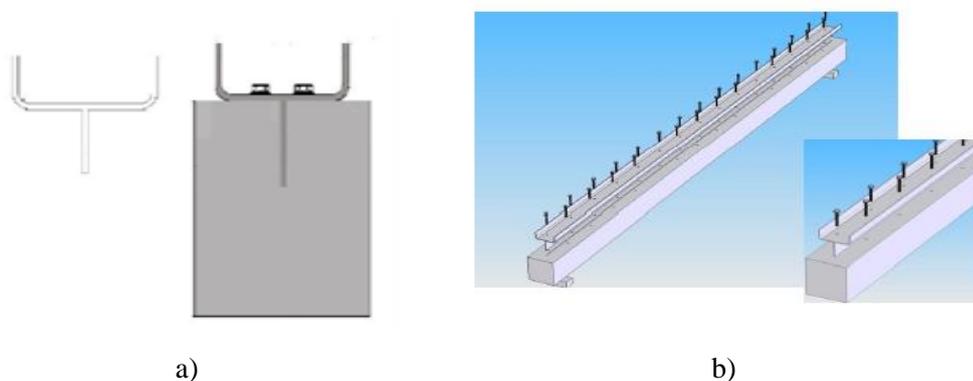


Figura 3.31 – a) Reforço de viga através da colocação de chapa vertical soldada a perfil UNP;  
b) Exemplo de aplicação do perfil metálico e dos conectores (González-Bravo, 2011) (C. González-Bravo, 2007)

Para as vigas de madeira que apresentem secções de largura superior, é apresentada uma variante do modelo acima descrito. Esta variante consiste na colocação de duas chapas verticais soldadas a um perfil UNP em vez de uma única chapa. Neste caso, a ligação do perfil à viga é realizada através de três conectores (ver Figura 3.32).

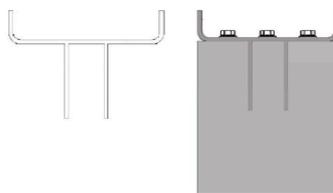


Figura 3.32 - Reforço de viga através da colocação de duas chapas verticais soldadas a perfil UNP (González-Bravo, 2011)

Os ensaios à flexão foram realizados em peças de madeira com e sem reforço (três grupos de dez peças, cinco reforçadas e cinco sem reforço) e com dimensões correntes (ver Figura 3.33).

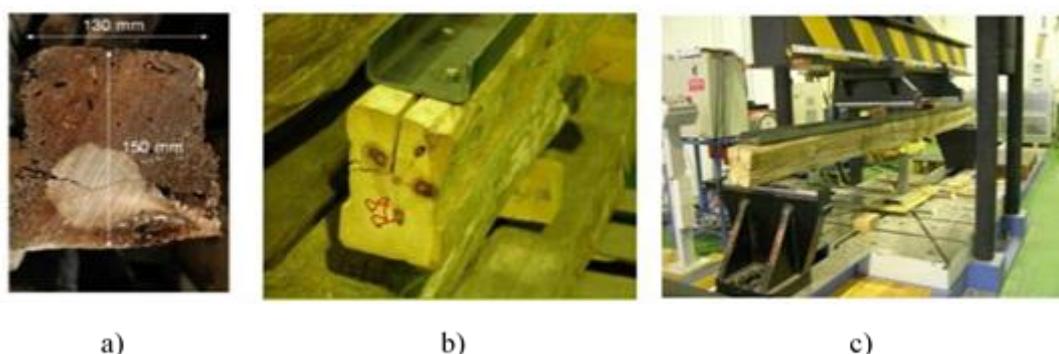


Figura 3.33 – a) Exemplo de uma das vigas ensaiadas (e. a. González-Bravo, 2010) ; b) Exemplo de viga de madeira com perfil metálico na face superior (C. González-Bravo, 2007); c) Ensaio de flexão de viga de madeira reforçada (C. González-Bravo, 2007)

Estes ensaios apresentaram resultados satisfatórios no que diz respeito à rigidez de flexão. A capacidade resistente das secções reforçadas também aumentou. Em contrapartida, a ligação entre os perfis metálicos e a madeira, concretizada através de parafusos porca, atingiu valores de rigidez relativamente baixos quando comparada com a rigidez máxima que poderia atingir em teoria. Segundo (e. a. González-Bravo, 2010), pode-se aumentar a rigidez da ligação utilizando parafusos sem pré-furação ou, então, colando o perfil metálico à viga de madeira através de resinas epoxy. Em conclusão, os autores referem que é viável aplicar este sistema de reforço apresentado em obra devido aos resultados obtidos e à facilidade de montagem. Permite resolver problemas de rigidez e resistência à flexão numa longitude de reforço equivalente a 10% / 20% do comprimento da viga.

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Colocação de chapas ou perfis metálicos na face superior de vigas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformações excessivas;</li> <li>• Roturas locais.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidade de execução;</li> <li>• Conservação da face visível;</li> <li>• Moderada intrusividade;</li> <li>• Liberdade de aplicação;</li> <li>• Rapidez de execução;</li> <li>• Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>• Ausência de proteção ao fogo;</li> <li>• Remoção do pavimento;</li> <li>• Aplicação limitada a secções retangulares;</li> <li>• Desaconselhável para grandes degradações.</li> </ul>

Quadro 7 - Quadro resumo da solução: Colocação de chapas ou perfis metálicos na face superior de vigas.

### 3.1.4 Reforço de vigas com cintas metálicas

O reforço por cintagem é uma solução de intervenção local a meio vão. Este método recorre a cintas metálicas que são apertadas e fechadas no local por um sistema mecânico. É sobretudo utilizado para controlar a fissuração através do aperto das faces do elemento (Duarte, 2004).

Esta hipótese de aplicação é abordada no trabalho de (Mariani, 2004) (ver Figura 3.34 Figura 3.35). A proposta apresentada por este autor consiste na colocação de cintas metálicas de aperto regulável e ainda de duas chapas metálicas horizontais, nas faces inferior e superior, conectadas à viga através de conectores espaçados longitudinalmente. As duas seções de aço colocadas estão ligadas por braçadeiras, também de aço, nas extremidades, podendo-se regular o aperto que exercem na seção através de barras roscadas.

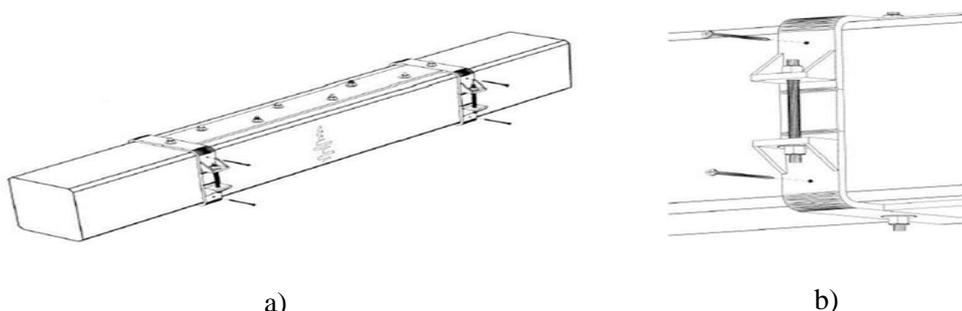


Figura 3.34 – a) Reforço de viga através da colocação de cintas metálicas com chapas metálicas nas faces superior e inferior; b) Pormenor da ligação mecânica efetuada por cintas com aperto regulável (Mariani, 2004)

As chapas horizontais introduzidas vão trabalhar tanto à compressão como à tração. Quando a viga se encontrar sujeita a esforços de flexão, a chapa inferior irá trabalhar à tração, enquanto a chapa superior absorverá grande parte dos esforços de compressão, isto faz com que esta proposta apresente boa resistência mecânica e rigidez efetiva da seção. O autor acrescenta que, caso as ligações a partir dos parafusos de porca e das cintas estejam bem dimensionadas, não existirão problemas de instabilidade local na chapa superior quando esta estiver submetida a esforços de compressão, uma vez que se encontra travada em todas as direções possíveis de ocorrer instabilidade.

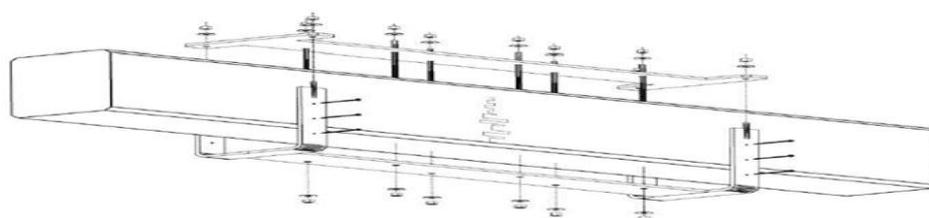


Figura 3.35 – Esquema de montagem das chapas metálicas, parafusos de porca e cintas reguláveis (Mariani, 2004)

(Mariani, 2004) refere também que esta solução apresenta técnicas de execução e instalação de fácil realização e que utiliza elementos de fabricação e montagem simples. Contudo, para a sua instalação em vigas de pavimento, é necessário remover o soalho e destruir o teto, sendo por isso uma solução pouco conveniente em estruturas com elementos decorativos que se pretendam manter. Uma outra possibilidade exposta em (T. Ilharco, 2008) consiste na aplicação de cintas metálicas através de pregos. Ao contrário da técnica anterior, esta não permite reajustes, o que pode tornar o sistema bastante ineficaz, tendo em conta as variações volumétricas consideráveis da madeira. De acordo com (Duarte, 2004), este fator, acrescido do fato de não existirem regras de dimensionamento bem definidas, torna esta solução bastante discutível, não sendo por isso aconselhável na reparação de todo o tipo de fendas nem em elementos cuja evolução do comportamento não possa ser diretamente observável.



Figura 3.36 – Uso de cintas metálicas para reforço de vigas no Convento de Corpus Christi, Vila Nova de Gaia (Ilharco;2008)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
Colocação de cintas metálicas em vigas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Roturas locais.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>Facilidade de execução;</li> <li>Reversível;</li> <li>Rapidez de execução;</li> <li>Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Remoção do pavimento;</li> <li>Ausência de proteção ao fogo;</li> <li>Impacto visual;</li> <li>Introdução de materiais diferentes dos originais.</li> </ul>

Quadro 8 - Quadro resumo da solução: Colocação de cintas metálicas em vigas.

### 3.1.5 Colocação de tirantes metálicos

A colocação de tirantes metálicos é uma solução de intervenção geralmente utilizada em vigas com vãos bastante extensos e que apresentem deformações excessivas, normalmente devidas a reduções de seção resistente e à fluência (ver Figura 3.37). Este sistema de tirantes metálicos destina-se a aplicar uma contra flecha igual ao valor da deformação, anulando a flecha inicial presente (Reis). Trata-se de uma solução exposta por diversos autores e com bastante potencial de aplicação, contudo de utilização pouco frequente. Exige uma verificação estrutural avançada, controle de execução rigoroso, é visivelmente pouco estética, ocupa bastante espaço e destina-se essencialmente a corrigir as deformações sem aumentar, pelo menos consideravelmente, a capacidade resistente do elemento (Arriaga, 2002) (Duarte, 2004). A estabilidade da estrutura tem de ser verificada e analisada não só para a solução final, como também no decurso das diferentes fases construtivas.

Em Portugal, este sistema já se utiliza há bastantes anos, sendo que antigamente era apenas aplicado em edifícios cujos proprietários possuíam posses económicas ou ainda como solução para melhorar o comportamento sob a ação sísmica em edifícios que exigiam segurança elevada a esta solicitação (Barros, 2006).

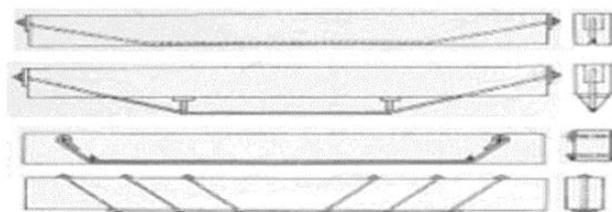


Figura 3.37 - Exemplos de reforço de viga através de tirantes metálicos (Arriaga, 2002)

De uma forma geral, esta solução consiste na aplicação de um sistema de pré-esforço recorrendo a tirantes de aço, colocados exteriormente à viga, na sua face inferior (ver Figura 3.38). Através da aplicação de pré-esforço nos tirantes, consegue-se contrariar as cargas aplicadas no pavimento e que provocam a deformação da viga. Segundo (T. Ilharco, 2008), após a colocação do tirante em tensão, este fica a trabalhar em tração e a viga de madeira à flexão composta, com momentos fletores menores. O autor refere ainda que é necessário acompanhar a contra flecha induzida pelo pré-esforço de forma a não provocar uma rotura da viga. Assim, a intensidade da tensão do cabo deve ser regulada por um esticador que se encontra nas extremidades da viga, de acordo com a tensão necessária para contrariar a flecha existente.

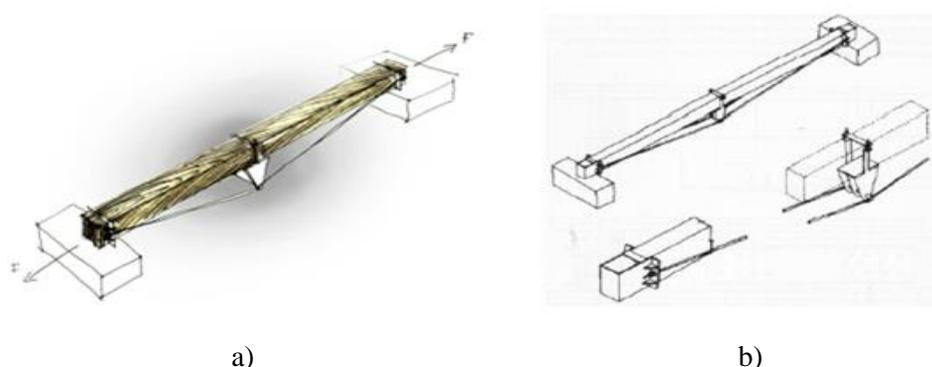


Figura 3.38 - Reforço de viga através da aplicação de pré-esforço com tirantes metálicos: a) (Cunha, 2011); b) (Arriaga, 2002)

Quando usada como reforço para a estabilidade sísmica de edifícios antigos, esta solução revela um comportamento satisfatório. De acordo com (Barros, 2006), apresenta um comportamento passivo no reforço anti-sísmico, passando a funcionar à tração na ocorrência do fenómeno.

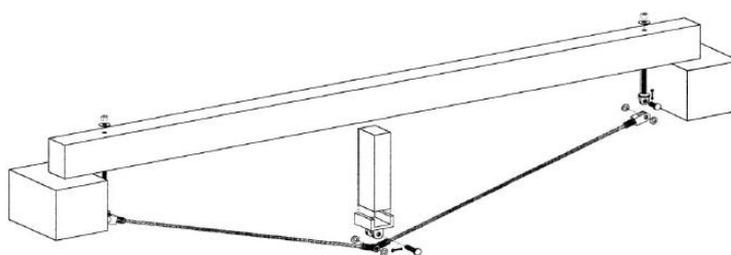


Figura 3.39 – Reforço de viga por aplicação de pré-esforço com tirantes metálicos (Mariani, 2004)

No que diz respeito à execução desta solução em obra, (Arriaga, 2002) defende ser necessário proceder ao escoramento da viga para se efetuarem os trabalhos e refere que as ancoragens do tirante na viga são normalmente de execução bastante difícil, podendo ser necessário desmontar a mesma.



Figura 3.40 – a) e b) Exemplo de reforço de viga através de tirante metálico (Dias, 2008)

Esta técnica é também aplicável ao reforço de coberturas (ver Figuras Figura 3.41 Figura 3.42 e Figura 3.43), nomeadamente das asnas. Existem inúmeros estudos e experiências de reforço de asnas com sistema de tirantes de aço ligados às faces das estruturas, nomeadamente em Itália (Marradi 1989 e Messina 1989). Apresentam-se, de seguida, alguns casos em que se utiliza o reforço através de cabos de aço simplesmente atirantados aos apoios e outros em “W”.

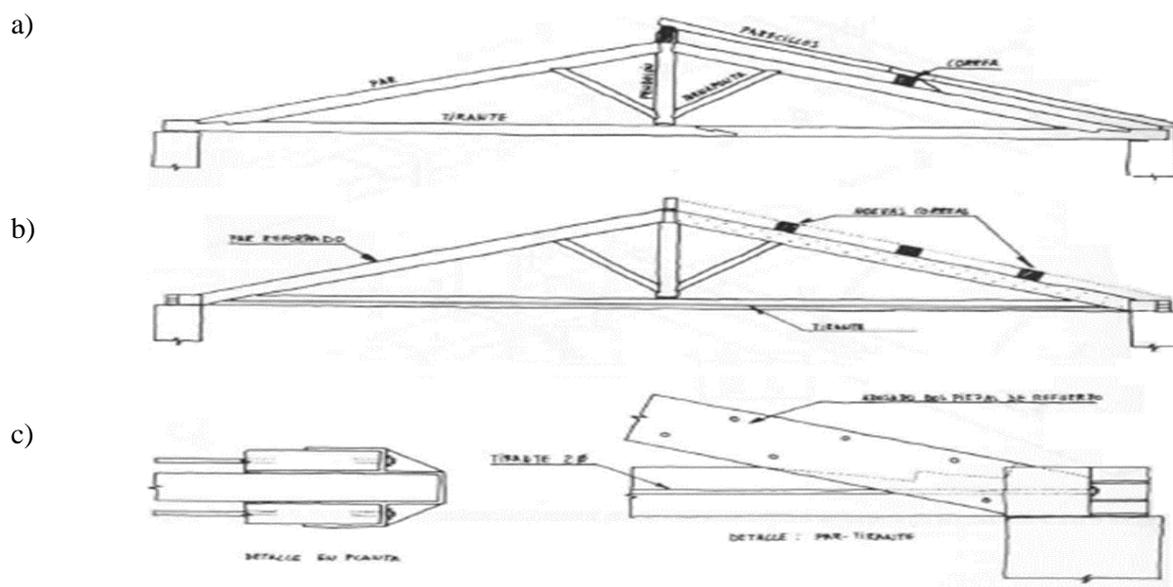


Figura 3.41 – a) e b) Reforço de cobertura através da aplicação de pré-esforço; c) Linha da asna reforçada com tirantes metálicos a impedir a deformação da perna (Arriaga, 2002)

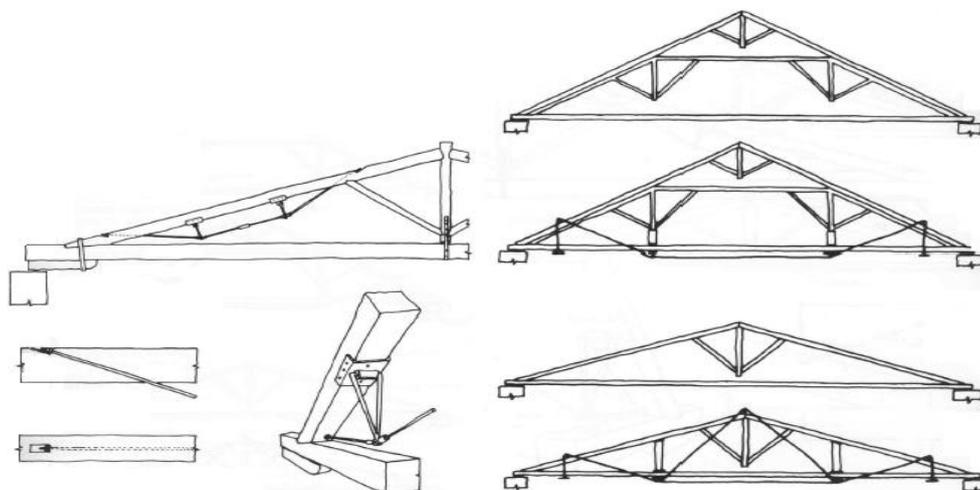


Figura 3.42 – Exemplos de reforço de asnas através da aplicação de tirantes metálicos (Arriaga, 2002)

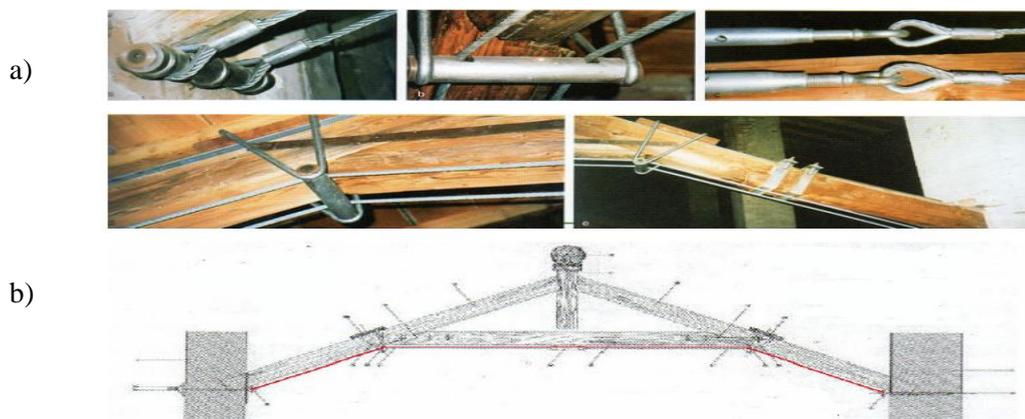


Figura 3.43- a) Pormenor das ligações dos tirantes de aço; b) Esquema geral da aplicação dos tirantes (Pinto, 2008)

Outra possível aplicação desta solução consiste na colocação de tirantes de aço através dos barrotes existentes no pavimento (ver Figura 3.44). As barras de aço são fixadas nos cantos das divisões e colocadas em tensão por meio de esticadores localizados a meio-vão, entre os barrotes (Figura 3.44). Esta solução permite a obtenção de um sistema mais rígido do que o original, que resulta do aumento ligeiro da massa do pavimento e das suas vibrações próprias. Para além disso, contribui para a redução de deslocamentos, bem como para a diminuição das

forças de corte junto das paredes resistentes. É uma técnica que exige mão-de-obra qualificada, contudo, tem pouca implicação no funcionamento do edifício e no impacto visual. Desta forma, é uma técnica bastante recorrente na reabilitação de pavimentos, principalmente quando se trata de pequenas áreas.

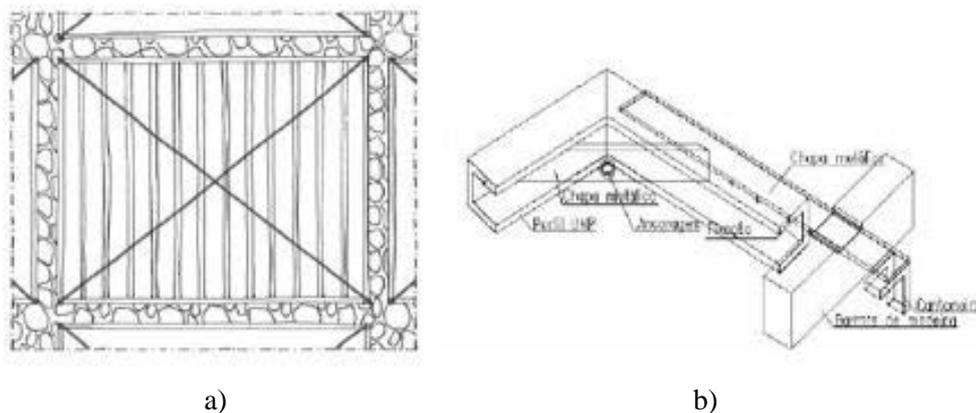


Figura 3.44 – a) Reforço do pavimento com tirantes de aço; b) Pormenor da ligação nos cantos (Branco, 2007)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Colocação de tirantes metálicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deformações excessivas.</li> </ul>	Local/ Global	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reversível;</li> <li>Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>Reforço da estabilidade sísmica;</li> <li>Reduzida intrusividade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Controlo de execução rigoroso;</li> <li>Mão-de-obra especializada;</li> <li>Impacto visual;</li> <li>Não melhora a capacidade de carga;</li> <li>Introdução de materiais diferentes dos originais.</li> </ul>

Quadro 9 - Quadro resumo da solução: Colocação de tirantes metálicos.

### 3.1.6 Colocação de perfis metálicos sob as vigas

Segundo(Ferreira, 2009), a colocação de perfis metálicos sob as vigas é uma solução utilizada sobretudo em situações de emergência, onde há necessidade imediata de reforçar o pavimento

devido ao seu elevado estado de degradação, não havendo tempo para fazer um estudo detalhado e específico sobre as condições estruturais do pavimento e conseqüentemente as soluções de reforço mais adequadas (ver Figura 3.45). Esta solução, apresentada por (Arriaga, 2002), consiste em apoiar o vigamento do pavimento em um ou mais perfis metálicos perpendiculares ao vigamento existente. Estes perfis podem estar apoiados quer nas paredes com as quais as suas extremidades se encontram quer em perfis paralelos ao vigamento de madeira. Apesar de ser uma solução pouco intrusiva e de apresentar bons resultados, uma vez que a colocação de uma viga nova irá fazer aumentar consideravelmente a rigidez e resistência (também da zona de apoio), tem a grande desvantagem de aumentar bastante a espessura do pavimento e criar um impacto visual considerável, o que a torna restrita a situações de emergência.

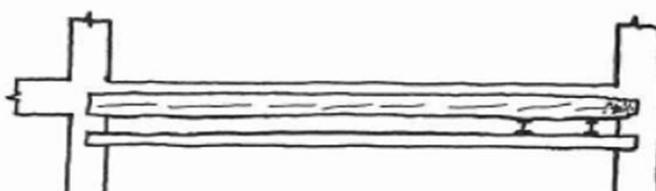


Figura 3.45 – Reforço por colocação de perfis metálicos sob as vigas (Arriaga, 2002)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Colocação de perfis metálicos sob as vigas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformações excessivas;</li> <li>• Degradação dos apoios.</li> </ul>	Local/ Global	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidade de execução;</li> <li>• Reduzida intrusividade;</li> <li>• Rapidez de execução;</li> <li>• Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>• Reversível.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução do pé direito;</li> <li>• Ausência de proteção ao fogo;</li> <li>• Impacto visual;</li> <li>• Introdução de materiais diferentes dos originais.</li> </ul>

Quadro 10 - Quadro resumo da solução: Colocação de perfis metálicos sob as vigas.

### 3.1.7 Colocação de perfis metálicos paralelos ao vigamento

Trata-se de uma solução de reforço global frequentemente utilizada em obras de reabilitação e que consiste na colocação de vigas metálicas paralelas ao vigamento já existente. Estas vigas metálicas são independentes das vigas de madeira originais (Brites, 2011) (ver Figuras Figura

3.46 Figura 3.47). A finalidade deste procedimento é diminuir as cargas exercidas sobre as vigas de madeira, contribuindo assim para a redução do nível de esforços presentes na estrutura. Desta forma, consegue-se aumentar a rigidez do pavimento e, conseqüentemente, reduzir a deformação e as vibrações presentes, (T. Ilharco, 2008). Por outro lado, segundo (Appleton, 2003), esta solução apresenta algumas dificuldades e limitações, relacionadas com aspetos estruturais, construtivos e arquitetónicos, sendo, no entanto, uma forma fácil de resolver problemas de deformação excessiva sem diminuir o pé-direito.

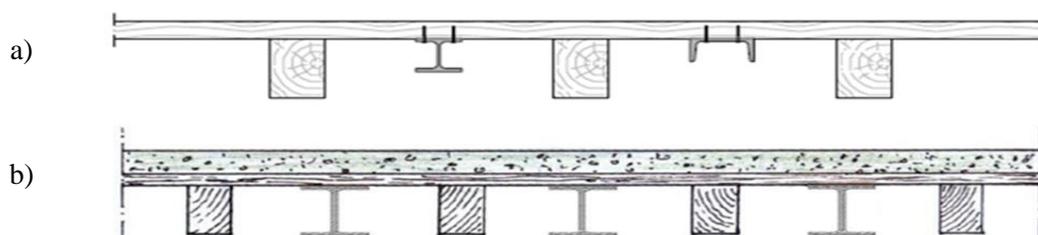


Figura 3.46 - Exemplo de reforço de pavimento através da colocação de vigas metálicas paralelas ao vigamento existente: a) (Brites, 2011); b) (Carneiro, 2012)

Na implementação desta solução, a primeira dificuldade estrutural relaciona-se com a necessidade de garantir elementos de apoio para as novas vigas metálicas, o que geralmente significa carregar pontualmente as paredes resistentes. Desta forma, é obrigatório verificar se as paredes têm capacidade para suportar estas cargas adicionais ou se necessitam de ser igualmente reforçadas. A realização de ancoragens nas paredes, com chapas metálicas e ligações aparafusadas, para apoiar as novas vigas é um procedimento que apresenta dificuldades de execução em obra. A falta de existência de pé direito livre sem interferir com a organização normal de portas e janelas e as dificuldades de aplicação em locais onde existam elementos decorativos essenciais e de grande valor são também outros inconvenientes desta solução.



Figura 3.47 – Exemplo de reforço através da aplicação de vigas metálicas paralelas ao vigamento existente (T. Ilharco, 2008)

Segundo (T. Ilharco, 2008), outra dificuldade desta intervenção são os problemas de compatibilização de distribuição de cargas com as vigas de madeira existentes. Esta situação ocorre devido à diferença de módulos de elasticidade entre os dois elementos, originando comportamentos diferentes, o que por vezes pode fazer com que a totalidade do carregamento seja suportada pela viga metálica. De forma a precaver esta situação, o autor aconselha que os perfis metálicos sejam dimensionados para uma rigidez de flexão semelhante à das vigas de madeira.

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Colocação de vigas metálicas paralelas ao vigamento existente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformações excessivas;</li> <li>• Vibrações excessivas.</li> </ul>	Global	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conservação do pé direito;</li> <li>• Rapidez de execução;</li> <li>• Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>• Reversível.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausência de proteção ao fogo;</li> <li>• Impacto visual;</li> <li>• Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>• Incompatibilidades construtivas.</li> </ul>

Quadro 11 - Quadro resumo da solução: Colocação de vigas metálicas paralelas ao vigamento existente.

### 3.1.8 Colocação de perfis metálicos a dividir o vão das vigas

A presente solução é bastante semelhante à descrita anteriormente com a diferença de que as vigas metálicas são introduzidas perpendicularmente ao vigamento existente, dividindo assim o vão (T. Ilharco, 2008) (ver Figura 3.48). A finalidade desta solução é diminuir o nível de vibrações e deformações do pavimento. Segundo (Appleton, 2003), é uma solução prática e eficaz uma vez que, com a colocação de uma viga de apoio a meio vão do pavimento, a deformabilidade deste se reduz cerca de 8 vezes (embora seja necessário quantificar o efeito da deformação da própria viga de apoio). Apesar de prática em termos de execução, tem vários inconvenientes associados, a maior parte deles são os mesmos que foram referidos na solução anterior (ver secção 3.1.7).



Figura 3.48 - Exemplo de reforço através da aplicação de vigas metálicas perpendiculares ao vigamento (T. Ilharco, 2008)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Colocação de vigas metálicas perpendiculares ao vigamento existente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformações excessivas;</li> <li>• Vibrações excessivas.</li> </ul>	Global	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidade de execução;</li> <li>• Rapidez de execução;</li> <li>• Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>• Reversível.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausência de proteção ao fogo;</li> <li>• Impacto visual;</li> <li>• Redução do pé direito;</li> <li>• Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>• Incompatibilidades construtivas.</li> </ul>

Quadro 12 - Quadro resumo da solução: Colocação de vigas metálicas perpendiculares ao vigamento existente.

### 3.1.9 Colocação de novas estruturas de suporte nas coberturas

A presente técnica tem como objetivo reduzir os esforços actantes em elementos da estrutura da cobertura, através da colocação de novos elementos metálicos. Uma solução consiste na introdução a meio-vão de uma nova asna ou estrutura pernas-tirante em aço de forma a reduzir o vão das asnas ou de estruturas simples de pernas e tirante existentes. Outra alternativa de reforço relativamente simples é a colocação de novas asnas que dividam o vão inicial em vários vãos menores. Nas situações em que o vão a vencer pelas asnas é muito extenso, e o reforço destas sem a introdução de novos apoios intermédios não é viável, uma hipótese existente consiste na colocação de novos pilares metálicos e na modificação da estrutura da cobertura nessa zona, o que nem sempre é recomendável. No cálculo destas soluções de reforço, é

necessário ter em consideração a deformação das peças de reforço e o assentamento dos apoios intermédios, que poderá ser diferenciado, introduzindo desta forma esforços não previstos na estrutura existente (Lopes, 2007).

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
Colocação de novas estruturas de suporte nas coberturas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deformações excessivas.</li> </ul>	Global	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reversível;</li> <li>Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>Facilidade de execução;</li> <li>Rapidez de execução.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>Impacto visual;</li> <li>Ausência de proteção ao fogo.</li> </ul>

Quadro 13 - Quadro resumo da solução: Colocação de novas estruturas de suporte nas coberturas

### 3.1.10 Colocação de chapas metálicas sobre o pavimento

A colocação de chapas sobre o pavimento é uma solução de reforço global referida em inúmeros estudos. Tem como objetivo melhorar o desempenho global do pavimento à flexão, assim como promover o comportamento deste segundo ações horizontais. De acordo com (Brignola, 2008), esta solução consiste na colocação de tiras de aço leve diagonalmente ao vigaamento, de preferência a 45°, ligadas por parafusos não só ao soalho existente sobre o pavimento mas também nos encontros com as paredes (ver Figura 3.49). (Baldessari, 2010) refere que, através desta solução, não são acrescentadas cargas ao pavimento, uma vez que as tiras de aço aplicadas têm um peso extremamente reduzido, sendo também uma intervenção reversível e que apresenta um aumento de ductilidade da estrutura.

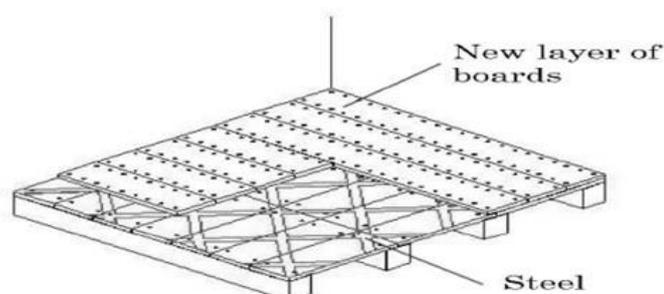


Figura 3.49 - Reforço de pavimento através de chapas metálicas ligadas ao soalho existente

(Baldessari, 2010) realizou diversos ensaios experimentais em pavimentos de madeira reforçados com esta solução e obteve resultados muito satisfatórios no que diz respeito à capacidade de dissipação de carga (ver Figura 3.50). No seu estudo, o autor acrescenta que o ponto fraco desta solução é a instabilidade das placas de aço quando sujeitas a tensões de compressão. Neste caso, o problema pode ser acautelado com a aplicação de outra camada de soalho superiormente.



Figura 3.50 – a) Esquema de ensaio do reforço de pavimento; b) Pormenor da ligação (Baldessari, 2010)

Em (Marini, 2006) é referida ainda outra técnica de reforço global do pavimento, que consiste em colocar chapas de aço finas (2 mm) sobre o pavimento existente, que são fixadas através de parafusos metálicos, de maneira a evitar a encurvadura induzida por esforços no plano do pavimento (ver Figura 3.51).

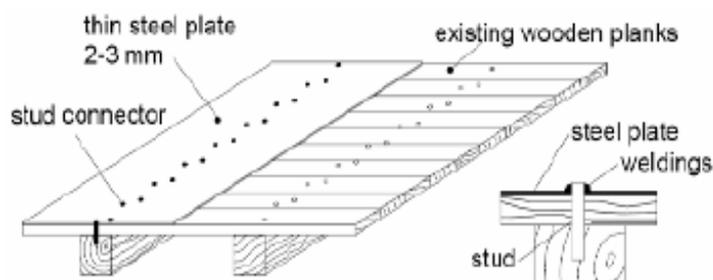


Figura 3.51 - Reforço de pavimento através da aplicação de chapas metálicas finas (Marini, 2006)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
Colocação de chapas metálicas sobre o pavimento	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deformações excessivas.</li> </ul>	Global	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aspecto visual;</li> <li>Aumento da ductilidade;</li> <li>Proteção ao fogo;</li> <li>Facilidade de execução;</li> <li>Rapidez de execução;</li> <li>Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>Reversível.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>Possibilidade de instabilização local.</li> </ul>

Quadro 14 - Quadro resumo da solução: Colocação de chapas metálicas sobre o pavimento

### 3.2 Introdução de colas epoxídicas com peças metálicas ou materiais compósitos

#### 3.2.1 Introdução de placas de reforço seladas com formulações epoxídicas

A solução a ser apresentada neste subcapítulo é abordada em diversos trabalhos científicos e consiste na colocação de placas de aço ou FRP no interior da secção, embebidos numa matriz epoxídica (ver Figuras Figura 3.52 e Figura 3.56). (Arriaga, 2002) refere que esta solução apresenta uma grande rigidez na ligação e defende que se trata de uma das técnicas de mais cómoda execução. A ligação entre os dois materiais é assim efetuada através da colocação da matriz epoxídica no interior das aberturas efetuadas na viga, obtendo desta forma um comportamento perfeitamente rígido e sem deslizamentos (Arriaga, 2002). De acordo com (T. Ilharco, 2008), esta técnica é particularmente adequada na recuperação da resistência mecânica em zonas degradadas por apodrecimento, rotura ou ainda para tratar vigas com grandes secções transversais em que aparecem fendas de secagem.

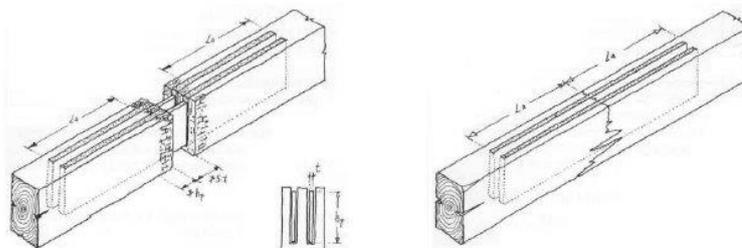


Figura 3.52 - Reforço através da aplicação de placas de reforço internas seladas com cola epoxídica (Arriaga, 2002)

No que diz respeito à dimensão da abertura necessária para colocar as placas e à formulação epoxídica (Arriaga, 2002), refere apenas que deverá ter espessura suficiente para verter a solução. Outros autores defendem que a dimensão da abertura é função da placa de reforço que se pretende introduzir. (T. Ilharco, 2008) afirma que, no sentido de assegurar uma largura suficiente para que a formulação epoxídica penetre com facilidade, a abertura deve ter uma largura equivalente à espessura da placa mais oito milímetros. Já (Brites, 2011) refere ser necessário realizar uma abertura dez milímetros superior à espessura da placa. Outro aspeto importante, referido por (Arriaga, 2002), é que, na realização da abertura, é necessário ter em atenção que o empalme se deve realizar na madeira sã e ter um comprimento suficiente para a transmissão dos esforços de corte e de flexão que se deem na secção.

O processo construtivo deste método consiste na execução das seguintes etapas fundamentais (ver Figura 3.53):

- Escoramento na viga;
- Execução das aberturas para alojamento das placas, a partir da face superior. Esta etapa deve ser realizada com precaução para evitar desvios, garantir uma profundidade regular das caixas e uma largura suficiente para que a resina penetre com facilidade;
- Aplicação da cola epoxídica até chegar a um terço da profundidade das caixas;
- Introdução das placas, fazendo com que a cola epoxídica flua pelas folgas.

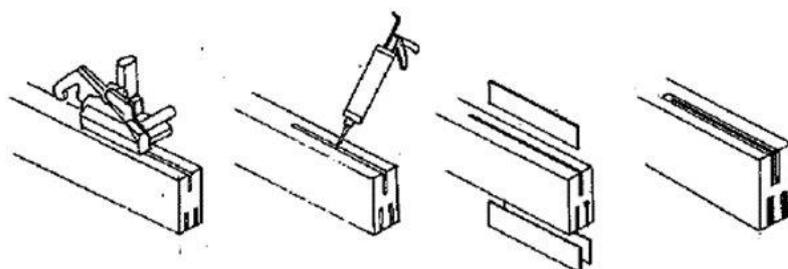


Figura 3.53 – Procedimentos do reforço de vigas através da aplicação de placas de reforço internas, seladas com cola epoxídica (Pinto, 2008)

Segundo (Costa, 2009), a realização deste tipo de operações exige um controlo de temperatura rigoroso. Desta forma, para esta solução, aconselha-se uma temperatura ambiente a rondar os 15°C, evitando as baixas temperaturas que poderiam causar a não polimerização da cola, assim

como as altas temperaturas, que frequentemente causam uma secagem da cola demasiado rápida.

(Arriaga, 2002) expõe uma solução que consiste no uso de fibras de carbono embebidas em resina de epóxico (ver Figura 3.54). Nesta proposta, o autor coloca as fibras de carbono na parte inferior da seção, funcionando assim como armaduras de tração da peça.

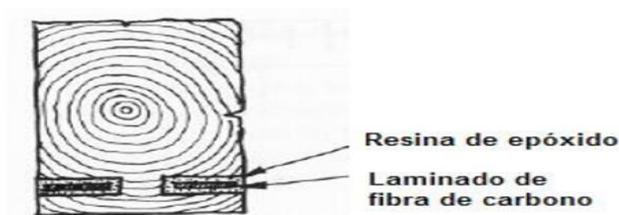


Figura 3.54 - Viga reforçada com laminado de carbono (Arriaga, 2002)

Contudo, a colagem do sistema pode ser realizada quer face tracionada da viga, quer na face tracionada e na face comprimida simultaneamente (ver Figura 3.55).



Figura 3.55 – a) Reforço na zona tracionada; b) e c) reforço na zona tracionada e comprimida (Pinto, 2008)



a)

b)

Figura 3.56 – Reforço de viga através da colocação de placas de CFRP seladas com cola epoxídica: a) (Pinto, 2008); b) (Costa, 2009)

Segundo (Garcia, 2013) de forma a obter melhor eficiência deste sistema é importante ter em atenção o posicionamento das placas. Desta forma, estas devem ser inseridas na peça de madeira com a sua direção principal orientada paralelamente às fibras da madeira, para que a rigidez e resistência à flexão sejam aumentadas (ver Figura 3.57). Neste caso, não se pretende aumentar a resistência do elemento paralelamente às fibras, mas sim a sua resistência ao corte e à tração na direção perpendicular.



Figura 3.57 – Reforço de viga com recurso a chapas de FRP na face tracionada (Garcia, 2013)

(Jasienko & Nowak, 2014) expõem duas soluções semelhantes, que recorrem à utilização de chapas metálicas e cola epoxídica. A primeira solução consiste na introdução de duas chapas de aço no interior da seção de madeira, na face superior. Estas chapas são introduzidas em entalhes praticados nas zonas a reforçar, os quais depois são preenchidos com a cola epoxídica (. Tem como objetivo recuperar a capacidade resistente da zona e também é uma boa opção quando se pretende aumentar a resistência ao corte, uma vez que a colocação vertical das chapas oferece uma grande resistência a este esforço. A segunda solução é um pouco diferente das apresentadas anteriormente, uma vez que a colagem das chapas é no exterior da secção, nas faces da viga (Figura 3.58b)). As chapas podem aplicar-se quer nas faces laterais quer na face superior ou inferior. Quando se utiliza este método, é necessário exercer pressão nas placas que estão a ser coladas. Quando a aplicação é realizada nas faces laterais ou inferiormente, torna-se uma vantagem, por não ser necessário remover o pavimento.

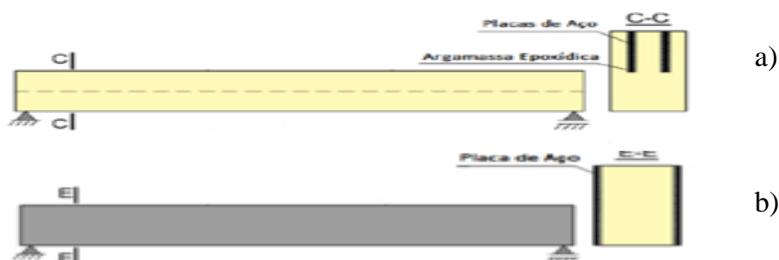


Figura 3.58 – a) Reforço de viga através da colocação de chapas de aço no interior da seção colocadas com cola epoxídica; b) Através da colocação de chapas de aço nas faces laterais colocadas com cola epoxídica (Jasienko & Nowak, 2014)

(D'Ambrisi, 2014) apresenta uma outra solução que consiste na aplicação de tecidos de FRP nas superfícies inferiores externas da viga (ver Figura 3.59). Os tecidos compósitos, geralmente fibras de vidro, devem ser aplicados diretamente sobre a madeira. Nesta solução, não se pretende aumentar a resistência do elemento paralelamente às fibras, mas sim a sua resistência ao corte e à tração perpendicular às fibras (Cruz H., 2000). Um facto importante a realçar é que, para alcançar a aderência adequada entre elementos, são necessários cuidados com a preparação das superfícies onde são aplicadas as colas e ainda com a sensibilidade destas à temperatura (Jasienko e Nowak, 2014). Esta solução pode ainda ser aplicada em ambas as faces (tração e compressão) do elemento de madeira, o que, segundo (Alam et al, 2009), é um reforço mais eficaz, pois tem uma melhor rigidez à flexão comparativamente ao reforço em apenas uma das faces.

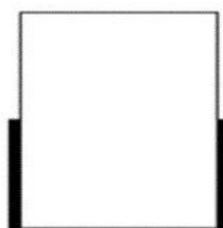


Figura 3.59 – Reforço de viga através da colagem de tecido de FRP (D'Ambrisi, 2014)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Introdução de placas de reforço seladas com cola epoxídica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformações excessivas;</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conservação do pé direito.</li> <li>• Facilidade de execução;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>• Controlo de execução rigoroso;</li> <li>• Impossibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>• Irreversível.</li> </ul>

Quadro 15 - Quadro resumo da solução: Introdução de placas de reforço seladas com cola epoxídica.

### 3.2.2 Introdução de varões de reforço selados com formulações epoxídicas

A presente solução consiste no reforço de elementos através da utilização de resina epoxídica e varões de reforço de aço ou FRP (normalmente GFRP) (ver Figuras Figura 3.60 e Figura 3.64). Esta técnica é particularmente adequada na recuperação da resistência mecânica em zonas degradadas por apodrecimento ou rotura e também para tratar elementos que apresentam grandes dimensões transversais. A finalidade deste reforço é aumentar a rigidez e, desta forma, reduzir as deformações (Arriaga, 2002).

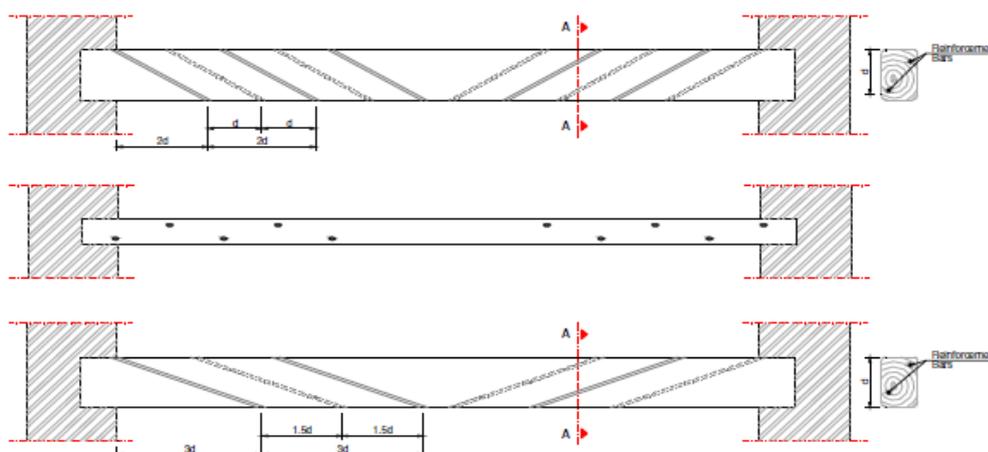


Figura 3.60 –Exemplos de aplicação de varões de reforço com cola epoxídica (Pinto, 2008)

A direção dos varões de reforço pode ser alinhada ou inclinada segundo as fibras de madeira, proporcionando um aumento da resistência à flexão ou de rigidez. Podem ainda ser colocados longitudinalmente na parte inferior da peça, funcionando como armadura de tração.

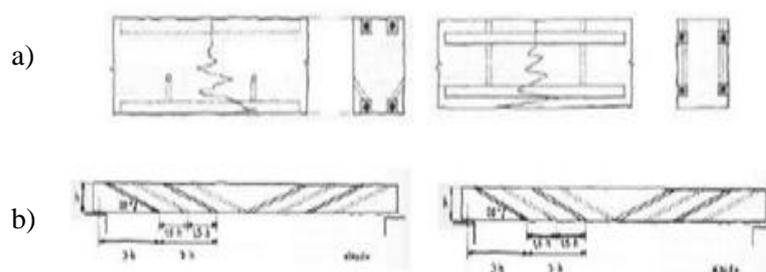


Figura 3.61 - a) Consolidação com varões de reforço horizontais; b) Consolidação com varões de reforço inclinados

Este sistema de reforço pode ser concretizado de diversas formas, realçando-se em todas elas alguns procedimentos fundamentais:

- Escoramento da estrutura a reabilitar, para posteriormente remover em segurança as partes degradadas (caso seja necessário). A falta de escoramento ou um escoramento mal efetuado poderá causar deformações não recuperáveis e danos na estrutura ou em elementos a ela conectados;
- Identificação da zona degradada;
- Realização de furos ou entalhes. Na realização dos furos nas partes sãs da madeira, deve-se ter em atenção que o seu comprimento deverá ser suficiente para proporcionar uma amarração eficaz dos varões. No caso de reforço de uma zona de rotura, a furação deve ser horizontal; caso o objetivo seja o tratamento de fendas, a furação deve ser realizada pela face superior (com um ângulo de 20 a 30°) intersetando transversalmente a fenda e uma zona sã da madeira;
- Limpeza dos furos e colocação dos varões de reforço;
- Prenchimentos dos furos com cola epoxídica.

Em (Gentile, 2002), são expostas duas soluções de reforço semelhantes, que diferem apenas na disposição dos varões, todo o restante funcionamento é igual (ver Figura 3.62). Ambas consistem na introdução de varões GFRP em entalhes de espessura variável, dependendo do número de varões a colocar. Os varões são introduzidos junto à superfície da zona submetida a esforços de tração, funcionando assim como armaduras de tração. Segundo o autor, nos elementos não reforçados, quando sujeitos a esforços de flexão, a rotura dá-se na zona de tração e não apresenta qualquer evidência de esmagamento na zona comprimida. No entanto, os ensaios de elementos reforçados com GFRP revelaram que, em 60% das amostras ensaiadas, a rotura teve origem na zona comprimida. Desta forma, considerou-se que a rotura se dava por compressão quando o esmagamento ocorria nessa zona em carga máxima. Caso ocorresse para cargas inferiores, a rotura era considerada por tração.

Como conclusão do trabalho realizado, o autor refere que o reforço de vigas de madeira com varões GFRP permite aumentar a capacidade resistente à flexão, prevenir o aparecimento de fendas e o modo de rotura passa de frágil em tração para dúctil em compressão.

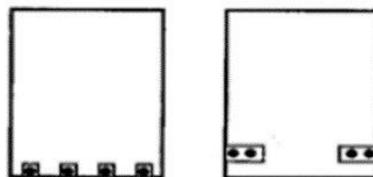


Figura 3.62 –Reforço na zona tracionada com varões GFRP (Gentile, 2002)

A solução apresentada por (Duarte, 2004) é um pouco diferente das descritas anteriormente uma vez que há necessidade de remoção das partes de madeira com características mecânicas insuficientes e/ou parcialmente deterioradas. O sistema de reabilitação estudado pelo autor consiste na substituição da parte degradada de uma viga por um novo elemento de madeira em bom estado, ligado às partes de madeira sãs através de argamassa epoxídica armada. A ligação é efetuada através da colocação de armadura em entalhes realizados nas extremidades a unir, os quais são posteriormente preenchidos com argamassa (ver Figura 3.63).

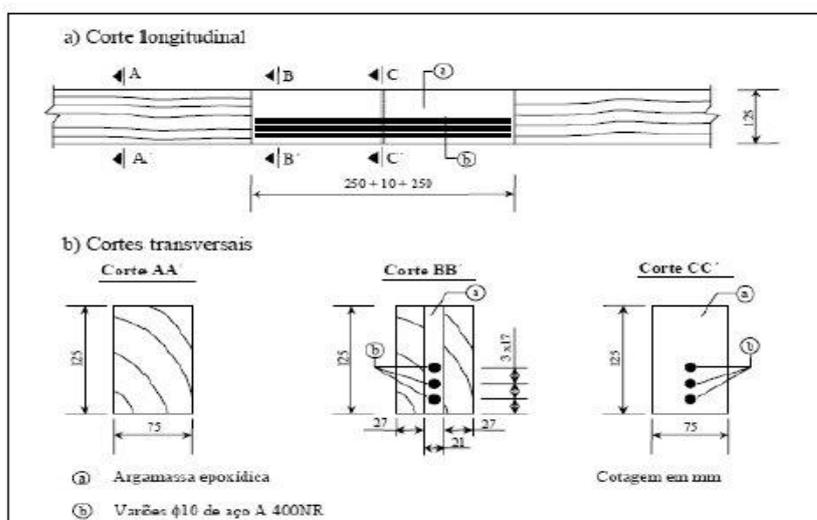


Figura 3.63 - Sistema de reabilitação com varões A400 NR (Duarte, 2004)

A armadura de ligação pode ser constituída por varões de aço, aço inox ou varões FRP. De forma a avaliar qual o tipo de varão mais adequado a introduzir e a qual a sua eficácia, o mesmo autor realizou uma série de ensaios à flexão em vigas da espécie *Pinus Pinaster*, Ait reabilitadas com diferentes varões: varões de aço A400 NR, varões roscados de aço inox e varões pultrudidos de fibra de vidro (GFRP).

Os ensaios realizados demonstraram que:

- A rotura de vigas rehabilitadas com varões de aço A400 NR foi dúctil. Ocorreu cedência da armadura na seção da junta de ligação, e a plastificação dos varões permitiu a rotação de corpo rígido das duas partes da viga e a abertura de uma fenda de grandes dimensões na parte inferior da seção, formando-se uma rótula plástica. O autor refere que uma forma de melhorar esta situação é através da introdução de mais armadura, contudo alerta que este facto também pode alterar o modo de rotura da viga;

- A rotura de vigas rehabilitadas com varões de aço inox também ainda foi dúctil, contudo, neste caso, a armadura não permitiu que a plastificação da seção da junta de ligação ocorresse de imediato, permitindo a exteriorização de fragilidades na viga. O autor refere que a rotura se ficou a dever à fraca resistência da madeira na direção perpendicular às fibras, sendo que a aderência entre a madeira e a armadura se mostrou eficaz;

- A rotura das vigas rehabilitadas ocorreu devido à perda de aderência da armadura.

Em outro estudo, o mesmo autor, através de ensaios realizados, conclui que, apesar dos varões de GFRP serem muito resistentes, apresentam uma elevada extensão última do material, uma vez que possuem baixo módulo de elasticidade. Esta situação faz com que se tenha verificado fissuração da argamassa junto à armadura, devido à dificuldade de acompanhar as deformações impostas. Este facto, aliado à baixa rugosidade destes varões, acaba por diminuir a aderência entre os dois materiais. No que diz respeito ao comportamento à flexão destas soluções, (Duarte, 2004) concluiu que as vigas rehabilitadas com argamassas epoxídicas e varões de diferentes materiais (aço, GFRP) satisfazem as exigências do EC5. Obteve-se, inclusive, momentos de rotura nas vigas rehabilitadas superiores aos momentos resistentes de cálculo exigidos.

(Uzielli, 1995) refere que, quando os varões são introduzidos na zona tracionada da viga, a rotura deixa de ser causada pela existência de defeitos, que reduzem a resistência na face tracionada, e passa a ocorrer na zona comprimida que não foi reforçada.

Segundo (Borri, 2004), esta técnica de reforço, embora aumente a resistência à flexão dos elementos, não é capaz de confinar roturas locais. Revela também que os entalhes executados na madeira para a introdução dos varões provocam uma redução efetiva da mesma, fragilizando-a. Este autor estudou ainda o comportamento de vigas de madeira reforçadas com FRP pré-esforçado, chegando à conclusão que é idêntico ao das vigas reforçadas com FRP sem pré-esforço, tendo-se verificado somente a redução das deformações causadas pelas ações permanentes.

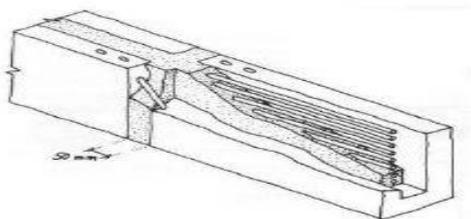


Figura 3.64 - Solução de empalme de peças de madeira com varões de reforço de aço e cola epoxídica (Arriaga, 2002)

A aderência entre a madeira e a argamassa epoxídica é um fator de elevada importância na eficácia desta técnica e é bastante suscetível à variação do teor em água da madeira. De forma a estudar este fenómeno, (Gemert, 1987) relacionou o teor em água da madeira com a tensão de aderência entre os dois materiais e chegou à conclusão que, em ensaios à flexão, a tensão de aderência diminui significativamente com o aumento do teor em água. Este autor verificou também que a superfície de contacto madeira-argamassa não tem grande influência na capacidade de carga última do sistema, mas que o tratamento da superfície de contacto com cola epoxídica pura aumenta consideravelmente a tensão de aderência entre os dois materiais.

Uma alternativa a estas técnicas, e cuja execução se reveste de enorme complexidade, consiste na disposição de varões (normalmente de fibra de vidro) num sistema de treliça interna ao elemento de madeira (ver Figura 3.65). Esta técnica permite uma diminuição eficaz da propagação das fendas, a absorção de esforços de corte e ainda o reforço das zonas de tração e de compressão. A metodologia de aplicação consiste na colocação de cola epoxídica, seguida da introdução dos varões de reforço (com inclinação de 30° em relação ao eixo da viga); por último, injeta-se cola epoxídica (mais fluida) para colmatar possíveis vazios.

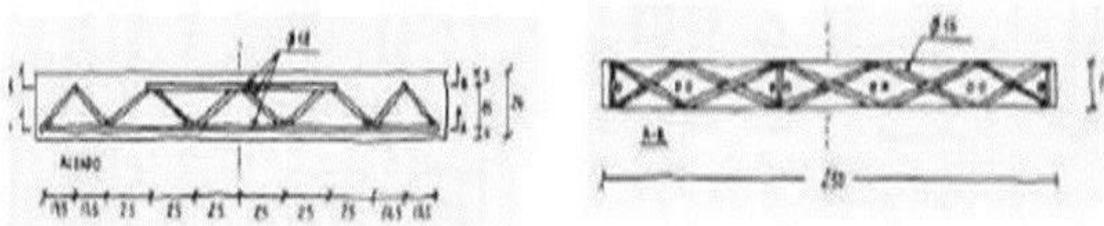


Figura 3.65 - Reforço com varões num sistema de treliça

Este sistema de treliça é utilizado poucas vezes, uma vez que é bastante intrusivo e de difícil execução. Contudo, é de realçar a sua elevada eficácia quando devidamente executado, pois existe um pleno reforço das zonas comprimidas e tracionadas. Estudos efetuados permitem

afirmar, com alguma certeza, que este método permite ganhos consideráveis em termos de aumento de tensão de rotura e de diminuição de deformação. (Cigni;1981) realizou um estudo com uma solução deste tipo e obteve um aumento da tensão de rotura aparente de 32 a 42% e uma diminuição da flecha de 59 a 76% em relação ao elemento não reforçado. No entanto, segundo (Arriaga; 2002), estes resultados devem ser tomados com alguma reserva uma vez que não é referido se existia continuidade entre as barras de reforço e o ainda pelo facto de o número de provetes utilizado ser reduzido.

Outra aplicação desta solução consiste em reforçar a linha das asnas de forma a colmatar os problemas de tração e deslizamentos (ver Figura 3.66). De acordo com (Arriaga, 2002), a linha das asnas pode ser reforçada recorrendo a um empalme denteado de madeira ligado à viga existente por braçadeiras metálicas e varões de reforço colados com argamassa de epóxico.

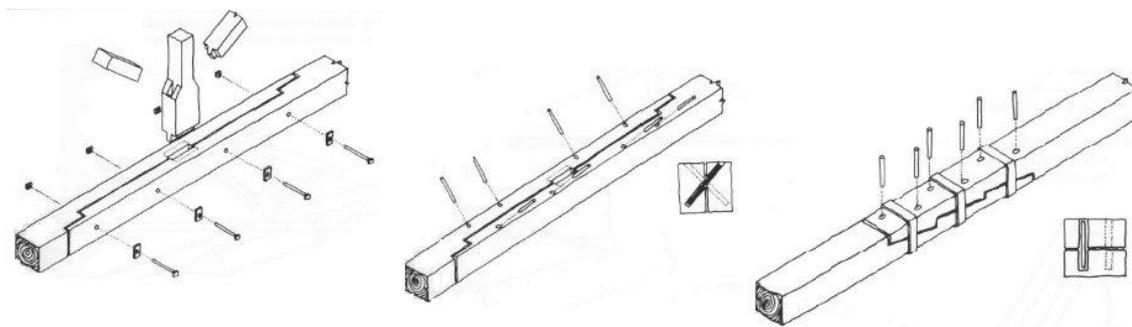


Figura 3.66 –Exemplos de reparação de linha asna com varões de aço e resina de epóxico (Arriaga, 2002)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Introdução de placas de reforço seladas com cola epoxídica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformações excessivas;</li> <li>• Problemas de tração e deslizamentos;</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conservação do pé direito.</li> <li>• Aspeto estético;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>• Controlo de execução rigoroso;</li> <li>• Impossibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>• Irreversível.</li> </ul>

Quadro 16 - Quadro resumo da solução: Introdução de varões de reforço selados com cola epoxídica.

### 3.2.3 Envolvimento do elemento a reforçar com tecidos, mantas ou telas de FRP selados com cola epoxídica

O envolvimento com tecidos, mantas ou telas de FRP é uma técnica de reforço por cintagem e consiste na colagem do compósito em torno do elemento a reforçar, o que permite confinar a secção e, desta forma, aumentar a sua capacidade resistente (Silva, 2004) (ver Figura 3.67). Segundo (Cruz et al;2000), na execução desta solução, deve-se começar pela aplicação de um primário na peça, posteriormente, aplica-se a cola epoxídica e, finalmente, envolvem-se duas ou mais camadas de fibra (a fibra de vidro é a mais usual nesta solução). É uma técnica bastante recorrente no reforço local de zonas de ligação mecânica (ver seção 4.2.3) entre elementos de madeira, aumentando a sua resistência e ductilidade. Um aspeto importante a ter em atenção é que a ventilação dos elementos de madeira tem de continuar a efetuar-se de forma eficaz.

Para (Silva, 2004), a colocação de mantas de FRP aumenta as propriedades mecânicas do elemento, limitando a ocorrência de fraturas junto a defeitos que poderiam causar a rotura da viga. Segundo o autor, esta intervenção de reforço permite a transferência de tensões das seções mais frágeis, ficando a resistência do elemento menos condicionada pela existência de anomalias. Refere ainda que à medida que aumenta a quantidade de material compósito que se coloca na face tracionada do elemento, o eixo neutro da seção tende a aproximar-se da zona de tração, reduzindo assim a magnitude das extensões positivas. Desta forma, o estado limite último dá-se para outros modos de rotura antes de atingir a tensão de tração última. É possível atingir a tensão última de compressão, o que é mais favorável uma vez que a madeira apresenta um comportamento mais dúctil.

De acordo com (Balseiro, 2007), é uma boa solução de reforço à flexão e ao corte.

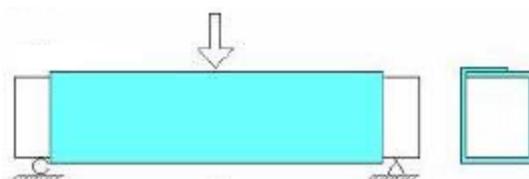


Figura 3.67 - Reforço de viga através da colocação de mantas de FRP (Balseiro, 2007)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Introdução de placas de reforço seladas com cola epoxídica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformações excessivas;</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conservação do pé direito.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>• Controlo de execução rigoroso;</li> <li>• Impossibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>• Irreversível.</li> </ul>

Quadro 17 - Quadro resumo da solução: Envolvimento com tecidos, mantas ou telas de FRP selados com cola epoxídica.

### 3.2.4 Reforço de vigas por aumento de inércia

A presente técnica baseia-se no aumento da seção da viga através da colocação de uma camada de cola epoxídica, na face superior, aumentando assim a altura útil (ver Figura 3.68). Esta solução de reforço é utilizada quando as vigas, por algum motivo (degradação, dimensionamento incorreto), apresentam seção útil insuficiente (traduzida em altas deformações) e precisam de aumentar a inércia para resistir aos esforços a que estão sujeitas e, desta forma, reduzir o nível de deformações (Costa, 2009). É um método muito eficaz no tratamento de vigas que origina uma seção mista de capacidade resistente superior (Duarte, 2004). Em contrapartida, o facto de se utilizar demasiada cola implica um custo associado muito elevado, exige mão-de-obra especializada e altera a distribuição de esforços (devido à colocação de materiais diferentes dos originais).

Na ligação entre os dois materiais, recorre-se à utilização de conectores, varões de aço inox ou de FRP (normalmente fibras de vidro), dispostos ao longo do eixo superior da viga e ligeiramente inclinados em direção à seção do meio vão para aumentar a solidarização (M. Reis, 2006). Estes varões são previamente colocados em furos na madeira e fixados com cola. Os furos deverão possuir um diâmetro um pouco superior ao dos ligadores, de forma a facilitar a operação de fixação por colagem (Duarte, 2004). A intervenção deve ser feita em toda a extensão da viga, incluindo as zonas de apoio, através da realização de furos.

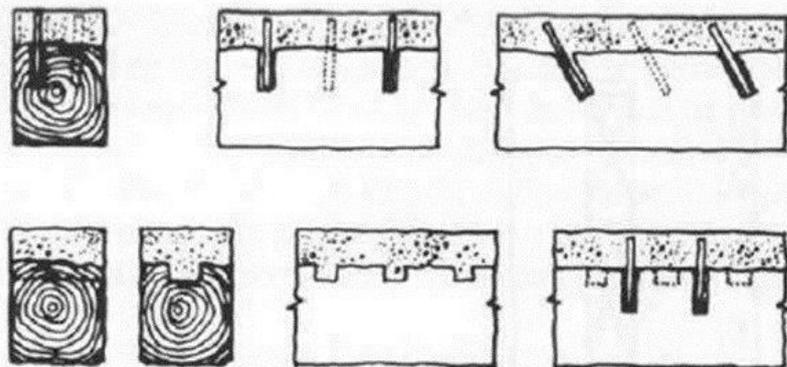


Figura 3.68 - Reforço de viga através do aumento de seção com cola epoxídica e ligadores de aço ou FRP (Arriaga, 2002)

(Costa, 2009) refere que a execução destes trabalhos deve ser efetuada assegurando previamente que o escoramento da viga esteja corretamente executado e que as suas deformações estejam anuladas. Por questões de segurança, o carregamento da viga só deverá ser efetuado no mínimo após sete dias.

De acordo com (T. G. Ilharco, J.; Paupério, E.; Costa, A., 2010), a ligação entre os dois materiais é fundamental para o sucesso desta técnica. Portanto, inicialmente, deve ser realizada uma limpeza da madeira degradada até chegar à zona sã, com o objetivo de aumentar a aderência, o que permitirá uma transmissão de esforços mais eficaz. De forma a garantir a correta união entre os dois materiais e evitar um possível desencaixe perpendicular à superfície de contacto, vários autores ((T. G. Ilharco, J.; Paupério, E.; Costa, A., 2010), (Arriaga, 2002) (Pinto, 2008)) recomendam que sejam seguidos os seguintes procedimentos na execução desta solução (ver Figura 3.69):

- Escoramento da viga;
- Limpeza da madeira degradada até chegar à zona sã (quando não existir madeira degradada passa-se diretamente para o procedimento seguinte);
- Execução de caixas ou entalhes nas faces horizontais da viga com espaçamentos variáveis (nas zonas de apoio o espaçamento deve ser menor);
- Introdução dos elementos de conexão, em furos de diâmetro ligeiramente superior, para que a operação de fixação por colagem seja facilitada;
- Instalação das cofragens nas faces laterais da viga;
- Enchimento com cola epoxídica.

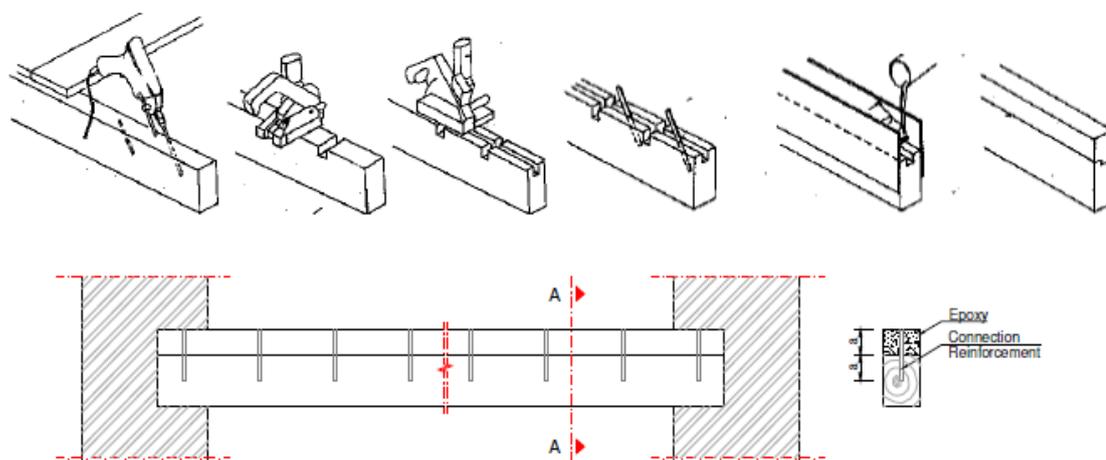


Figura 3.69 - Reforço de seção de viga através da reconstrução da face superior com colas epoxídicas e ligadores (Arriaga, 2002) (Pinto, 2008)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Introdução de cola epoxídica e varões de reforço na face superior da viga</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformações excessivas.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proteção ao fogo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>• Impacto visual;</li> <li>• Custo elevado;</li> <li>• Irreversível;</li> <li>• Impossibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>• Mão-de-obra especializada.</li> </ul>

Quadro 18 - Quadro resumo da solução: Introdução de cola epoxídica e varões de reforço na face superior da viga.

### 3.2.5 Introdução de fibras de aço de alta resistência

(Corradi, 2011) apresenta uma solução de reforço de vigas de madeira que consiste na introdução de fibras de aço de alta resistência coladas com uma formulação epoxídica. De acordo com os autores, o objetivo do trabalho realizado era analisar a eficiência das fibras de

aço de alta resistência no reforço das vigas. Nesta solução, as fibras são colocadas paralelamente à direção principal das fibras de madeira e, posteriormente, revestidas com cola epoxídica. Desta forma, foram ensaiadas um conjunto de peças de madeira com e sem reforço, com dimensões correntes, e os seus resultados foram comparados.



Figura 3.70 - Ensaio de viga reforça com fibras de aço de alta resistência coladas com resina epoxy (Corradi, 2011)

Os ensaios realizados apresentaram resultados bastante satisfatórios no que diz respeito ao aumento significativo na capacidade de carga, na ductilidade, na rigidez e na resistência à flexão. Na maioria dos casos, a rotura ocorreu devido a uma fratura da madeira na zona de tensão, em áreas não reforçadas pelos fios de aço. Verificou-se que o aumento da resistência à tração é superior na direção principal das fibras de madeira, o que é justificável pelo facto das fibras de aço também terem sido colocadas segundo esta direção. Outra das conclusões obtidas é que a presença do reforço de aço parece limitar a abertura de fendas. Os autores referem ainda que esta solução é viável de aplicar em obra devido à rapidez de execução e facilidade de aplicação, não sendo necessário desmontar a estrutura existente.

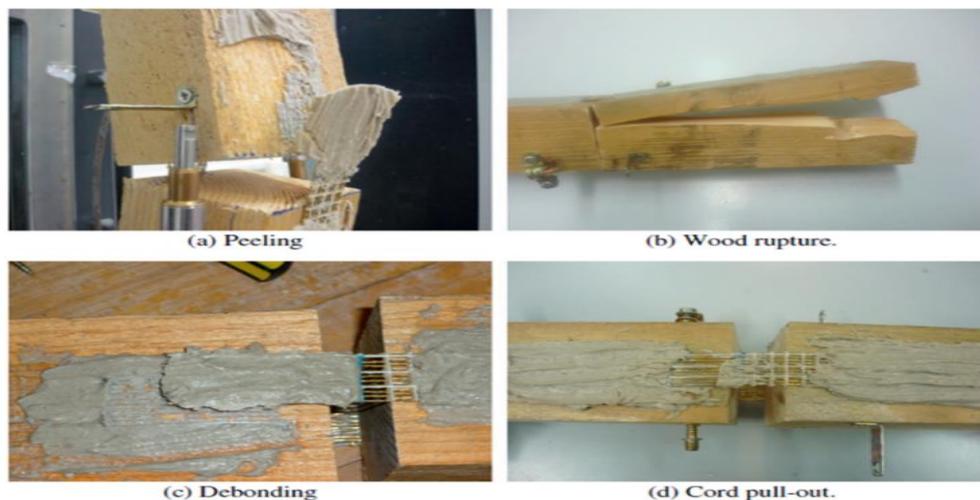


Figura 3.71 - Resultados dos ensaios realizados com fibras de aço de alta resistência (Corradi, 2011)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Introdução de fibras de aço de alta resistência</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformações excessivas;</li> <li>• Rotura localizada.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidade de execução;</li> <li>• Rapidez de execução.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>• Impacto visual;</li> <li>• Impossibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>• Irreversível.</li> </ul>

Quadro 19 - Quadro resumo da solução: Introdução de fibras de aço de alta resistência.

## 4 REFORÇO DE APOIOS E LIGAÇÕES

### 4.1 Introdução de Elementos em Aço

#### 4.1.1 Colocação de cantoneira metálica entre a viga e a parede

A presente solução, apresentada por (Arriaga, 2002), é das mais utilizadas em estruturas danificadas devido ao ataque de fungos. Esta técnica consiste na colocação de uma cantoneira metálica (ou um perfil em “L”) fixada mecanicamente á parede com recurso a parafusos ou buchas, e é nela que vão assentar as vigas estruturais do pavimento (ver Figura 4.1 e Figura 4.2). Desta forma, cria-se uma nova linha de apoio adjacente à parede. As ligações pré-existentes são mantidas, no entanto é necessário analisar o seu estado de conservação, procedendo com o tratamento de patologias caso se verifique necessário.

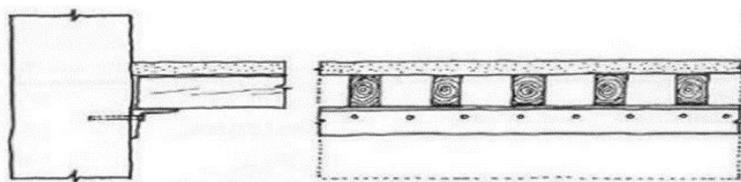


Figura 4.1 - Reforço de apoio através da colocação de cantoneira metálica entre a viga e a parede (Arriaga, 2002)

De acordo com o autor, esta solução apresenta um carácter pouco elaborado e é utilizada em obras de reparação de estruturas antigas onde a manutenção da solução é pouco relevante ou em situações de emergência. Trata-se de uma intervenção de fácil e rápida execução, pouco intrusiva e eficaz, que permite aumentar consideravelmente a rigidez e a resistência na zona do apoio (aumentar a capacidade de carga das ligações, distribuindo o esforços por uma superfície maior). Por outro lado, a carga que é transmitida à parede passa a ser excêntrica, causando assim esforços de flexão na parede que poderão causar problemas de estabilidade à mesma. Contudo, e por normalmente se tratarem de paredes resistentes, este esforço que é transmitido não deverá criar problemas de segurança na ligação (Arriaga, 2002). A sua implementação tem também a grande desvantagem de provocar um aumento da espessura do pavimento, equivalente á altura da cantoneira, o que conduz a um desaproveitamento do pé direito da estrutura. Assim, este tipo

de intervenção deve ser ponderado caso existam pormenores decorativos ou de valor patrimonial, sendo nestes casos necessário removê-los para proceder à aplicação da cantoneira, ou então optar por outra solução de reforço que não envolva esta prática. A utilização de cantoneiras metálicas tem ainda o inconveniente de ser pouco estética, uma vez que a cantoneira, caso não seja colocado um novo revestimento exterior, fica visível.



Figura 4.2 - Reforço de apoio através da colocação de cantoneira metálica entre a viga e a parede

Para que este método funcione corretamente é necessário realizar a regularização da parede onde é colocada a cantoneira, averiguar a profundidade a que os parafusos são fixados assim como o seu sistema de fixação e garantir que a ligação é bem realizada. Só assim se consegue uma eficiente transmissão de esforços, não causando danos na parede.

Por vezes, são também utilizados outros elementos conjuntamente com as cantoneiras, que envolvem lateralmente as vigas e, assim, permitem um melhor comportamento do conjunto.

Existe ainda a possibilidade de colocar cachorros metálicos, em vez de cantoneiras, a suportar a viga degradada (ver Figura 4.3). Contudo, sendo uma solução que ocupa mais espaço do que as cantoneiras, tem mais limitações, só podendo ser utilizada em algumas situações (Carneiro, 2012).



Figura 4.3 – Reforço de apoio através da colocação de cachorro metálico (Costa 2008a)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Colocação de cantoneira metálica entre a viga e a parede</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Degradação do apoio.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>Facilidade de execução;</li> <li>Reversível;</li> <li>Rapidez de execução;</li> <li>Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>Reduzida intrusividade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>Ausência de proteção ao fogo;</li> <li>Flexão adicional na parede;</li> <li>Impacto visual;</li> <li>Redução do pé direito.</li> </ul>

Quadro 20 - Quadro resumo da solução: Colocação de cantoneira metálica entre a viga e a parede.

#### 4.1.2 Colocação de perfis sob as vigas

Solução abordada na seção 3.1.6

#### 4.1.3 Colocação de chapas ou perfis metálicos

A presente solução consiste na colocação de duas chapas ou perfis metálicos nas faces da viga, junto do apoio. Estes elementos são conectados mecanicamente, nas faces da parte sã da viga, com recurso a parafusos de porca ou pernos ao longo de toda a espessura da secção de madeira, evitando, desta forma, a remoção do material deteriorado (ver Figura 4.4). Com esta solução, pretende-se transferir o esforço da zona degradada para as chapas/perfis.



Figura 4.4 - Reforço de apoio através da fixação mecânica de chapas metálicas nas faces (T. Ilharco, 2010 b)

A espessura das chapas a colocar depende do esforço de corte atuante e da capacidade resistente da peça que se encontra em serviço. Segundo (P.B. Lourenço, 2014), esta solução dá origem a uma viga mista que apresenta capacidades superiores à situação previamente existente. Contudo, ao longo do tempo, tem tendência a perder grande capacidade de carga e pode sofrer elevadas deformações. De maneira a conferir uma maior rigidez à ligação e desta forma um comportamento mais eficaz da seção mista, é aconselhável a aplicação de dois conectores ao longo da altura da chapa ou do perfil metálico. Este tipo de intervenção é pouco intrusivo e de rápida aplicação. Conforme referido anteriormente, a fixação de chapas metálicas não requer a remoção de partes degradadas da extremidade da viga, uma vez que as chapas irão substituir a função resistente dessas porções. No caso de existirem elementos de valor patrimonial no teto, não há necessidade de removê-los para se proceder à fixação das chapas, pois este procedimento pode ser realizado pela parte superior do pavimento, sendo apenas necessário remover o soalho e outros revestimentos existentes. Caso o interesse seja manter o soalho ou qualquer outro tipo de elementos existentes no pavimento, a intervenção pode ser realizada pela parte inferior da viga. Um dos principais inconvenientes desta solução é o facto de resultar num elemento reforçado que apresenta uma rigidez relativamente precária.

A solução proposta por (Cóias, 2007) é bastante idêntica à descrita, com a diferença da peça metálica utilizada ser um perfil “L” e ainda ser necessário remover a zona deteriorada da viga e substituí-la por uma nova peça de madeira (ver Figura 4.5). O autor acrescenta que as peças metálicas a introduzir devem ser de aço inoxidável ou de aço corrente adequadamente protegido contra a corrosão.



Figura 4.5 - Reforço de apoio com recurso a chapas “L” nas faces laterais conectadas mecanicamente

Em (Arriaga, 2002) é apresentada uma solução com perfis do tipo UNP (ver Figura 4.6). Segundo os autores, os conectores a utilizar devem ser pernos e o comprimento de sobreposição dos perfis sobre a madeira sã deve ser na ordem dos 50 a 80cm, de maneira a garantir uma melhor solidarização das peças. Acrescentam ainda que, devido ao facto da ligação ser realizada

com elementos mecânicos, é necessário impor uma deformação aquando a entrada em carga. Para os autores este tipo de solução apresenta um custo superior à simples substituição da zona degradada.

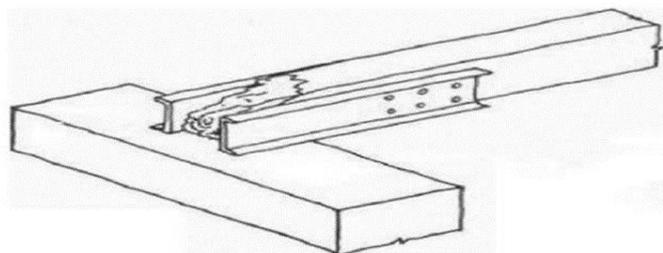


Figura 4.6 - Reforço de apoio através da colocação de dois perfis UNP nas faces laterais

(Mariani, 2004) expõe também uma solução que consiste na aplicação de um perfil metálico UNP que envolve a viga junto ao apoio, estendendo-se até à parte sã da madeira (ver Figura 4.7). A ligação do perfil à viga é realizada através de conectores mecânicos dispostos ao longo do comprimento do perfil, tal como nas soluções apresentadas anteriormente. O autor defende que, em soluções a implementar na reabilitação de um apoio é conveniente a substituição da zona degradada por um novo troço de madeira. Contudo, neste caso em específico, para a solução apresentar um comportamento satisfatório, não é obrigatório remover a parte danificada, uma vez que o perfil de aço poderá substituir a sua função mecânica, desde que seja conectado a uma parte de madeira sã. No entanto, é fundamental efetuar um tratamento contra o ataque de agentes bióticos na zona degradada da madeira, assim como o tratamento contra a corrosão e retardador da ação do fogo no perfil metálico.

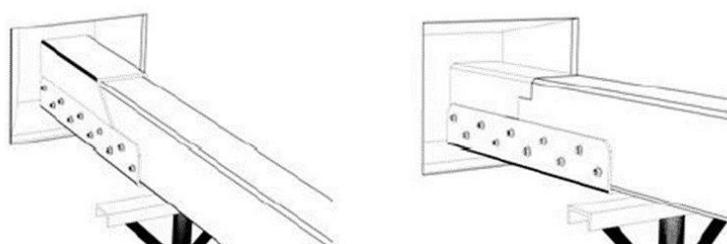


Figura 4.7 - Reforço de apoio através da colocação de perfil UNP (Mariani, 2004)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
Colocação de chapas ou perfis metálicos nas faces da viga junto ao apoio	<ul style="list-style-type: none"> <li>Degradação do apoio.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>Facilidade de execução;</li> <li>Rapidez de execução;</li> <li>Reduzida intrusividade;</li> <li>Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>Ausência de proteção ao fogo;</li> <li>Deformação a longo prazo;</li> <li>Impacto visual.</li> </ul>

Quadro 21 - Quadro resumo da solução: Colocação de chapas ou perfis metálicos nas faces da viga junto ao apoio.

#### 4.1.4 Introdução de elementos em aço no interior da secção

A introdução de elementos metálicos no interior da secção na zona de apoio é normalmente um tipo de intervenção mais eficaz do que a fixação de chapas ou perfis metálicos à parte sã da madeira, contudo de mais difícil execução e implica de mão-de-obra especializada (T. Ilharco, 2008) (ver Figura 4.8).

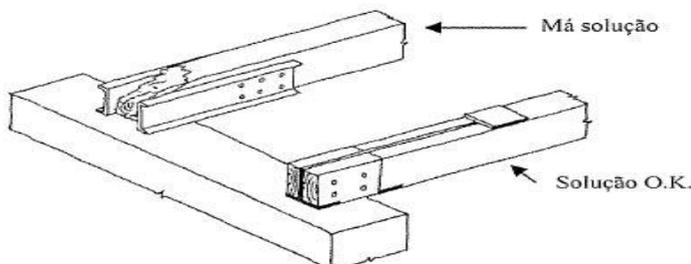


Figura 4.8 – Comparação entre solução com chapas nas faces e chapas no interior da secção

A principal finalidade é resistir a solicitações de corte junto ao apoio. Esta intervenção exige a remoção da totalidade da parte degradada e ainda a execução de um corte na parte sã da madeira, onde serão introduzidos os elementos metálicos de reforço, normalmente chapas (ver Figura 4.9). Após estes procedimentos, aplica-se de elementos de madeira para tapar os elementos metálicos, fazendo desta forma, a reconstrução da cabeça da viga retirada e conferindo proteção ao fogo às peças metálicas (Ilharco 2007b) . Segundo (Duarte, 2004), nestas soluções, assume-se que são os elementos metálicos que passam a resistir a todas as solicitações aplicadas, sendo por isso importante garantir um comprimento mínimo de ancoragem na parte sã da madeira. É

importante salientar que os novos elementos de madeira a introduzir devem ser da mesma espécie e possuir características (como, por exemplo, a resistência e o módulo de elasticidade) semelhantes à madeira existente (Dias, 2008).

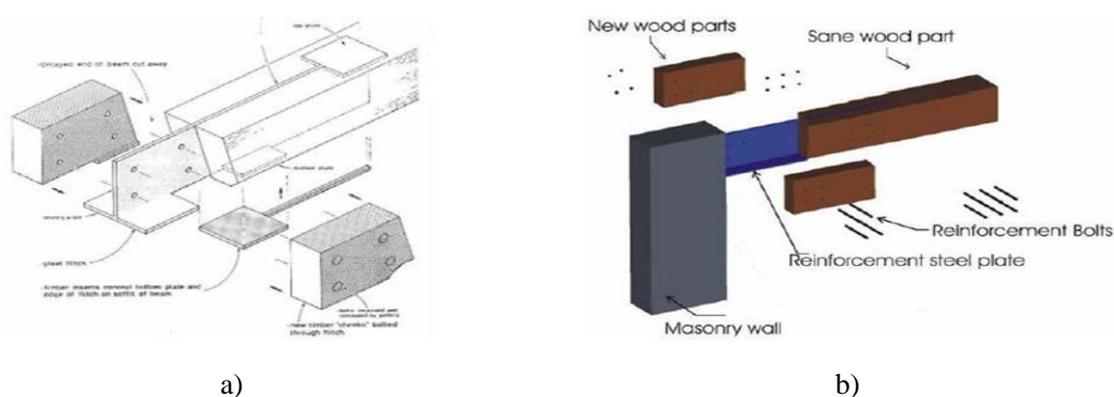


Figura 4.9 – Reforço de apoio através da colocação de elementos metálicos no interior da secção: a) (Ashurst, 1988); b) (Ilharco 2007b)

Também (Mariani, 2004) apresenta uma solução que consiste na colocação de uma ou duas chapas metálicas no interior da secção, para reforço a solicitações de esforço transversal. A ligação das chapas metálicas à viga é efetuada através de conectores metálicos, parafusos de porca ou cavilhas (ver Figura 4.10). Segundo o autor, as principais vantagens desta solução são a inexistência de impacto visual e a boa proteção ao fogo, uma vez que a chapa inserida no interior da secção de madeira fica protegida em relação ao aumento de temperatura a que a viga pode estar sujeita.

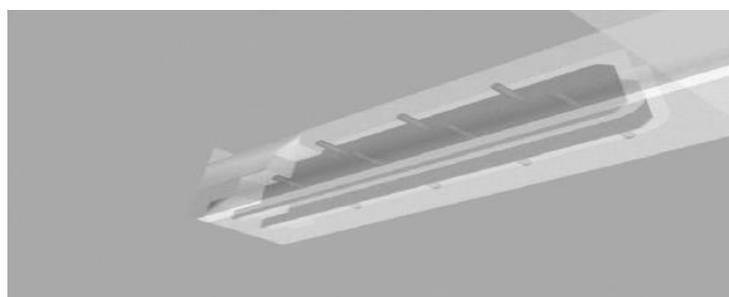


Figura 4.10 -Reforço de apoio através da introdução de chapas metálicas no interior da secção (Mariani,2004)

A solução exposta em (Cóias, 2007) é semelhante às descritas anteriormente, no entanto, este autor defende que, na zona de apoio, a chapa de aço deve possuir um banzo inferior, para poder distribuir as cargas de uma forma uniforme, e na zona em contacto com a viga pré-existente, deve possuir um banzo superior, de forma a existir um melhor travamento (ver Figura 4.11).

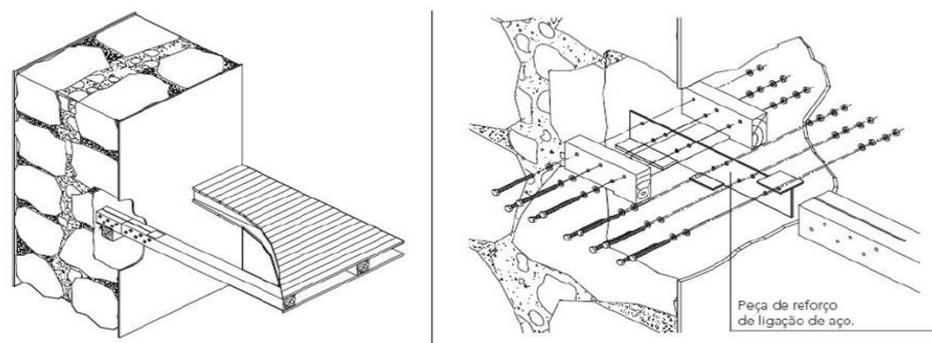


Figura 4.11 – Reforço de apoio através da introdução de elementos metálicos no interior da viga (Cóias, 2007)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Introdução de elementos em aço no interior da secção na zona de apoio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Degradação do apoio.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduzida intrusividade;</li> <li>Proteção ao fogo;</li> <li>Conservação do pé direito;</li> <li>Aspeto visual;</li> <li>Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>Mão-de-obra especializada;</li> <li>Irreversível.</li> </ul>

Quadro 22 - Quadro resumo da solução: Introdução de elementos em aço no interior da secção na zona de apoio.

#### 4.1.5 Colocação de perfil metálico a envolver o apoio

(Mariani, 2004) expõe uma solução que consiste na colocação de um perfil de aço quadrado a envolver a extremidade da viga no encontro com a parede (ver Figura 4.12). A peça metálica retangular assenta na parede através de ligadores mecânicos e apresenta umas ligeiras saliências

(em forma de “consola”), que circulam a seção. A finalidade deste perfil é substituir a ação resistente da madeira e, deste modo, absorver todo o carregamento imposto naquele local, devendo ser dimensionada de acordo com esta condição.

O autor refere que é aconselhável deixar uma folga entre o limite da referida “consola” e a face da viga, de forma a promover a circulação de ar, aumentando assim a conservação da madeira.

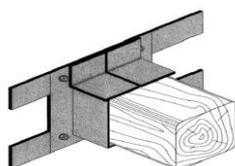


Figura 4.12 - Reforço através da aplicação de perfil metálico a envolver a seção na zona de apoio (Mariani, 2004)

Caso seja necessário efetuar o reforço de dois ou mais apoios consecutivos num pavimento de madeira, pode-se fazer uma adaptação desta solução (Mariani, 2004). Para isso basta prolongar as chapas horizontais até ao encontro do novo apoio (ver Figura 4.13).

Comparativamente com outras soluções, e no caso específico de existirem apoios consecutivos com necessidade de intervenção, esta solução tem a vantagem de necessitar de menos mão-de-obra e, conseqüentemente, do custo ser menor. (Carneiro, 2012)

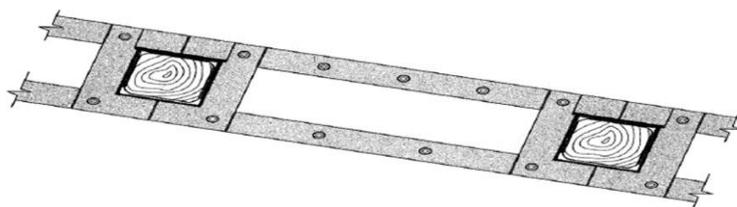


Figura 4.13 – Exemplo de aplicação de dois perfis a envolver seções consecutivas (Mariani, 2004)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Colocação de perfil metálico a envolver o apoio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Degradação do apoio.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduzida intrusividade;</li> <li>Facilidade de execução;</li> <li>Rapidez de execução;</li> <li>Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>Reversível.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>Ausência de proteção ao fogo;</li> <li>Impacto visual.</li> </ul>

Quadro 23 - Quadro resumo da solução: Colocação de perfil metálico a envolver o apoio.

#### 4.1.6 Reforço da ligação Pavimento-parede

(Brignola, 2008) expõe uma solução para o reforço da ligação entre o pavimento e a parede que consiste na colocação de chapas de aço em forma de “L”, ligadas ao pavimento através de parafusos (ver Figura 4.14). Segundo o autor, a finalidade deste procedimento é conseguir aumentar a rigidez desta ligação. Trata-se de uma solução não invasiva e reversível.

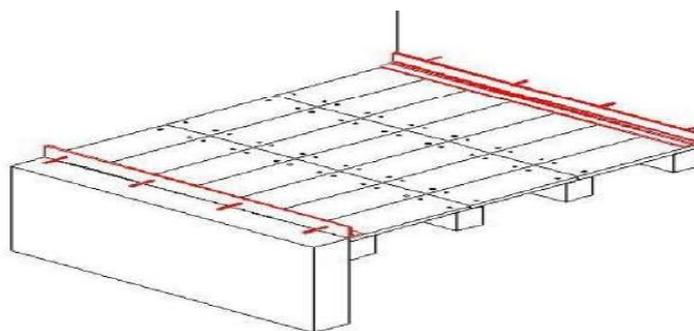


Figura 4.14 - Reforço da ligação entre o pavimento e a parede (Brignola, 2008)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Colocação de chapas de aço entre a parede e o pavimento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Degradação da ligação pavimento-parede.</li> </ul>	Global	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduzida intrusividade;</li> <li>Facilidade de execução;</li> <li>Rapidez de execução;</li> <li>Possibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>Reversível.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>Ausência de proteção ao fogo;</li> <li>Impacto visual.</li> </ul>

Quadro 24 - Quadro resumo da solução: Colocação de chapas de aço entre a parede e o pavimento.

## 4.2 Introdução de colas epoxídicas com peças metálicas ou materiais compósitos

### 4.2.1 Introdução de varões metálicos ou de FRP selados com cola epoxídica

Dentro das várias técnicas que recorrem à utilização de resinas epoxídicas, o reforço com varões é, de acordo com (Arriaga, 2002), a solução mais representativa. Este sistema de reabilitação consiste na substituição das partes degradadas dos elementos por uma resina epoxídica ou por um novo segmento de madeira, que se liga à parte sã por varões de reforço, compósitos (normalmente fibras de vidro) ou aço (ver Figura 4.15). Este método tem como objetivo o restabelecimento da resistência mecânica. A intervenção é limitada às partes degradadas e envolve uma substituição mínima de materiais, evitando-se desta forma a perturbação de uma zona demasiado extensa do elemento. No final, o aspeto estético e a forma original da estrutura são mantidos. De acordo com (Appleton;2003), o dimensionamento da quantidade de argamassa é dispensado, sendo apenas necessário dimensionar os varões de forma a que estes consigam resistir a pelo menos 50 % dos esforços a que a seção vai estar submetida. Outro aspeto importante a ter em atenção, referido em (Duarte,2004), é que as argamassas a utilizar devem ser formuladas de maneira a que o seu módulo de elasticidade seja idêntico ao da madeira, obtendo-se uma melhor compatibilização de deformações. Neste modelo, considera-se que a madeira e a argamassa epoxídica resistem aos esforços de compressão, enquanto os varões absorvem os esforços de tração.

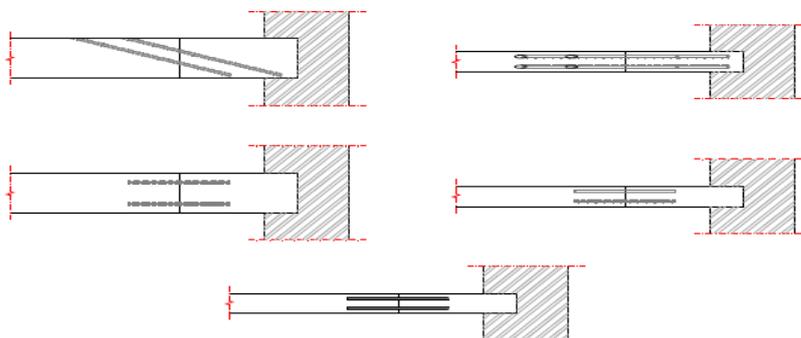


Figura 4.15 – Exemplos de reforço com varões selados com cola epoxídica

Este processo construtivo pode ser realizado de diversas maneiras, no entanto, em todas elas é possível identificar alguns procedimentos fundamentais (ver Figura 4.16):

- Identificação das zonas de madeira que se encontram degradadas e necessitam de substituição;
- Escoramento da estrutura para posterior remoção da parte degradada sem comprometer a estabilidade da estrutura;
- Remoção das zonas degradadas;
- Realização de furos ou entalhes para colocação de varões;
- Limpeza de furos para remoção de poeiras;
- Preenchimento dos furos com cola epoxídica;
- Introdução dos varões.



Figura 4.16 – Processos construtivos (Cunha, 2011)

Em algumas situações não é possível intervir na face superior da viga. Nestes casos, recorre-se a uma situação ligeiramente diferente e que consiste na realização de furos nas faces laterais, sendo que o restante processo construtivo é idêntico ao da solução com furos na face superior (ver Figura 4.17).

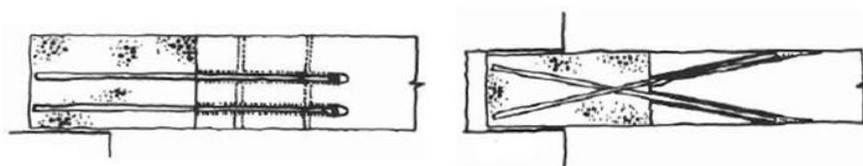


Figura 4.17 - Reforço com varões em furos nas faces laterais

A figura seguinte (ver Figura 4.18) ilustra algumas das etapas relativas a três sistemas de reabilitação do tipo descrito, com o objetivo de substituir as extremidades das vigas.

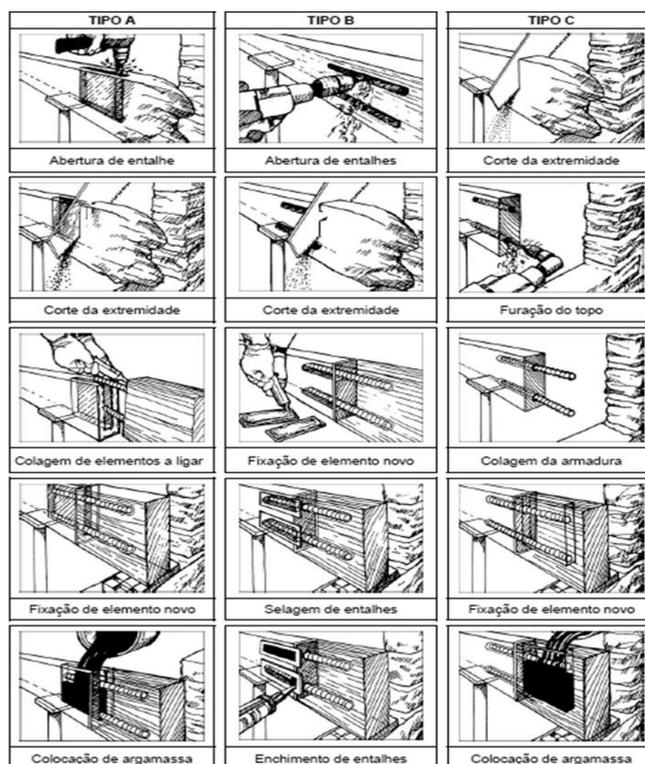


Figura 4.18 - Processos relativos à execução de três sistemas de reabilitação

(Cóias; 2008) apresenta duas soluções semelhantes às descritas anteriormente, uma primeira em que os varões são colocados em entalhe superior (ver Figura 4.19 a)) e uma segunda em que os varões são colocados em entalhe na face lateral (ver Figura 4.19 b)). Em ambas as soluções a ligação é efetuada com resinas epoxídicas, sendo que a única diferença em relação às soluções descritas anteriormente é a disposição dos varões.

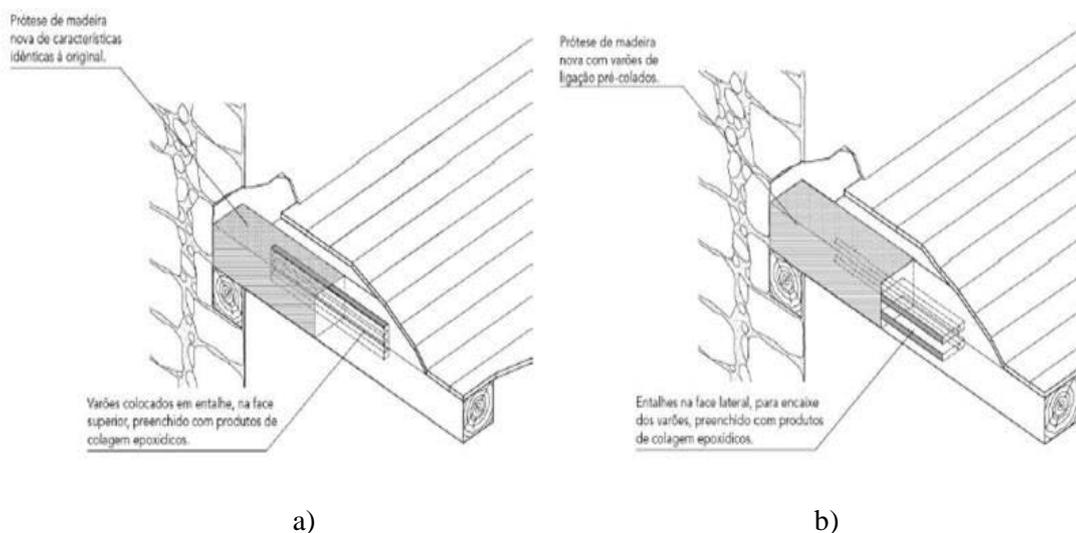


Figura 4.19 –a) solução com entalhe na face superior: b) solução com entalhe na face lateral

Em algumas situações, a deterioração das cabeças das vigas não é profunda, e ainda existe madeira sã em contacto com o apoio (ver Figura 4.20). Nessas situações não é necessário remover totalmente a cabeça das vigas, podendo-se remover apenas a parte danificada pela patologia e posteriormente, seguir o mesmo processo construtivo usado nas soluções anteriores.



Figura 4.20 –Reforço com barras com remoção apenas da parte degradada (Arriaga, 2002)

Nas estruturas das coberturas, todas as ligações podem ser reforçadas recorrendo a este método (ver Figura 4.21). A reparação de apoios deteriorados em asnas é um problema idêntico ao apoio de uma viga, com vantagens na execução uma vez que não existem andares superiores.

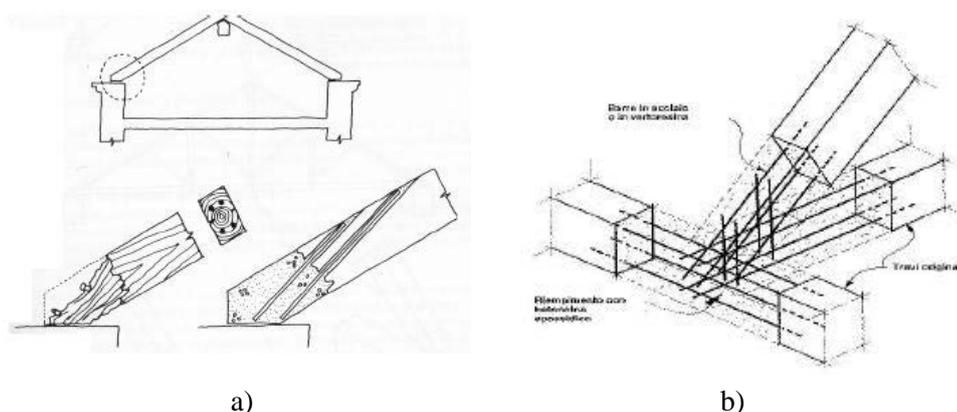


Figura 4.21 – a) Prótese de reforço de pernas de cobertura; b) Prótese de apoio de asna/frechal em resina reforçada com varões de fibra de vidro

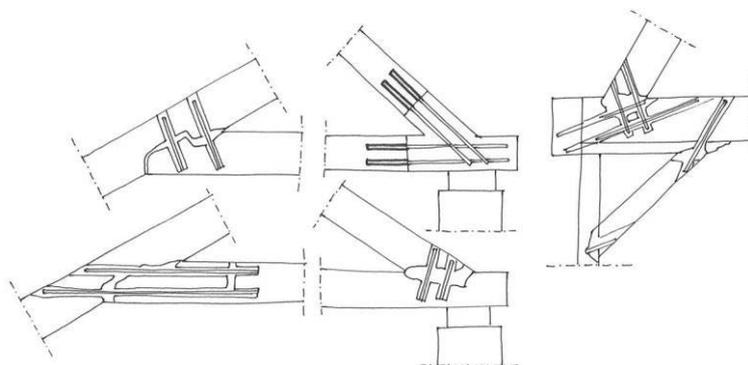


Figura 4.22 – Exemplos de próteses de reforço de ligações e apoios de coberturas (CAMEIRA LOPES, 2009)

Outra aplicação desta solução consiste na reconstrução da base de pilares (ver Figura 4.23). Esta técnica baseia-se no enchimento, através de uma argamassa de resina epoxídica, da zona do pilar degradada e só é aplicável em pilares embutidos em paredes de alvenaria onde o enchimento é confinado pela parede e por uma cofragem de madeira. Inicialmente, é necessário descarregar-se todo o elemento a intervir com o auxílio de escoras metálicas. Todos os restantes

procedimentos de aplicação são idênticos aos descritos anteriormente para as vigas. Na prática, este tipo de intervenção tem a vantagem de não apresentar grandes alterações estruturais (Cunha, 2011).



Figura 4.23 – Exemplos de reconstrução da base de pilar através de resina epoxídica com varões de reforço (Cunha, 2011)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Introdução de varões metálicos ou de FRP selados com cola epoxídica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Degradação das zonas de apoio.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aspeto visual;</li> <li>Proteção ao fogo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>Irreversível;</li> <li>Impossibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>Mão-de-obra especializada.</li> </ul>

Quadro 25 - Quadro resumo da solução: Introdução de varões metálicos ou de FRP selados com cola epoxídica.

#### 4.2.2 Introdução de placas de aço ou de FRP no interior da viga selados com cola epoxídica

A aplicação de placas de reforço, de aço ou FRP's, internas, seladas com resina epoxídica, é uma solução que confere uma grande rigidez na zona de apoio (P.B. Lourenço, 2014) (ver Figura 4.24). A ligação entre as placas e a madeira são efetuadas por colagem com cola epoxídica. Normalmente as placas de reforço mais utilizadas são as de aço e, segundo (Duarte, 2004), este reforço metálico possui capacidade resistente suficiente para, por si próprio, resistir a todas as solicitações aplicadas. Uma variante a esta solução consiste em aplicar as placas diretamente sobre as faces laterais da viga.

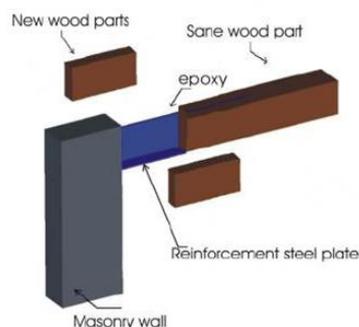


Figura 4.24 – Reforço de apoio através da colocação de chapas de aço no interior da seção seladas com resina epoxídica (Ilharco 2007b)

Este processo construtivo compreende os seguintes procedimentos principais (Costa, 2009):

- Escoramento da viga a reparar;
- Extração da parte degradada;
- Execução de entalhes pela face superior da viga para alojamento das placas, tendo atenção de assegurar uma profundidade regular e evitar desvios;
- Colocação de uma chapa de apoio sobre a parede de forma a que a carga concentrada das placas não provoque o seu esmagamento local ou corte.
- Introdução das placas de reforço. Nesta fase, é importante garantir um comprimento mínimo de ancoragem (Duarte, 2004). De acordo com (Arriaga, 2002), o comprimento de ancoragem na zona sã da viga deve ter entre 2 e 2,5 vezes a sua altura;
- Recobrir as placas com novas peças de madeira ou argamassa. Este procedimento além de ter uma função estética tem também a função de proteção contra o fogo. A utilização da argamassa tem ainda a vantagem de proteger as placas metálicas contra o fogo.

Outra aplicação desta solução consiste na consolidação e reforço de nós nos apoios de asnas (ver Figura 4.25), que se apresentam fissurados, danificados ou com reduzida rigidez face aos esforços aplicados. As chapas de aço inoxidável são colocadas em negativos feitos nas asnas, os quais são posteriormente preenchidos com resina epoxídica. Esta solução é normalmente aplicável em ligações perna-linha e pendural perna (FARIA, 2003).

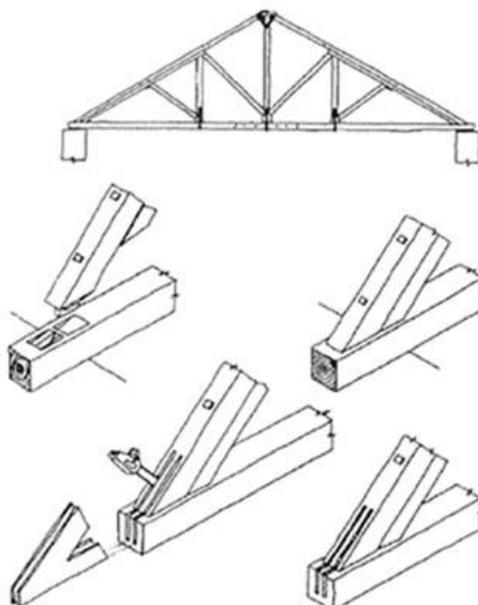


Figura 4.25 – Próteses metálicas em apoios de asnas (Arriaga, 2002)

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Introdução de chapas de aço ou de FRP no interior da viga selados com cola epoxídica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Degradação das zonas de apoio.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aspeto visual;</li> <li>Proteção ao fogo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>Irreversível;</li> <li>Mão-de-obra especializada;</li> <li>Impossibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>Difícil aplicação em vigas de secção circular.</li> </ul>

Quadro 26 - Quadro resumo da solução: Introdução de chapas de aço ou de FRP no interior da viga selados com cola epoxídica.

### 4.2.3 Reforço local em zonas de ligação mecânica

De acordo com (Cruz, 2000), a solução de reforço de ligações mecânicas mais estudada consiste na utilização de um tela ou manta de fibra de vidro que é envolvida em torno da zona abrangida pela ligação (ver Figura 4.26). A utilização deste tecido compósito tem como objetivo aumentar a resistência da ligação, através da melhoria do comportamento em tração perpendicular às fibras da madeira englobada pela ligação. Melhorando a resistência da madeira na ligação, toda a estrutura irá alcançar um nível superior de desempenho (Duarte, 2004). Assim, evita-se a ocorrência da rotura na madeira, e o desempenho da ligação passa a ser determinado pela capacidade de carga da madeira, assim como pela qualidade e resistência dos ligadores. A ductilidade é também aumentada, por vezes, de forma notável. Antes do reforço, é aconselhável aplicar à superfície de madeira um primário destinado a melhorar a aderência dos materiais. As camadas de tecido de fibra de vidro (duas ou mais) são enroladas à mão em torno da madeira, pressionando-as sobre uma cola de epóxico, previamente espalhada sobre a superfície.

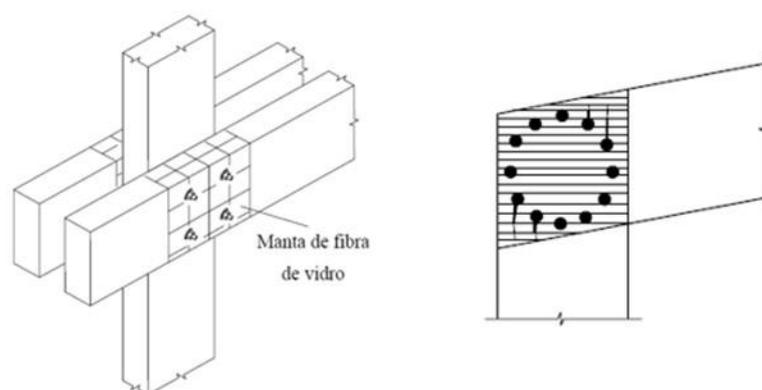


Figura 4.26 – Reforço de ligação mecânica através de fibra de vidro (GFRP): a) (Duarte, 2004); b)(Cruz, 2000)

Haller e Wehsener (1999) realizaram diversos ensaios de ligações reforçadas deste modo (tecido de fibra de vidro do tipo E, com 200g/m<sup>2</sup>). Os resultados obtidos mostraram que esta solução de reforço permite aumentar a resistência da ligação em cerca de 50% em flexão, 50% em tração e 35% no ensaio de corte. Revelaram também que a orientação do tecido relativamente às fibras da madeira é igualmente importante, sendo que a disposição mais eficiente no reforço à transmissão de esforços de corte e tração paralela às fibras é +45°/-45°, enquanto a disposição 0°/90° é mais eficiente no reforço de ligações sujeitas à flexão

De acordo com Larsen (1994), este reforço permite mobilizar a totalidade da capacidade de carga da ligação, para as ligações com cavilhas ou parafusos de porca sujeitas a esforços perpendiculares às fibras da madeira. Os resultados dos ensaios evidenciam ainda que, nas

ligações, existe uma relação entre a resistência e a duração de atuação das cargas idêntica à determinada para a madeira sem reforço, aspecto que é muito importante em questões de dimensionamento das ligações.

Definição da solução	Problema estrutural	Tipo de reforço	Vantagens	Desvantagens
<b>Colocação de tela de fibra de vidro envolvida em torno da zona abrangida pela ligação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Degradação das zonas de ligação.</li> </ul>	Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proteção ao fogo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introdução de materiais diferentes dos originais;</li> <li>Irreversível;</li> <li>Impossibilidade de efetuar o carregamento de imediato;</li> <li>Mão-de-obra especializada.</li> </ul>

Quadro 27 - Quadro resumo da solução: Colocação de tela de fibra de vidro envolvida em torno da zona abrangida pela ligação.

## 5 CONCLUSÃO

No presente capítulo, são apresentadas as conclusões gerais mais pertinentes da investigação efetuada. Neste estudo, sistematizou-se uma série de soluções de reforço de estruturas de madeira com elementos em aço ou FRP's.

A inventariação dos sistemas de reforço permitiu concluir que existe uma enorme variedade, todos eles com vantagens e inconvenientes comparativos. Não existindo uma “solução ideal” a escolha depende fortemente das restrições e condições específicas do que se pretende ou do local onde a estrutura está inserida. Durante o processo de escolha é essencial fazer uma análise comparativa que ajude a definir quais as soluções mais adequadas ao caso concreto, analisando-as de uma forma conjunta: avaliando a sua aplicabilidade, a sua intrusividade; a sua facilidade/rapidez de implementação; melhoria da rigidez e resistência.

Conclui-se que a utilização de reforços com aço ou materiais compósitos apresenta normalmente bons resultados se forem adequados à situação específica e se tomadas todas as precauções necessárias, nomeadamente relativas à compatibilidade de materiais. Ainda assim, verificou-se que existem várias técnicas que embora reforcem um elemento em específico, podem provocar a fragilização da restante estrutura do edifício, sendo que outros implicam a demolição de alguns elementos de valor.

Com o intuito de transmitir uma melhor compreensão dos sistemas expostos, no início do estudo foram analisados os diversos materiais intervenientes, designadamente as suas principais características e as suas potencialidades.

Relativamente à madeira, destaca-se a condição heterogénea, que se caracteriza pelas discontinuidades físicas ao longo da sua constituição. As suas características anisotrópicas devem também ser realçadas, dado que são responsáveis por originar um comportamento mecânico distinto segundo a direção em que a peça se encontra carregada. Foi igualmente destacada a importância que o teor em água e higroscopicidade têm nas características físicas e mecânicas, que conduzem às maiores desvantagens deste material.

No que diz respeito ao aço, conclui-se que o uso deste material nos sistemas estudados não necessita de tempos de espera entre a colocação e a sua entrada em serviço, economiza cofragem, tem tempos de execução rápidos e é eficaz e eficiente.

Os materiais compósitos apresentam inúmeras potencialidades, nomeadamente no que se refere às suas características mecânicas. Tecnicamente, a aplicação de sistemas com este material não

apresenta grandes dificuldades, contudo, é necessário que quem realiza a intervenção possua alguma experiência prévia na execução deste tipo de técnicas, mais do que os operários que executam técnicas de reforço com elementos em aço. Estes materiais são uma mais-valia em casos onde se pretenda manter o aspeto estético e uma elevada resistência à corrosão. A vasta variedade de materiais compósitos disponíveis no mercado aliada à sua rápida evolução, tanto a nível de propriedades intrínsecas como da forma de apresentação, torna difícil a aquisição de conhecimentos e experiência suficiente que fundamente a elaboração de normas destinadas a regular a sua aplicação em projetos de reforço. Acrescenta-se ainda o facto de, sendo o uso deste material em sistemas de reforços relativamente recente, não existirem casos práticos a partir dos quais se possam retirar conclusões sobre o comportamento a longo prazo.

Dado que o reforço de estruturas de madeira está em franca ascensão, considera-se que a realização deste estudo se reveste de especial interesse e de grande utilidade prática. De um modo geral, poderá dizer-se que a presente dissertação visa constituir-se como objeto de consulta / manual no que diz respeito à informação relativa a métodos de reforço.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Apolo, G. M.-L., A. (1995). Curso: Técnicas de intervención en el patrimonio arquitectónico. Tomo 1: Reestructuración en madera. *Consultores Tecnicos de Construcción*.

Appleton, J. (2003). Reabilitação de Edifícios Antigos – Patologias e tecnologias de intervenção. *Edições Orion*.

Arriaga, F., Peraza, F, Esteban, M., Bobadilha, I, Garcia, F. (2002). Intervención en estructuras de madera. *AITIM*.

Ashurst, J. A., N. (1988). Practical Building Conservation - Wood, Glass & Resins. *English Heritage Technical Handbook, 5*.

Baldessari, C. (2010). In-plane behaviour of differently refurbished timber floors. Trento. Itália.

Balseiro, A. (2007). *Reforço e reabilitação de vigas de madeira por pré-esforço com laminados FRP*. FEUP.

Barros, R. M., J. (2006). *Reforço Sísmico de Estruturas de Alvenaria com Elementos Metálicos*: Universidade Fernando Pessoa.

Borri, A. C., M.; Grazini, A. (2004). A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials *Composites: Part B: Engineering*.

Branco, M. (2007). *Reforço Sísmico de Edifícios de Alvenaria*. IST, Lisboa.

Brignola, A. P., S.; Pampanin, S. (2008). *In-plane stiffness of wooden floor*. Paper presented at the New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference, Nova Zelândia.

Brites, R. J. D. S. (2011). Avaliação de Segurança das Estruturas Antigas de Madeira. *Dissertação elaborada em colaboração com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho no âmbito do protocolo de cooperação com o LNEC*.

CAMEIRA LOPES, M. F., J. A. (2009). Tipificação de soluções de reabilitação de estruturas de madeira em coberturas de edifícios antigos.

.

Campos, L. (2006). *Técnicas de recuperação e reforço estrutural com estruturas de aço*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologias e Ciências, Faculdade de Engenharia

Rio de Janeiro.

Carneiro, F. F. O. D. (2012). REFORÇO DE VIGAS DE MADEIRA COM ELEMENTOS DE AÇO EM OBRAS DE REABILITAÇÃO.

Cóias, V. (2007). Reabilitação estrutural de edifícios antigos. Alvenaria/madeira técnicas pouco intrusivas.

Corradi, A. B. M. (2011). Strengthening of timber beams with high strength steel cords. *Composites: Part B*.

Costa, A., Paupério, E., Guedes, J., Ilharco, T., Lopes, V. (2008a). Igreja de Valongo - Avaliação do estado de conservação das coberturas" *FEUP, Valongo*.

Costa, L. (2009). Tipificação de soluções de reabilitação de Pavimentos Estruturais em Madeira em Edifícios Antigos.

Cruz, H. M., J.S.; Moura, J. P.; Cóias; V. (2000). [Reforço local de elementos estruturais de madeira por meio de compósitos].

Cunha, A. O. F. J. S. M. V. M. (2011). Reforço de Estruturas de Madeira por Recurso a Elementos de Betão Armado e Metálicos. *CIMAD 11 – 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção, 7-9/06/2011, Coimbra, PORTUGAL*.

D'Ambrisi, A. F., F. ; Luciano, R. (2014). *Experimental investigation on flexural behavior of timber beams repaired with CFRP plates*.

Dias, T. I. d. M. P. (2008). Pavimentos de Madeira em Edifícios Antigos. Diagnóstico e Intervenção Estrutural.

Duarte, A. C. R. (2004). Reabilitação de Elementos Estruturais de Madeira com Argamassa Epoxídica Armada.

FARIA, J. A. (2003). Avaliação e reabilitação das construções existentes.

.

Ferreira, N. F. d. O. (2009). Técnicas de Ligação Pavimentos/Paredes em Reabilitação de edifícios antigos. *Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em engenharia cívil. FEUP*

- França, K. (2007). Estudo de Reforços de Elementos Estruturais de Madeira com Estrutura Metálica, em Edificações Antigas. *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Universidade Federal de Ouro Preto.*
- Garcia, P. D. E., A. C. ; Garcia, M. N. G. . (2013). Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. *Composites Part B-Engineering.*
- Gattesco, N. M., L. (2006). Strengthening and Stiffening Ancient Wooden Floors with Flat Steel Profiles. “*Structural Analysis of Historical Constructions*”. New Delhi.
- Gemert, D. V. B., M.V. (1987). *Structural restoration of wooden beams by means of epoxy resin. Materials and structures / Materiaux et Construction: Rilem Publications.*
- Gentile, C. S., D. ; Rizkalla, S. H. (2002). Timber beams strengthened with GFRP bars: Development and applications. *Journal of Composites for Construction*, 11-20.
- Gómez, C. La rehabilitación de los elementos estructurales de la arquitectura tradicional mediterránea. *Herramienta 8. Las técnicas de rehabilitación: reforzar las estructuras. Madrid. Espanha.*
- González-Bravo. (2011). Prótesis metálicas para la reparación de cabezas de vigas de madera degradadas. *Informes de la Construcción.*
- González-Bravo, C. (2007). Reparación de estructuras de madera mediante refuerzos metálicos. Curso construcción en madera. *LYCEA.*
- González-Bravo, e. a. (2010). Refuerzo de vigas de madera mediante perfiles metálicos situados en la cara superior. *Mater.Construcc.*, 60.
- Ilharco, T. (2008). Pavimentos de Madeira em Edifícios Antigos. Diagnóstico e Intervenção Estrutural. *Dissertação de Mestrado em Reabilitação do Património Edificado. FEUP, Porto.*
- Ilharco, T. (2010 b). *Sustainable interventions: Rehabilitation of old timber structures with traditional materials.* Paper presented at the Sustainable building conference.
- Ilharco, T. G., J.; Paupério, E.; Costa, A. (2010). Intervenção em estruturas de madeira. *Congresso PATRIMÓNIO 2010. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.*
- Ilharco , T. R., X.; Paupério, E.; Guedes, J.; Costa, A. (2007b). Organization of information on Built Heritage using Multimedia Technologies. *Rehabimed , Barcelona.*
- Jasienko, J., & Nowak, T. P. (2014). Solid timber beams strengthened with steel plates - Experimental studies. *Construction and Building Materials*, 63, 81-88. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.020
-

- Jurina, L. (2004). Tecniche innovative nel consolidamento di capriate e solai in legno. Atti del seminario internazionale. *C.I.A.S. "Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni"* Milão. Itália.
- Jurina, L. (2011). L'uso dell' acciaio nel consolidamento delle capriate e dei solai in legno. *Politecnico di Milano. Milão. Itália.*
- Lopes, M. A. C. (2007). *Tipificação de Soluções de Reabilitação de Estruturas de Madeira em Coberturas de Edifícios Antigos*. FEUP, Porto.
- M. Reis, F. B. a. J. M. (2006). Técnicas de reabilitação em estruturas de madeira.
- Mariani, M. (2004). Consolidamento delle Strutture Lignee con L'Acciaio. *Collana Centro Studi Sisto Mastrodicasa*.
- Marini, A. (2006). Transformation of Wooden Roof Pitches into Antiseismic Shear Resistance Diaphragms. In E. Giuriani (Ed.), *Structural Analysis of Historical Constructions* New Delhi.
- Mazzolani, F. *L'Acciaio negli interventi di consolidamento e adeguamento sísmico*. Nápoles.
- Mazzolani, F. (1991). L'Acciaio nel Consolidamento. *Associazione Sviluppo Strutture Acciaio*.
- P.B. Lourenço, J. M. B. e. H. S. S. (2014). Reforço de elementos existentes de madeira.
- Pinto, L. (2008). Inventory of repair and strengthening methods timber. Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions. *Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. Espanha.*
- Reis, M. B., F. ; Mascarenhas, J. Técnicas de Reabilitação em Estruturas de Madeira. *Materiais de Construção*, 40-46.
- Silva, S. P. L. C., P. B. ; Juvandes, L.F.P. (2004). *Técnicas Avançadas de Reforço de Estruturas de Madeira com compósitos reforçados com fibras (FRP)*. Paper presented at the CIMAD 04, Guimarães.
- Tampone, G. (1996). Il Restauro Delle Strutture di Legno. *Editore Ulrico Hoepli. Milão. Itália.*
- Uzielli, L. (1995). *Restoring timber structures- Repair and Strengthening*. Almere, Centrum Hout, Holanda.