



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

Caracterização Dinâmica de Vigas de Madeira Recuperadas após ocorrência de Danos Mecânicos

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

Autor

Solange Pereira Caetano

Orientador

Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias

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, outubro, 2015

AGRADECIMENTOS

Gostaria de em primeiro lugar agradecer à minha família, em particular aos meus pais, por todo o esforço, sacrifício e acompanhamento colocados em todo o meu percurso académico.

Quero agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Alfredo Dias, pela paciência, disponibilidade e orientação dadas na elaboração deste trabalho.

Especialmente quero agradecer ao André Marques pela sua ajuda nas várias etapas do trabalho. Manifesto também a minha gratidão ao Carlos Martins pelas sugestões e colaboração no laboratório.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas que, perto ou distantes, me acompanharam, motivaram e incentivaram durante este trabalho. Agradeço especialmente, ao Fausto Carvalho, Francisco Filipe, Mariana Vide, Sara Brito, Andrea Silva e Paulo Jorge Pereira.

Por último, quero agradecer ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra pela formação, conhecimento e saber transmitidos ao longo destes últimos anos e, especialmente, pela oportunidade e condições concedidas para a realização deste trabalho.

RESUMO

Os elementos de madeira fazem parte da estrutura de muitos dos edifícios do património edificado, por isso, procura-se cada vez mais, desenvolver e estudar diferentes técnicas de reabilitação que evitem a sua remoção.

Após a pesquisa de diversas técnicas, estudou-se neste trabalho a reabilitação de elementos estruturais de madeira, sem remoção da parte deteriorada. Esta técnica consistiu na colocação de duas placas de contraplacado nas duas faces laterais opostas das vigas, sendo os dois elementos ligados por meio de parafusos. O sistema foi realizado em três vigas de madeira lamelada colada, GL24h, que se encontravam no laboratório já danificadas a meio vão devido a danos mecânicos induzidos pela realização de ensaios destrutivos. O dimensionamento dos ligadores foi realizado segundo a norma EN 1995-1-1.

Para testar a eficiência desta reabilitação foram realizados ensaios dinâmicos, por vibração longitudinal com recurso ao *Timber Grader* MTG e ao acelerómetro nas vigas degradadas e posteriormente nas reabilitadas. A informação sobre as características das vigas no seu estado original foi obtida no âmbito de um trabalho de doutoramento prévio. Os resultados destes ensaios mostraram que a reabilitação aumentou a rigidez das vigas relativamente às degradadas.

Os ensaios estáticos não destrutivos mostraram que os elementos estruturais reabilitados apresentaram uma relação aproximadamente linear entre a força aplicada e os deslocamentos, no entanto, não se conseguiu restaurar completamente a rigidez das vigas no seu estado original.

Os ensaios estáticos destrutivos para a determinação da resistência à flexão do elemento estrutural mostraram que houve um ganho de resistência à flexão. Observou-se também que a rutura das três vigas se iniciou no contraplacado, pela rutura em bloco no alinhamento vertical dos parafusos.

Os ensaios estáticos foram realizados segundo a norma EN 408.

O facto de as vigas apresentarem danos distintos e heterogéneos é determinante para o comportamento dos elementos estruturais após a reabilitação e consequentemente para os resultados obtidos.

ABSTRACT

Timber elements are part of the structure of many buildings belonging to our heritage. Hence there is an increase in developing and studying various rehabilitation techniques which prevent its removal.

After researching various techniques, we studied in this project the rehabilitation of structural timber elements without removing the decayed part. These techniques consisted of placing two plywood boards on two opposite sides of the beams, the two elements being connected by means of screws. The system was conducted in three beams of glued-lamellar GL24h, that were in the laboratory already damaged at mid span due to mechanical damage induced by carrying out destructive tests. The design of the connectors was performed according to standard EN 1995-1-1.

To test the efficiency of rehabilitation a dynamic test was performed, by longitudinal vibration using *Timber Grader* MTG and accelerometer in degraded beams and later in the rehabilitated ones. Information on the characteristics of the beams in its original state was provided by a previous doctoral work. The results of these tests showed that the rehabilitation increased rigidity of the beams in relation to the degraded ones.

The non-destructive statical tests showed that the structural elements rehabilitated showed an approximately linear relationship between the applied force and displacements, however, we were unable to completely restore the rigidity of the beams in their original state.

The statical destructive tests to determine the flexural strength of the structural element showed a gain of flexural strength. It was also observed that the breakage of the three beams in plywood was initiated by a block rupture in the vertical alignment of the screws.

Statical tests were performed according to standard EN 408.

The fact that the beams present distinct and heterogeneous damage is crucial for the behavior of structural elements after rehabilitation and hence for the results obtained.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	ix
ABREVIATURAS	x
SIMBOLOGIA	xi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento Geral	1
1.2 Descrição e Objetivos das Etapas Realizadas	2
1.3 Estrutura da Dissertação	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Reabilitação e Reforço Estrutural em Vigas de Madeira.....	4
2.1.1 Degradações dos Elementos Estruturais a Meio Vão.....	5
2.1.2 Reparação de Apoios Deteriorados	10
2.1.3 Deformações Excessivas	17
2.1.4 Empenamentos e Fendas	19
2.1.5 Secção Insuficiente	22
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	25
3.1 Introdução	25
3.2 Vigas de Lamelado-Colado	25
3.3 Contraplacado	26
3.4 Dimensionamento da Ligação Contraplacado-Viga.....	27

3.5	Técnica de Reabilitação Adotada	32
3.6	Procedimentos de Reabilitação	35
3.7	Ensaios	37
3.7.1	Ensaio Dinâmico: <i>Timber Grader</i> MTG	37
3.7.2	Ensaio Dinâmico: Acelerómetro	39
3.7.3	Ensaio Estático: Determinação do Módulo de Elasticidade em Flexão	39
3.7.4	Ensaio Estático: Determinação da Resistência à Flexão do Elemento Estrutural	42
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	44
4.1	Introdução	44
4.2	Comparação dos Ensaios Dinâmicos	44
4.3	Comparação dos Resultados do Ensaio Estático não Destrutivo	47
4.4	Resistência à Flexão	51
4.5	Processo de Rutura	55
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	58
5.1	Conclusões	58
5.2	Trabalhos Futuros	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Reparação da viga a meio vão através da aplicação de novos elementos de madeira ou chapas metálicas nas faces laterais (Duarte, 2004).....	5
Figura 2.2 - Reparação da viga a meio vão através da aplicação de chapas metálicas na face inferior	6
Figura 2.3 - Reforço com chapas de aço no interior do elemento de madeira e argamassas epoxídicas, imagem adaptada de (Jasienko e Nowak, 2014)	7
Figura 2.4 - Reforço com chapas de aço nas faces laterais do elemento de madeira e argamassa epoxídica, imagem adaptada de (Jasienko e Nowak, 2014)	7
Figura 2.5 - Sistema de reabilitação com prótese de madeira e aço A400NR (Duarte, 2004) ...	8
Figura 2.6 - Configuração do reforço com chapas (à esquerda) (Garcia et al, 2013) e tecidos de FRP (à direita) (D'Ambrisi et al, 2014)	9
Figura 2.7 – Configuração de reforço com varões CFRP, imagem adaptada de (Gentile et al, 2002).....	10
Figura 2.8 – Frechal de madeira apoiada em cachorro de granito (à esquerda) e frechal de betão armado (à direita), (Arriaga, 2002)	11
Figura 2.9 – Introdução de cantoneiras metálicas nos apoios nas vigas (Arriaga, 2002).....	11
Figura 2.10 - Reforço do elemento de madeira através da aplicação de novas peças de madeiras ou metálicas nos apoios (CM-VISEU).....	12
Figura 2.11 - Prótese metálica (Bravo C., 2011).....	13
Figura 2.12 - Reforço do elemento de madeira através da introdução de resinas epoxy (CM-VISEU)	14
Figura 2.13 - Reparação da viga de madeira por meio de prótese de madeira (Dias A., 2009)	15
Figura 2.14 - Configurações típicas de reparação por meio de próteses, imagem adaptada de (ROTAFIX)	16
Figura 2.15 - Pré-esforço exterior (CM-VISEU).....	18
Figura 2.16 - Injeção de resina epoxídica nas fissuras do elemento de madeira (Dias A., 2009)	21

Figura 2.17 – Reparação de fendas com adesivo de epóxico e varões de reforço (Lopes, 2007)	22
Figura 2.18 – Aplicação do novo elemento com a mesma largura do existente (à esquerda) e com largura superior (à direita), (Arriaga, 2002)	23
Figura 2.19 – Ligação entre a madeira e a argamassa epoxídica com ligadores e entalhes paralelepípedos (à esquerda) e ligação da madeira com argamassa epoxídica realizada apenas com ligadores (à direita), (Arriaga, 2002)	24
Figura 3.1 – Contraplacado de choupo	27
Figura 3.2 - Modos de rotura para uma ligação madeira-madeira (CEN, 2003).....	27
Figura 3.3 - Forças aplicadas à viga	30
Figura 3.4 – Parafuso utilizado.....	31
Figura 3.5 - Fissuras da Viga 1.....	33
Figura 3.6 - Fissuras da Viga 5.....	33
Figura 3.7 - Fissuras da Viga 11.....	34
Figura 3.8 - Distância dos parafusos (mm).....	34
Figura 3.9 – Comprimento longitudinal do contraplacado e excentricidade em relação ao centro da viga (mm).....	35
Figura 3.10 -Procedimentos de Reabilitação.....	37
Figura 3.11 - <i>Timber Grader</i> MTG	38
Figura 3.12 - Humidímetro de agulhas (à esquerda) (Bernardo, 2015) e balança (à direita) ...	38
Figura 3.13 - Medição da frequência própria de vibração através do acelerómetro	39
Figura 3.14 - Esquema de ensaio para determinar $E_{m,local}$, de acordo com a EN 408, (CEN, 2012).....	40
Figura 3.15 - Esquema de ensaio para determinar $E_{m,global}$, de acordo com a EN 408, (CEN, 2012).....	40
Figura 3.16 – Chapas auxiliares para a aplicação das forças à viga.....	41
Figura 3.17 – Defletómetros.....	41
Figura 3.18 - Esquema de ensaio para determinar f_m , de acordo com a EN 408, (CEN, 2012)	42
Figura 3.19 - Defletómetros nas vigas 5 (à esquerda) e viga 11 (à direita).....	43
Figura 4.1 - Gráficos das frequências da viga 1 danificada e reabilitada.....	46

Figura 4.2 - Gráficos das frequências da viga 5 danificada e reabilitada.....	46
Figura 4.3 - Gráficos das frequências da viga 11 danificada e reabilitada.....	46
Figura 4.4 - Gráfico dos deslocamentos locais e globais da viga 1, respetivamente.....	47
Figura 4.5 - Gráficos dos deslocamentos locais e globais da viga 5, respetivamente	48
Figura 4.6 - Gráficos dos deslocamentos locais e globais da viga 11, respetivamente	48
Figura 4.7 - Módulo de Elasticidade Local	49
Figura 4.8 - Módulo de elasticidade Global	50
Figura 4.9 - Relação entre a força e o deslocamento a meio vão	52
Figura 4.10 - Relação entre a força e o deslocamento a 1/4 de vão da viga 1.....	53
Figura 4.11 - Relação entre a força e o deslocamento a 1/4 de vão da viga 5.....	53
Figura 4.12 - Relação entre a força e o deslocamento a 1/4 de vão da viga 11.....	53
Figura 4.13 - Tensão máxima de rutura das vigas após reabilitação	54
Figura 4.14 - Rutura da Viga 1	56
Figura 4.15 - Rutura por bloco dos parafusos da Viga 5	56
Figura 4.16 - Rutura da Viga 5	56
Figura 4.17 - Rutura da Viga 11	57

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Características das vigas na situação original	25
Quadro 3.2 – Propriedades dinâmicas e mecânicas das vigas	26
Quadro 3.3 - Características do contraplacado	27
Quadro 3.4 - Espaçamentos mínimos segundo a norma EN 1995-1-1 (CEN, 2003)	31
Quadro 3.5 - Capacidade de um ligador	32
Quadro 3.6 - Afastamentos mínimos adotados	32
Quadro 3.7 - Verificação do número de parafusos necessários por fila	32
Quadro 4.1 - Frequências e módulos de elasticidade resultantes dos ensaios dinâmicos	44
Quadro 4.2 – Quadro Resumo: Força e deslocamentos locais e globais máximos obtidos	49

ABREVIATURAS

CEN – Comité Européen de Normalisation;

EN – European Norm;

GLT– Glued Laminated Timber;

SIMBOLOGIA

$E_{m,dym}$ – Módulo de elasticidade dinâmico

$E_{m,g}$ – Módulo de elasticidade global;

$E_{m,l}$ – Módulo de elasticidade local;

$F_{ax,\alpha,R}$ – Capacidade resistente do ligador ao arranque;

$F_{v,ef,R}$ – Capacidade efetiva de uma linha de ligadores paralela ao fio da madeira;

$F_{v,R}$ – Capacidade resistente de um ligador isolado;

F_a – Força máxima aplicada pelas cabeças de carga;

G – Módulo de distorção;

I – Inércia da secção transversal em relação ao eixo de flexão;

$M_{y,R}$ – Momento de cedência plástica do ligador.

a – Distância entre a cabeça de carga e o apoio mais próximo;

b – Espessura do elemento;

d – Diâmetro do ligador;

d_{ef} – Diâmetro efetivo do ligador;

f – Frequência própria de vibração;

f_m – Resistência à flexão;

$f_{ax,\alpha}$ – Resistência ao arranque a um ângulo α entre o eixo do ligador e o fio;

$f_{h,1}$ - Resistência ao esmagamento do contraplacado;

$f_{h,2}$ - Resistência ao esmagamento da madeira;

f_u – Tensão de rutura do ligador;

h - Altura do elemento;

l – Comprimento do elemento;

l_l – Distância entre defletómetros;

l_{ef} – Comprimento efetivo de um ligador;

n_{ef} – Número efetivo de ligadores;

t_1 – Comprimento de penetração do ligador no contraplacado;

t_2 – Comprimento de penetração do ligador na madeira;

ρ – Massa volúmica;

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Geral

Muitos dos edifícios do património edificado incluem uma estrutura composta por elementos de madeira. O volume económico envolvido na manutenção e renovação deste património edificado é considerável. Por conseguinte, os estudos das diferentes técnicas de reforço e reabilitação na aplicação deste tipo de estruturas tem cada vez maior interesse (Garcia et al, 2013). Por isso, desenvolveram-se e testaram-se técnicas que evitam a remoção das vigas de madeira que, muitas vezes, implicam a demolição de outros elementos arquitetónicos valiosos, tais como, pisos e tetos decorados (D'Ambrisi et al, 2014).

Os tipos de degradação dos elementos estruturais podem ser devido a inúmeros fatores, como por exemplo, erros de projeto ou de montagem, falta de contraventamento, ataques biológicos, atmosféricos e/ou químicos, envelhecimento da madeira, excentricidades de cargas, etc. Para cada situação deve-se analisar e estudar o problema, escolhendo a solução de reabilitação e/ou reforço que melhor se adequa. A escolha dessa solução depende de vários fatores como a patologia existente no elemento, o custo de intervenção e o grau de degradação.

Após as pesquisas realizadas, escolheu-se para esta dissertação investigar o comportamento de um sistema de reabilitação de elementos estruturais de madeira, sem remoção da parte deteriorada. Esta solução é especialmente adequada ao restauro de vigas submetidas a esforços de flexão. O sistema proposto consiste na colocação de duas placas de contraplacado nas duas faces laterais opostas das vigas, sendo estes dois elementos ligados à viga por meio de parafusos devidamente protegidos contra a corrosão. Este sistema foi realizado em 3 vigas de lamelado-colado, GL24h, produzidos com madeira de casquinha branca, que se encontravam no laboratório já danificadas a meio vão. A escolha feita para esta reabilitação teve por base, o facto de a maioria das reabilitações realizadas para este tipo de esforços serem efetuadas através da aplicação, nas duas faces laterais da viga, de placas de madeira com as mesmas propriedades da viga a reabilitar ou de chapas metálicas. Pretende-se, portanto, obter resultados relativamente à reabilitação com a aplicação de chapas de contraplacado.

1.2 Descrição e Objetivos das Etapas Realizadas

A primeira etapa deste trabalho teve como objetivo dimensionar e definir a metodologia de aplicação dos parafusos. Para isso, foi feita a caracterização dos materiais escolhidos para a reabilitação e a análise visual das fissuras de cada viga.

O objetivo dos ensaios dinâmicos não destrutivos foi determinar as frequências e a rigidez antes e após a reabilitação em estudo e, com isso, comparar a alteração de resultados. Foram realizados ensaios de vibração longitudinal através da utilização de dois equipamentos distintos: *Timber Grader* MTG e Acelerómetro.

Com o objetivo de obter o módulo de elasticidade local e global, bem como a resistência à flexão das vigas reabilitadas, foram realizados ensaios estáticos. Para a obtenção do módulo de elasticidade local e global efetuaram-se ensaios não destrutivos, enquanto, para a determinação da resistência à flexão efetuaram-se ensaios destrutivos. O procedimento para estes ensaios encontra-se descrito na norma europeia EN408, (CEN, 2012).

Como objetivo final, os resultados obtidos nos diferentes ensaios foram comparados com a informação que já existia dos ensaios realizados por outros investigadores do laboratório para as mesmas vigas no seu estado original. Antes de se proceder à comparação de resultados, estes foram tratados e analisados.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação desenvolve-se em 6 capítulos, incluindo a Introdução e Referências Bibliográficas.

No capítulo 1 é apresentado o tema de dissertação, fazendo-se um enquadramento geral, a descrição dos objetivos e expondo-se o trabalho realizado.

No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica relativa aos tipos de degradações que podem ocorrer em elementos estruturais de madeira e as várias técnicas de reabilitação, revelando as suas principais vantagens e desvantagens, assim como a metodologia para a sua execução.

O capítulo 3 descreve o sistema de reabilitação a testar, bem como a caracterização dos materiais e a fundamentação das escolhas efetuadas. Por último são apresentados os ensaios realizados.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo anterior. É realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos das vigas nos seus estados original, danificado e reabilitado, com o objetivo de analisar a eficácia da reabilitação.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões retiradas desta dissertação, bem como algumas recomendações de trabalhos futuros para o desenvolvimento desta investigação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reabilitação e Reforço Estrutural em Vigas de Madeira

Na construção sempre se procurou utilizar materiais com grande durabilidade e com muito boas propriedades estruturais. A madeira é um exemplo desses materiais, no entanto, pode em determinadas condições ver diminuídas essas propriedades e contribuir assim, para a rápida degradação de um edifício.

A reabilitação é um processo de reparação e reforço de edifícios, no qual se deve procurar preservar o seu valor histórico, cultural e arquitetônico. Na reabilitação de edifícios, mais concretamente na parte estrutural, antes de se proceder a qualquer intervenção deve ser feita uma avaliação e um diagnóstico da estrutura, para posteriormente se elaborar uma estratégia de intervenção e se escolher as técnicas mais adequadas para cada caso.

Na escolha da técnica mais adequada é necessário ter em consideração alguns fatores, tais como: i) o objetivo da intervenção, ii) o custo, iii) o grau de degradação, iv) as vantagens e v) as limitações de cada solução. Da mesma forma é necessário ter em conta as patologias existentes nos elementos a reparar, que podem ser: i) ataque biológico, atmosféricos e/ou químicos, ii) envelhecimento natural da madeira, iii) esmagamento da madeira pelos ligadores, iv) corrosão e/ou v) rotura de ligadores e danos provocados pelo fogo.

As técnicas de reabilitação podem ser agrupadas em dois grupos, nomeadamente técnicas de reabilitação e técnicas de reforço. As técnicas de reabilitação dizem respeito à reposição das capacidades resistentes e desempenho original dos elementos. Enquanto as técnicas de reforço caracterizam-se por reduzir as deformações e aumentar a capacidade de carga dos elementos. Para além disso, estas técnicas podem ser designadas por “técnicas de reabilitação tradicionais” devido a constituírem um conjunto de tecnologias usadas frequentemente e com sucesso na recuperação de estruturas de madeiras (alguns exemplos: reforço com elementos de madeira, reparação de fendas com parafusos ou cintas metálicas e adição de novos elementos estruturais de reforço). Outras técnicas recentes recorrem a materiais compósitos e resinas epoxídicas, que ainda estão a ser desenvolvidas.

Algumas das técnicas são descritas de seguida e destinam-se essencialmente à reparação de elementos degradados ou à necessidade de reforço.

2.1.1 Degradações dos Elementos Estruturais a Meio Vão

A degradação das vigas a meio vão ocorrem, por exemplo, quando existe rutura por flexão, ou seja, quando os esforços são superiores aqueles que o elemento estrutural consegue suportar. Muitas vezes este fenómeno ocorre quando existe um excesso de cargas devido a alterações no uso do edifício, dimensionamento incorreto das secções, espaçamento exagerado entre vigas, ocorrência de humidificação por danos na cobertura, existência de patologias na madeira, etc. A ocorrência deste tipo de danos diminui a capacidade e estabilidade estrutural.

Substituição completa dos elementos degradados

A substituição integral dos elementos degradados é uma solução bastante utilizada nas situações de deterioração grave dos elementos estruturais. A sua substituição pode ser efetuada por novos elementos de madeira ou por outro material. Durante as operações a estrutura necessita de escoramento e fica restringida a acessibilidade ao espaço onde a reparação decorre.

Embora seja, em muitos casos, uma solução bastante simples e económica, tem como inconveniente a perda de valor histórico e integridade da estrutura intervencionada.

Reforço do elemento de madeira através da aplicação de novas peças de madeira ou metálicas a meio vão

A solução consiste em reforçar localmente o elemento degradado através da aplicação de novos elementos de madeira ou metálicos. São fixados por meio de parafusos com ou sem porca, pregos, chapas e cintas metálicas em um ou em ambos os lados da viga degradada (Feio A., 2011). A utilização desta técnica tem interesse em elementos partidos, enfraquecidos ou na presença de fendas de grandes dimensões, repondo assim a capacidade resistente do elemento. A Figura 2.1 ilustra este tipo de reparação.

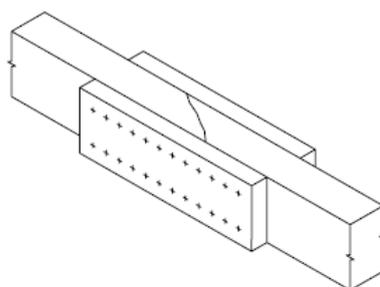


Figura 2.1 - Reparação da viga a meio vão através da aplicação de novos elementos de madeira ou chapas metálicas nas faces laterais (Duarte, 2004)

A Figura 2.2 ilustra outra solução que se pode adotar, que passa pela introdução de chapas metálicas na face inferior das vigas. A ligação é realizada através de parafusos aplicados verticalmente de baixo para cima. Este método permite conferir maior rigidez à viga assim como comprimir verticalmente o elemento estrutural fechando as fissuras existentes.

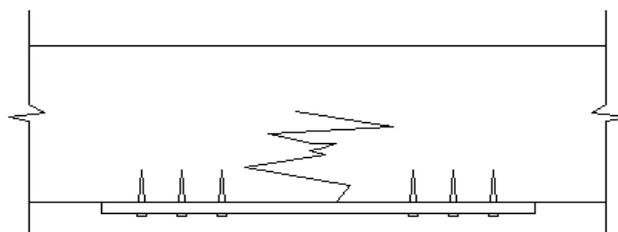


Figura 2.2 - Reparação da viga a meio vão através da aplicação de chapas metálicas na face inferior

Para que estas soluções tenham um bom desempenho, devem ser assegurados comprimentos mínimos de sobreposição. Para além disso, os novos elementos devem ter as mesmas dimensões da viga, largura ou altura, de forma, a melhorar o aspeto visual.

A vantagem destes métodos é a não necessidade de remoção do material degradado, o que implicaria um processo moroso. Por outro lado, o inconveniente é o contacto entre o elemento tratado e os novos elementos, pois mesmo sendo estes tratados, tem-se verificado uma taxa de deterioração elevada a longo prazo (Appleton, 2011).

Reforço com recurso a chapas de aço e argamassa epoxídica

O reforço com recurso a chapas de aço com argamassa epoxídica é eficiente em elementos de madeira com defeitos locais de proporções anormais ou ruturas localizadas. Este tipo de reforço é realizado internamente nos elementos de madeira. As chapas são colocadas a partir da face superior com a argamassa epoxídica para a ligação, de forma a não ficarem visíveis. Se possível deverão utilizar-se duas chapas em vez de uma única, obtendo assim uma resistência ao corte por corte duplo. O comprimento e largura das chapas, bem como a zona de reforço devem ser tais que permitam uma boa transmissão de esforços, nomeadamente momento fletores e esforços de corte. Outro aspeto a ter em consideração é que este deverá ser realizado em secções da madeira sã sem patologias aparentes (Feio A., 2011). Uma desvantagem deste método é o facto de o reforço dever ser efetuado através da face superior do elemento de madeira, o que em caso de pavimentos pode implicar a remoção do soalho existente (Feio A., 2011). A Figura 2.3 ilustra este tipo de reforço.

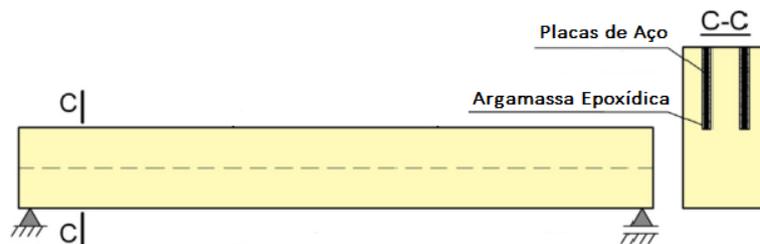


Figura 2.3 - Reforço com chapas de aço no interior do elemento de madeira e argamassas epoxídicas, imagem adaptada de (Jasienko e Nowak, 2014)

Uma variante a esta solução passa pela colagem exterior das chapas nas vigas com colas epoxídicas. As chapas podem aplicar-se nas faces laterais, na face superior ou inferior. Quando se utiliza este método é necessário exercer pressão nas placas que estão a ser coladas. Se a aplicação for feita lateral ou inferiormente torna-se uma vantagem, por não ser necessário remover o pavimento (Jasienko e Nowak, 2014). A Figura 2.4 exemplifica o reforço do elemento de madeira com chapas nas faces laterais.

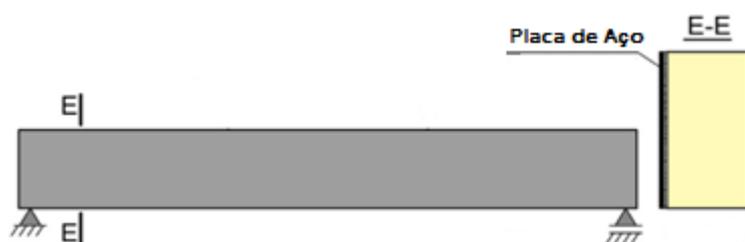


Figura 2.4 - Reforço com chapas de aço nas faces laterais do elemento de madeira e argamassa epoxídica, imagem adaptada de (Jasienko e Nowak, 2014)

Substituição do material deteriorado por meio de próteses coladas a meio vão

Este tipo de reparação consiste na remoção das partes de madeira com características mecânicas insuficientes e/ou parcialmente deterioradas, conservando as partes sãs que apresentam excelente estado de conservação e capacidade de carga.

O posicionamento destes materiais deve-se ter em conta, para desta forma se obter uma melhor eficiência. As chapas FRP devem ser inseridas na peça de madeira com a sua direção principal orientada paralelamente às fibras de madeira, para que a rigidez e resistência à flexão sejam aumentadas. Os tecidos compósitos, geralmente fibras de vidro, devem ser colados diretamente sobre a madeira, constituindo assim um compósito local. Neste caso não se pretende aumentar a resistência do elemento paralelamente às fibras, mas a sua resistência ao corte e à tração perpendicular às fibras (Cruz H., 2000). É importante também realçar que para alcançar a aderência adequada entre elementos, é necessário cuidados com a preparação das superfícies onde são aplicadas as colas e ainda com a sensibilidade destas à temperatura (Jasienko e Nowak, 2014).



Figura 2.6 - Configuração do reforço com chapas (à esquerda) (Garcia et al, 2013) e tecidos de FRP (à direita) (D'Ambrisi et al, 2014)

O método com chapas FRP pode ainda ser realizado através do reforço em ambas as faces (tração e compressão) do elemento de madeira, que segundo Alam et al, 2009 é um reforço mais eficaz, dado que tem uma melhor rigidez à flexão comparativamente ao reforço em apenas uma das faces.

Reforço de vigas de madeira com varões GFRP

Este método consiste na introdução de varões GFRP em entalhes de espessura variável, dependendo do número de varões a utilizar. Estes são selados com resinas epoxídicas e são localizados junto à superfície correspondente à zona submetida a esforços de tração, como mostra a Figura 2.7.

No caso de elementos não reforçados, quando sujeitos a esforços de flexão, a rutura é dada na zona de tração e não apresenta qualquer sinal de esmagamento na zona comprimida. No entanto, ensaios com reforço de GFRP mostram que em 60% das amostras ensaiadas, a rutura teve origem na zona comprimida. Considerou-se rutura por compressão quando o esmagamento ocorria nessa zona em carga máxima. Caso ocorresse para cargas inferiores a rutura era considerada por tração (Gentile et al, 2002).

Segundo, Gentile et al, 2002 o reforço das vigas de madeira com varões de fibra de vidro permitiu aumentar a capacidade resistente à flexão, aumentando 64% da tensão média de rutura por tração. O reforço preveniu o aparecimento de fendas e o modo de rutura passou de frágil em tração para dúctil em compressão.

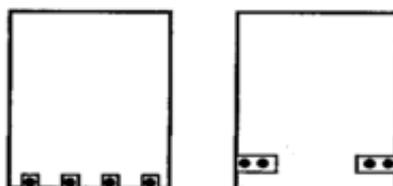


Figura 2.7 – Configuração de reforço com varões CFRP, imagem adaptada de (Gentile et al, 2002)

2.1.2 Reparação de Apoios Deteriorados

A degradação das entregas das vigas de madeira ocorre, regra geral, devido ao elevado teor de água, resultante da entrada de água nas paredes exteriores e coberturas, ficando assim as extremidades das vigas sujeitas a condições suscetíveis a ataques de organismos biológicos (Cruz e Custodio, 2010). Outras consequências de degradação ocorrem quando a estrutura fica sujeita a um aumento de carga resultante da alteração do uso da estrutura ou o incorreto dimensionamento e/ou execução de entrega (Dias A., 2009). Estes danos diminuem a estabilidade e capacidade do elemento estrutural.

Introdução de novos apoios

Esta intervenção consiste em abrir cavidades nas paredes onde são inseridos cachorros de dimensões adequadas de alvenaria, pedra, ou betão armado sob a entrega das vigas, ou de um frechal saliente da parede, que permita realizar o apoio às vigas (Dias A., 2009). Esta técnica é geralmente pouco usada, dado que as paredes dos edifícios na maioria das vezes têm pouca espessura (Costa, 2009). A Figura 2.8 ilustra duas possibilidades deste tipo de intervenção.

Deve ser estudada a resolução prática dos apoios para os novos elementos e ponderar as eventuais consequências das alterações do funcionamento da estrutura original, como por exemplo, a introdução de cargas excêntricas que podem provocar ruturas na parede (Dias A., 2009).

Algumas medidas de segurança na concretização deste método devem ser consideradas, como por exemplo, realizar a intervenção apenas em paredes em bom estado de conservação; executar adequadamente as ligações cachorro/parede, frechal/cachorro e viga/frechal e proteger o frechal contra agentes biológicos e infiltrações se este for de madeira (Costa, 2009).

O aumento da massa estrutural e a alteração da distribuição de esforços na estrutura têm de ser devidamente considerados, dado que são uma desvantagem deste método (Duarte, 2004).

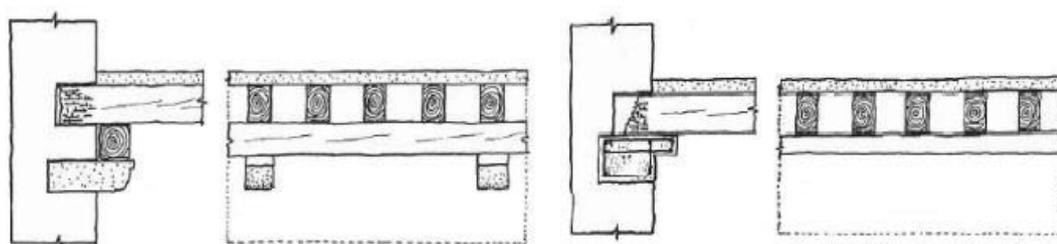


Figura 2.8 – Frechal de madeira apoiada em cachorro de granito (à esquerda) e frechal de betão armado (à direita), (Arriaga, 2002)

Utilização de Cantoneiras Metálicas

Este método é menos intrusivo que o relatado anteriormente, apesar de existir a mesma distribuição de esforço, mas aqui menos acentuada. O procedimento de reparação é rápido e fácil de executar, consiste em aparafusar cantoneiras metálicas sob vigas estruturais por meio de parafusos ou buchas (Costa, 2009), como está apresentado na Figura 2.9. No entanto é necessário efetuar a regularização da parede onde vai ser encostada a cantoneira, e verificar a profundidade a que os parafusos são afixados bem como o seu sistema de fixação. Assim a transmissão de esforços será eficiente, não causando danos na parede.

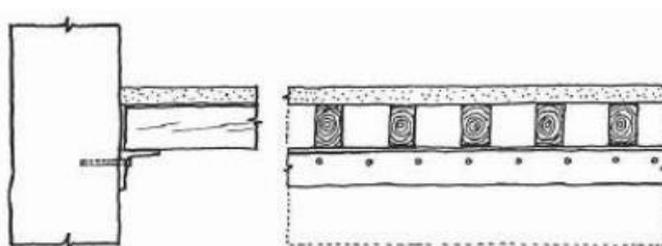


Figura 2.9 – Introdução de cantoneiras metálicas nos apoios nas vigas (Arriaga, 2002)

Reforço do elemento de madeira através da aplicação de novas peças de madeiras ou metálicas nos apoios

A solução consiste em reforçar localmente o elemento degradado através da aplicação de novos elementos de madeira ou metálicos. Fixados por meio de parafusos de porca, pregos, chapas e cintas metálicas em um ou em ambos os lados da viga degradada (Feio A., 2011). Esta técnica tem como objetivo restabelecer a capacidade de carga do elemento enfraquecido. Para existir uma boa transmissão de esforços entre os elementos, é necessário considerar comprimentos mínimos de sobreposição. Os novos elementos devem ser da mesma altura que a viga existente e devem ter largura de pelo menos metade da espessura da viga a reforçar (Appleton, 2011).

As vantagens e desvantagens deste método estão apresentadas no subcapítulo 2.1.1 – (Reforço do elemento de madeira através da aplicação de novas peças de madeira ou metálicas a meio vão), uma vez, que os métodos são iguais. A única diferença é a localização da reabilitação na viga, como mostra a Figura 2.10.

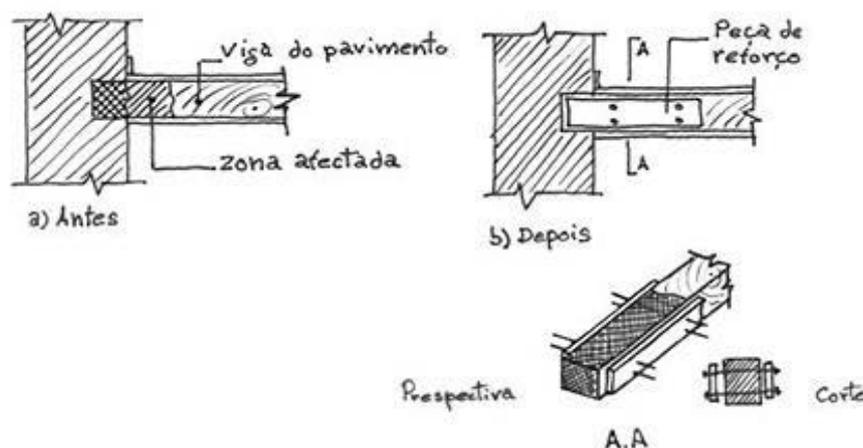


Figura 2.10 - Reforço do elemento de madeira através da aplicação de novas peças de madeiras ou metálicas nos apoios (CM-VISEU)

Substituição do elemento degradado por chapas metálicas

Nesta solução admite-se que os elementos metálicos possuem capacidade resistente para, por si próprios, resistirem a todas as solicitações aplicadas (Duarte, 2004). A ligação entre os elementos metálicos e a madeira são pode ser realizada através de colagem de colas epoxídicas ou através de parafusos, dependendo da configuração da reabilitação.

Podem ser inseridas chapas metálicas nos rasgos previamente abertos nas partes sãs da madeira, ou coladas diretamente nas faces. Para uma melhor reconstituição estética do elemento reparado podem ser ocultadas as chapas através de tacos de madeira ou argamassas epoxídicas. Assim o elemento metálico fica protegido contra a corrosão (Duarte, 2004).

Outro tipo de reabilitação consiste em substituir a parte deteriorada do apoio através de perfis metálicos em forma de U colocados na face superior do elemento de madeira e ligados através de parafusos, como está apresentado na Figura 2.11. Bravo C., 2011 sugere que para um melhor desempenho o elemento metálico deve ter uma melhor qualidade de aço S355 e a possibilidade de se usar uma maior secção de reforço para aumentar a sua capacidade de flexão.

Uma desvantagem deste tipo de reabilitação passa pelo facto de ser necessário retirar o pavimento para colocação das chapas.



Figura 2.11 - Prótese metálica (Bravo C., 2011)

Reconstituição de elementos de madeira deteriorados

Esta solução caracteriza-se pelo preenchimento da zona degradada correspondente à perda de material devido aos ataques biológicos e podridão com resinas ou argamassas epoxídicas.

A ligação entre os dois elementos estabelece-se através da mistura entre a resina e a madeira deteriorada e pode ser reforçada com aço maciço, materiais compósitos colados ou resinas que atravessam a parte sã e reconstituída da madeira (Cruz H., 2000), como está ilustrado na Figura 2.12. A escolha da resina e da argamassa deve ser feita de modo a assegurar um material com resistência e módulo de deformabilidade semelhantes à madeira. Assim, a verificação de dimensionamento é desnecessária, sendo apenas necessário dimensionar os ligadores de aço e

poliéster que segundo Appleton, 2011 devem assegurar uma capacidade resistente de pelo menos 50% das necessidades totais.

Há situações em que a furação não pode ser realizada na face superior das vigas, como é o caso dos pavimentos e das coberturas. Nestas situações deve-se consolidar os elementos usando as superfícies laterais e/ou inferior (Feio A., 2011).

Esta solução apresenta-se bastante favorável do ponto vista estético e económico, compensando assim o elevado custo da resina e mão-de-obra necessária para a sua execução. Segundo, Appleton, 2011 esta solução é muito interessante, sendo bastante eficaz nos casos da resistência a agentes agressivos. No entanto, as maiores reservas prendem-se com a compatibilidade entre materiais e a durabilidade das resinas.

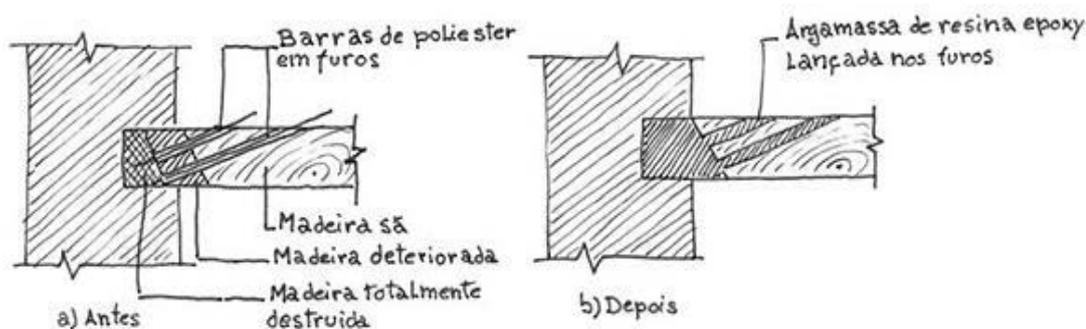


Figura 2.12 - Reforço do elemento de madeira através da introdução de resinas epoxy (CM-VISEU)

Substituição do material deteriorado por uma prótese de madeira com elementos de ligação

Esta solução consiste na substituição da parte deteriorada por uma prótese de madeira com características mecânicas, durabilidade, teor de água e aparência visual semelhantes à viga reforçada (Duarte, 2004). Deve também conter as mesmas dimensões e um tratamento prévio anti fungos, de modo a aumentar a durabilidade do elemento (Cruz e Custodio, 2010).

Os novos elementos são ligados à estrutura existente por meio de elementos metálicos aparafusados nas faces da madeira com ligadores do tipo cavilha e os vazios preenchidos com produtos de colagem epoxídica, conjugados com entalhes (Dias A., 2009), como mostra a Figura 2.13.

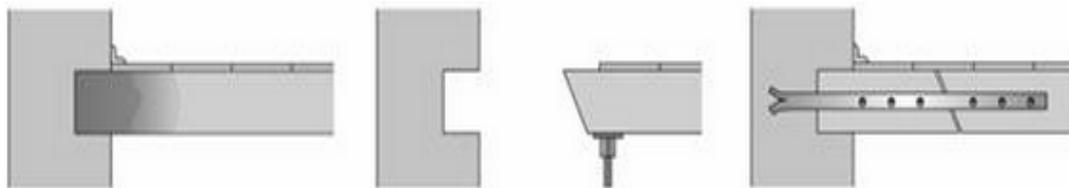


Figura 2.13 - Reparação da viga de madeira por meio de prótese de madeira (Dias A., 2009)

Para uma boa intervenção, a chapa metálica deve ser aplicada nas duas faces da madeira, com um comprimento que assegure uma sobreposição de pelo menos 0,20m em relação ao eixo da peça a ligar, e conter uma altura e espessura suficiente, de forma assegurar a resistência pretendida (Appleton, 2011).

Contudo, os custos elevados, a elevada especialização de mão-de-obra e o impacto visual são uma desvantagem. Para além disso, durante a execução existe a necessidade de se proceder ao escoramento da estrutura para a substituição da parte degradada do elemento por novos materiais, ficando assim a estrutura impossibilitada de se manter em serviço durante a intervenção. Outras desvantagens são a indisponibilidade de peças de madeira para a substituição, a exposição das chapas a altas temperaturas e a possibilidade de condensação da humidade nas chapas.

Substituição do material deteriorado por meio de próteses coladas nos apoios

O objetivo deste tipo de reparação consiste na remoção das partes de madeira com características mecânicas insuficientes e/ou parcialmente deterioradas, conservando as partes sãs que apresentam excelente estado e capacidade de transporte cargas. Nestes casos, quando o apoio da viga apresenta elevada degradação, a reparação deve ser feita o mais rapidamente possível (GERMET, 1987).

Em muitos os casos, a solução mais fácil a adotar seria a substituição integral das vigas por novos elementos, contudo, o interesse da preservação histórica do edifício e razões económicas, tornam esta solução inadequada.

A execução desta solução passa pela substituição do troço de madeira degradado por uma argamassa epoxídica moldada numa cofragem de madeira perdida, ou então, de preferência, pela substituição do troço degradado por uma prótese de madeira ligada por meio de varões, chapas metálicas ou FRP, fixados com colas ou argamassas epoxídicas. Em ambos os casos, a transmissão da carga entre os troços novo e velho é feita por meio de varões, chapas metálicas ou FRP's.

Este tipo de solução tem vantagens quando comparada com os métodos tradicionais, uma vez, que são mais eficazes e menos invasivas. Neste sentido, a intervenção, é restringida às partes degradadas, envolvendo uma substituição mínima de material original, evitando assim a perturbação de uma zona demasiado extensa do edifício, não aumentando o peso e a rigidez da solução estrutural original. Estas vantagens compensam o custo elevado de alguns materiais e a elevada mão-de-obra qualificada (Dias A., 2009).

A reparação pode ser feita através de várias configurações, dependendo do acesso à extremidade das vigas e das condições de trabalho, como ilustra a Figura 2.14.

Na solução da prótese de madeira, devem ser considerados alguns fatores semelhantes à madeira a reparar, como o aspeto, a resistência mecânica, a estabilidade dimensional e a durabilidade natural. A madeira deve ainda ser isenta de defeitos e anomalias e com um teor de água compatível com a colagem, de forma a minimizar as variações dimensionais subsequentes da madeira, não prejudicando assim a aderência entre os dois materiais.

No caso da solução das argamassas epoxídicas em cofragem perdida, estas devem ser formuladas para que o módulo de elasticidade seja semelhante ao da madeira, obtendo-se assim uma melhor compatibilização de deformações (GERMET, 1987).

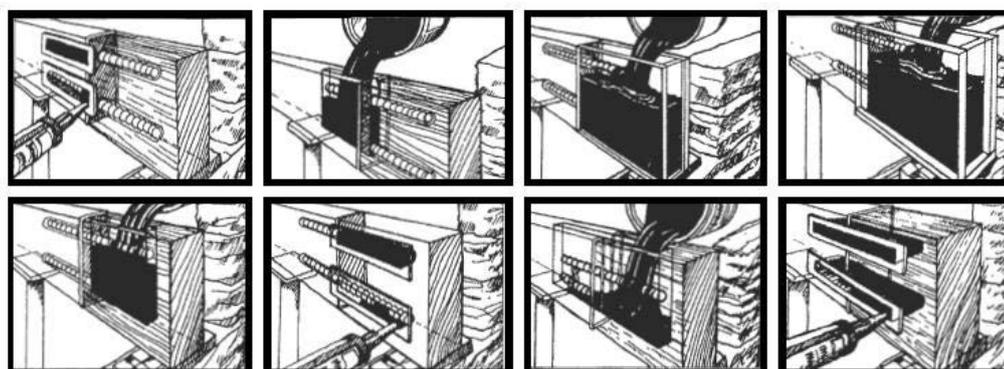


Figura 2.14 - Configurações típicas de reparação por meio de próteses, imagem adaptada de (ROTAFIX)

As resinas epoxídicas tixotrópicas, devido à sua viscosidade e consistência, são utilizadas em situações de preencher grandes volumes e de reparação invertida ou vertical. Enquanto as colas epoxídicas são utilizadas em injeções de fendas, colagem de peças, preenchimento de entalhes ou furos para a fixação dos elementos de ligação de reforço. É ainda utilizado um selante epoxídico, que não tem como função conferir integridade na estrutura à ligação, mas impedir que os produtos de colagem escoem das áreas em que foram aplicados (Dias A., 2009).

Os elementos metálicos de ligação, varões ou chapas devem ser de aço e devidamente protegidos contra a corrosão, sendo os mais comuns o aço inoxidável e o aço galvanizado. Estes aços são comercializados com um tratamento de superfície, de modo a aumentar a sua rugosidade e conseqüentemente a sua adesão. Para além disso, de forma a evitar problemas de adesão são usados aços roscados ou nervurados e chapas texturadas, sendo a resistência nesse caso assegurada quer pela interface colada quer através de ancoragem mecânica.

Outra possibilidade de ligação são os materiais compósitos que devem ser aplicados sempre de modo a que a direção das fibras no compósito fique alinhada com a direção das fibras de madeira, maximizando a rigidez e a resistência à flexão.

2.1.3 Deformações Excessivas

As deformações excessivas nas vigas podem ser um problema resultante de vários fatores, nomeadamente: dos efeitos de fluência, colocação dos elementos em obra com teor de água elevado, presença de defeitos e secção insuficiente dos elementos, podendo acabar em rutura a longo prazo.

A zona mais afetada por esta anomalia é a zona a meio vão devido à existência de esforços de flexão. As deformações ocorrem sempre, mas podem ser mais acentuadas nas vigas sujeitas a variações de intensidade ou aplicação das cargas, ao espaçamento exagerado entre vigas e ao incorreto dimensionamento das secções.

As soluções preventivas que podem ser tomadas para limitar este problema são: a boa secagem da madeira antes da colocação em obra; controlo do teor de água da madeira e das condições de serviço previstas; dimensionar os elementos tendo em conta os Estados Limites de Serviço e o isolamento térmico com outros materiais, impedindo dilatações e contrações excessivas (Costa, 2009). Na situação de deformações elevadas a posição inicial das vigas de pavimentos ou coberturas deve ser restabelecida antes de se proceder aos trabalhos de reparação (José Aguiar, 1997).

Adição de novos elementos estruturais

Recorre-se a este método quando existe necessidade de aumentar a capacidade de suporte dos pisos ou coberturas estruturais. Os pisos e/ou coberturas de madeira são reforçados através da introdução de novas vigas dispostas transversalmente ou paralelamente às existentes e de modo intercalado.

As vantagens desta intervenção são a redistribuição das cargas aplicadas ao pavimento, a diminuição dos esforços instalados nas vigas existentes e, conseqüentemente, a diminuição da deformação. Também são vantagens o aproveitamento dos materiais originais e a reduzida intrusividade deste método (Cóias, 2007).

Como desvantagens temos o aumento da massa estrutural e a compatibilização da deformação entre vigas novas e as existentes, pois mesmo que a secção transversal e a espécie sejam iguais, o módulo de elasticidade pode ser diferente.

Em alternativa pode-se optar por reforçar as vigas através da aplicação de chapas ou perfis metálicos pregados a estas, constituindo vigas mistas. A altura e a espessura das chapas e perfis vai depender da relação entre o módulo de elasticidade da madeira e do aço, de forma a homogeneizar a secção. O coeficiente de homogeneização recomendado é de 20:1 (Appleton, 2011).

Aplicação do pré-esforço exterior

A aplicação do pré-esforço tem como principal objetivo corrigir deformações excessivas, mais do que propriamente aumentar a capacidade de carga do elemento.

Esta técnica consiste em aplicar uma contra flecha ao elemento, ou seja, uma deformação contrária à existente, para que a combinação de ambas posicione o elemento com a deformação desejável, como também contraria todas as ações externas e internas de sentido oposto. Esta técnica está apresentada na Figura 2.15.

O pré-esforço também permite modificar o modo de rutura da viga, aumentando a sua ductilidade, e oferecer um percurso alternativo às tensões de tração, moderando assim a propagação descontrolada das fraturas originadas em pontos fracos dos elementos, por exemplo, nós.

Apesar de ser uma técnica com bastante potencial de aplicação, requer uma verificação estrutural avançada e um controlo de execução rigoroso. O procedimento permite colocar em tensão o sistema de pré-esforço.

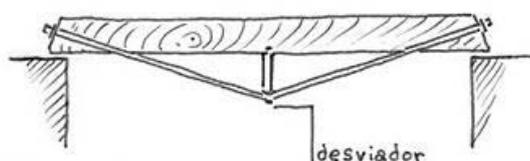


Figura 2.15 - Pré-esforço exterior (CM-VISEU)

Colocação de Escoras de Suporte

Esta solução tem como objetivo reduzir deformações excessivas em vigas ou barrotes, introduzindo uma escora de madeira (da mesma espécie que os elementos estruturais) a meio vão. Em pavimentos de piso térreo, é comum usar-se escoras apoiadas no solo, pelo que devem ser devidamente protegidas da humidade e tratadas contra organismos biológicos. Estas escoras deverão ser dimensionadas de forma a resistir a esforços de compressão, assim como também deverão ser calculados os esforços a atuar na estrutura, dado que a redistribuição de esforços é diferente devido à introdução destes novos elementos.

A ligação da escora com o elemento estrutural é efetuada por meio de nós realizados por assemblagem ou através de pontes de equilíbrio, onde haverá transmissão de esforços entre elementos, como também um impedimento à deformação do elemento estrutural.

Este tipo de intervenção é de fácil execução e económica em casos de deformações excessivas ou em casos de secções insuficientes a cargas atuantes. Contudo, a alteração dos esforços da estrutura e o efeito estético são uma desvantagem (Costa, 2009).

Outra alternativa consiste na introdução de escoras de madeira inclinadas, apoiadas num frechal ou encastradas nas paredes (Arriaga 2002). As escoras são ligadas às vigas existentes por meio de entalhes ou com auxílio de uma peça tipo viga que faz a transmissão das cargas horizontais.

O inconveniente desta solução é o facto de as paredes receberem cargas horizontais e terem de ser dimensionadas para resistir a estas cargas.

2.1.4 Empenamentos e Fendas

As fendas e os empenamentos dos elementos de madeira surgem devido assimetria de cargas, transmissão de esforços entre elementos não previstos no dimensionamento da estrutura e secagem da madeira em obra aplicada com o teor de água diferente do local.

A existência de fendas provoca uma redução de capacidade resistente dos elementos, podendo originar o colapso da estrutura. Outro inconveniente surge na facilidade de ataques de agentes biológicos e infiltração de humidade com consequência da perda de durabilidade da madeira. No caso de existência de fendas em madeira tratada superficialmente, a camada interior não tratada ficará exposta a agentes biológicos, sendo necessário aplicar um tratamento nessa zona.

Existem dois tipos de fendas, as fendas de secagem (fendas) e as fendas mecânicas (fraturas). As fendas de secagem são provocadas pelos elevados esforços de tração transversal originados pelas retrações diferenciais entre o núcleo e a periferia do lenho, uma vez, que as superfícies

externas tem uma perda de água mais rápida que as internas (Franco, 2008), sendo este um fenómeno natural e incontornável. As fendas mecânicas ocorrem quando a capacidade resistente do elemento foi excedida, e aparecem frequentemente na proximidade de defeitos e com um perfil irregular (Dias A., 2009).

Outro aspeto a ter em conta é a existência de fendas repassadas ou profundas, ou seja, fendas que se verificam no mesmo elemento em faces opostas. Estas são particularmente graves quando afetam as ligações, uma vez, que reduzem a capacidade de retenção dos ligadores. Do mesmo modo, deve-se ter especial atenção às fendas contidas em secções com esforço de corte elevado ou tração perpendicular às fibras, como também às que estão associadas a outros defeitos, como por exemplo, nós.

Relativamente aos empenamentos, este surge devido a várias causas como, o fio torcido, o lenho da reação, desigualdades de retração e técnicas de serragem e secagem mal concebidas (Franco, 2008).

Injeção de fendas com Cola Epoxídica

O preenchimento de fendas com colas epoxídicas ou com outras colas adequadas à colagem em obra têm como objetivo restabelecer a continuidade mecânica dos elementos estruturais, evitar a penetração de agentes biológicos no interior da peça de madeira (aumentando a durabilidade), aumentar a resistência ao fogo e prevenir a propagação das fendas nos elementos.

As colas são aplicadas normalmente em elementos de classes de serviço 1 e 2 (Custodio et al, 2011), de forma a evitar condições de elevado risco de delaminação. Esta técnica implica uma cuidadosa seleção de materiais, mão-de-obra especializada e controlo de qualidade (Dias A., 2009). As operações devem ser efetuadas com madeira seca, de modo a que o risco de a cola endurecida vir a atuar como cunha seja limitada. Assim, a fenda não será forçada posteriormente com a secagem e com a retração da madeira. Para além disso a cola não deverá ser excessivamente rígida.

O inconveniente deste método debruça-se na incerteza sobre o comportamento das resinas a altas temperaturas e a longo prazo, como também na alteração da rigidez das ligações e consequentemente da distribuição dos esforços na estrutura (Lopes, 2007).

Sendo esta técnica aplicada apenas a fissuras com menos de 5mm, a cola é conduzida através de tubos introduzidos nas fendas permitindo o seu espalhamento dentro do elemento estrutural, como mostra a Figura 2.16.



Figura 2.16 - Injeção de resina epoxídica nas fissuras do elemento de madeira (Dias A., 2009)

Reparação de fendas com parafusos

Este tipo de reparação aplica-se em fendas de topo ou fendas interiores longitudinais, com recurso a parafusos em espiral ou simples de pequeno diâmetro. A técnica de reparação consiste em efetuar furos na direção perpendicular às fendas, onde são introduzidos os parafusos com a respetivas anilhas apertando as faces das fendas, uma contra a outra, evitando a sua progressão (Akbiyik A., 2007).

A intervenção rápida, simples e eficaz, bem como a moderada intrusividade são as vantagens deste método. No entanto o efeito estético negativo, devido à visibilidade dos parafusos e a necessidade de ajustar os parafusos com alguma regularidade são uma desvantagem.

Reparação de fendas por cintagem de tiras metálicas

Esta técnica baseia-se em fechar fendas de topo ou fendas interiores longitudinais, por meio de tiras metálicas de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão. A fixação das tiras metálicas é efetuada recorrendo a pregos de aço.

A moderada intrusividade, o aproveitamento dos materiais originais, bem como a execução simples e eficaz, são vantagens deste método. No entanto devido à madeira apresentar um comportamento higroscópico, isto é, o seu teor de água e as suas dimensões serem fortemente influenciadas pela humidade do meio ambiente onde se encontra, faz com que este método tenha problemas a longo prazo, tornando-o assim pouco utilizado.

Reparação de fendas com adesivo de epóxidos e varões de reforço

A reparação de fendas é feita pela introdução de resina epoxídica conjuntamente com varões de reforço de aço inoxidável, ou de material compósito reforçado com fibras de vidro ou de poliéster, numa zona sã da madeira, transversalmente à fenda, como está apresentado na Figura 2.17.

Na aplicação do produto é essencial avaliar o teor de água na madeira, dado que este deve ser compatível com a colagem, este valor é indicado pelos fabricantes. Contudo, não deverá ultrapassar um valor mínimo em relação às condições ambientais do local, para que após a intervenção não ocorram variações dimensionais significativas.

Esta técnica aplica-se em fissuras com largura superior a 5mm, os vazios são preenchidos com argamassa epoxídica, no entanto, se a fissura penetrar mais que 30% da seção do elemento, será necessário colocar conectores através da secção, de forma a ligar as faces da fissura (Lopes, 2007).

As vantagens são as mesmas que as soluções anteriores, com a diferença de uma maior garantia de solidarização mecânica em fissuras profundas. O custo de intervenção, e a necessidade de maior especialização de mão-de-obra, em relação às outras intervenções são uma desvantagem.

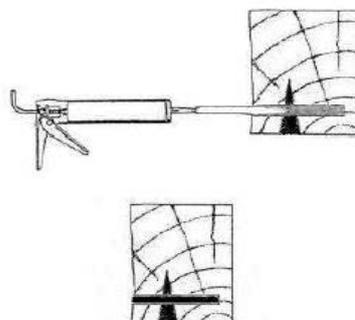


Figura 2.17 – Reparação de fendas com adesivo de epóxido e varões de reforço (Lopes, 2007)

2.1.5 Secção Insuficiente

Trata-se de uma solução típica de reforço em casos de deformações excessiva, ruturas locais na estrutura do pavimento, aumento de cargas na estrutura, redução de secção devido a ataques biológicos ou ação do fogo, como também deficiência do projeto ou na execução em obra.

Reforço das vigas com madeira

De modo a aumentar a secção existente, são adicionados novos elementos de madeira na parte superior ligados através de colas epoxídicas e pela aplicação de pregos, pernos ou parafuso, sendo estes de aço inoxidável, aço galvanizado ou devidamente protegidos contra a corrosão.

O novo elemento a aplicar normalmente tem a mesma largura que o elemento existente por razões estéticas, mas caso a largura seja superior (viga em T), devem ser previstos ligadores de absorção de esforços de corte ao longo de toda a viga. A Figura 2.18 ilustra esses dois tipos de reforço.

Este método tem como vantagem a pouca intrusividade de intervenção, contudo pode haver dificuldades de implantação dos novos elementos devido ao facto de estes conterem deformações e teores de água diferentes aos existentes (Lopes, 2007).



Figura 2.18 – Aplicação do novo elemento com a mesma largura do existente (à esquerda) e com largura superior (à direita), (Arriaga, 2002)

Reforço das vigas com argamassa epoxídica

Uma solução alternativa à anterior consiste em reforçar o elemento de madeira com argamassa epoxídica, como mostra a Figura 2.19. Na ligação entre os dois elementos utilizam-se conectores dispostos ao longo do eixo da viga previamente introduzidos e colados em furos. Os furos devem ser de maior diâmetro relativamente aos ligadores, para que a operação de fixação por colagem seja facilitada.

Para melhorar a ligação entre a madeira e a argamassa epoxídica são realizados na parte superior entalhes paralelepípedos, alinhados segundo o eixo da peça e com espaçamento variável (devido a desenvolvimento dos esforços de corte ao longo da viga), isto é, o espaçamento dos entalhes deve ser menor nas extremidades da viga aumentando em direção ao meio vão (Lopes, 2007).

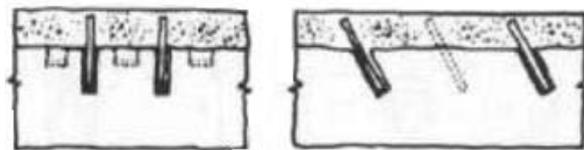


Figura 2.19 – Ligação entre a madeira e a argamassa epoxídica com ligadores e entalhes paralelepípedos (à esquerda) e ligação da madeira com argamassa epoxídica realizada apenas com ligadores (à direita), (Arriaga, 2002)

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Nesta secção descreve-se todo o processo experimental de recuperação de vigas de madeira que apresentavam danos estruturais provocados por ensaios estáticos destrutivos previamente realizados num outro estudo. Caracteriza-se cada elemento, o processo de recuperação e os ensaios realizados. Na reabilitação das vigas utilizaram-se placas de contraplacado de choupo. A ligação contraplacado-viga foi feita através de parafusos de enroscar.

3.2 Vigas de Lamelado-Colado

As três vigas reabilitadas são constituídas por lamelado-colado homogéneo (GL24h) produzido com madeira de casquinha branca. O seu fabrico é feito por sobreposição aleatória de multicamadas, sendo cada camada constituída por tábuas de madeira coladas nos topos (finger joints) e face a face. As suas propriedades mecânicas são favorecidas, pelo facto dos defeitos serem distribuídos de uma forma mais uniforme pelas diferentes secções, não havendo assim concentrações, por exemplo, de nós. Em relação à madeira maciça apresenta: maior estabilidade dimensional dos elementos estruturais, menor variabilidade de propriedades mecânicas e características dimensionais, e resistências superiores (Dias A., 2012).

Estas vigas foram sujeitas a um ensaio destrutivo numa laje mista de madeira-betão, onde o carregamento foi pontual e realizado sobre a laje a meio vão de cada viga. A rutura por flexão verificou-se aproximadamente a meio vão.

As características das vigas e os resultados dos ensaios realizados foram fornecidos por outros investigadores do laboratório e estão apresentados no Quadro 3.1 e Quadro 3.2, respetivamente.

Quadro 3.1 - Características das vigas na situação original

Viga	Massa (kg)	b (mm)	h (mm)	I (mm ⁴)	L (mm)	σ_m (MPa)
1	54,2	120,5	239,8	138532720,4	4212,5	26,0
5	54,5	120,5	240,1	138972089,7	4219,5	26,0
11	56,0	120,6	240,2	139244171,1	4218,0	26,0

Quadro 3.2 – Propriedades dinâmicas e mecânicas das vigas

Viga	<i>Timber Grader MTG</i>	<i>Acelerómetro</i>		<i>Ensaio Estático</i>	
	f (Hz)	f (Hz)	$E_{m,dyn}$ (MPa)	E_{ml} (MPa)	E_{mg} (MPa)
1	595	591	10564	10443	10189
5	566	564	9837	10103	9054
11	-	593	11044	10810	9920

3.3 Contraplacado

Designam-se por contraplacado as placas produzidas por colagem de folhas de madeira ou folhas compostas no mesmo plano umas sobre as outras, dispostas perpendicularmente às camadas subjacentes. As folhas podem ser de várias espécies, resinosas ou folhosas, sendo estas coladas por meio de resinas selecionadas de acordo com a exposição ambiental a que a placa está sujeita. Esses ambientes podem ser interiores ou exteriores e ter teores de água variável ou mais uniformes ao longo do tempo. De forma a garantir a simetria do contraplacado, em relação ao plano médio da folha central, utiliza-se um número ímpar de folhas (LNEC, 2005).

A escolha do contraplacado face à madeira maciça e chapas de aço que são utilizados na maior parte das reabilitações de vigas danificadas a meio vão, apresenta algumas vantagens. Em relação às chapas de aço o contraplacado tem como vantagens, uma boa resistência química à corrosão e enquadra-se melhor esteticamente. Relativamente à madeira maciça o contraplacado apresenta uma maior estabilidade dimensional e é mais homogêneo, ou seja, tem uma anisotropia menor. As propriedades mecânicas na direção das fibras do fio das folhas externas são 1,5 a 3 vezes superiores às que caracterizam a direção perpendicular. Na madeira maciça essa variação pode ser de 10 a 20 vezes. Devido à disposição cruzada das folhas o contraplacado é mais resistente à fissuração, podendo assim ser pregado e/ou aparafusado em zonas mais próximas dos bordos da placa. Oferece, assim, uma maior resistência ao aparecimento e propagação de fissuras (LNEC, 2005).

Para além destas vantagens a escolha deste material deve-se ao facto de que atualmente cada vez se dá maior importância ao custo e à sustentabilidade dos produtos, e este material é caracterizado por isso mesmo, por ser reciclável e barato (Martins, 2010).

O contraplacado usado para a reabilitação das vigas é constituído por madeira de Choupo, Figura 3.1. As suas propriedades foram retiradas de uma página de internet de um comerciante, SOMAPIL – Madeiras do Mundo (SOMAPIL, 2012) e estão apresentada no Quadro 3.3.



Figura 3.1 – Contraplacado de choupo

Quadro 3.3 - Características do contraplacado

b (mm)	h (mm)	ρ (kg/m ³)	σ (MPa)
15	240	490	36

3.4 Dimensionamento da Ligação Contraplacado-Viga

O dimensionamento da ligação contraplacado-viga foi realizado segundo a norma *Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1: General-Common rules and rules for buildings*, (CEN, 2003), que se baseia na teoria de Johansen. Esta teoria determina a capacidade resistente de ligações com ligadores do tipo cavilha (pregos, parafusos, parafusos de porca e cavilhas) com base em equações resultantes de uma análise plástica limite, uma vez que tanto a flexão do ligador como o esmagamento da madeira são plásticos. Assim são admitidos vários modos de rotura e com base neles é determinada a capacidade resistente da ligação que resulta do menor valor obtido, (Dias A., 2012). Os modos de rutura, aplicáveis a esta ligação são apresentados na Figura 3.2 e correspondem cada um deles às equações apresentadas no conjunto de equações na equação 1.

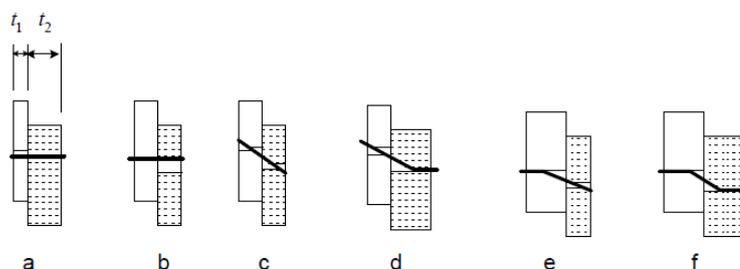


Figura 3.2 - Modos de rotura para uma ligação madeira-madeira (CEN, 2003)

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1} t_1 d \quad (a) \\ f_{h,2} t_2 d \quad (b) \\ \frac{f_{h,1} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,R}}{4} \quad (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,R}}{f_{h,1} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,R}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1} t_1 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,R}}{f_{h,1} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,R}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} [2M_{y,R} f_{h,1} d] + \frac{F_{ax,R}}{4} \quad (f) \end{array} \right. \quad (1)$$

Com $\beta = \frac{f_{h,2}}{f_{h,1}}$

onde $f_{h,1}$ é a resistência ao esmagamento do contraplacado; $f_{h,2}$ é a resistência ao esmagamento da madeira; t_1 é o comprimento de penetração do ligador no contraplacado; t_2 é o comprimento de penetração do ligador na madeira; d é o diâmetro do ligador; $F_{ax,R}$ é a capacidade resistente do ligador ao arranque e o $M_{y,R}$ é o momento de cedência plástica do ligador.

A norma EN 1995-1-1 (CEN, 2003) tem em conta três fatores, que são a massa volúmica da madeira (ρ), o diâmetro do ligador (d) e a necessidade ou não de pré-furação. O diâmetro do ligador, para além de outros fatores, está relacionado com a força a que este está submetido, isto é, este deve ser tanto maior quanto maiores forem as forças atuantes. Por outro lado, quanto menor for o diâmetro do ligador maior será a resistência ao esmagamento. Tendo em conta estes fatores optou-se por escolher um diâmetro de 6mm (roscado em todo o comprimento) apesar da força atuante ser elevada, como se vai ver mais adiante. Com a utilização de um diâmetro inferior pode-se melhorar a resistência ao esmagamento da madeira, e assim ajudar a não danificar ainda mais as vigas no processo de reabilitação. Em relação à pré-furação, quando a força atua no conector, é mais fácil haver separação das fibras no caso de um furo sem pré-furação do que com pré-furação. Este foi um dos motivos pelo qual se considerou a pré-furação como também devido ao contraplacado ser um material denso. Para além disso os parafusos têm um comprimento de 60mm de forma a não ficarem sobrepostos.

Segundo a norma EN 1995-1-1 (CEN, 2003), na cláusula 8.7.1 (5) os parafusos com o diâmetro inferior ou igual a 6mm devem ser dimensionados ao corte segundo a regra dos pregos. Para tal as fórmulas empíricas para a resistência ao esmagamento localizado estão apresentadas na equação 2 e equação 3, e para o momento plástico na equação 4:

$$\text{Contraplacado: } f_{h,1} = 0,11\rho d_{ef}^{-0,3} \quad (2)$$

onde ρ é a massa volúmica do contraplacado e d_{ef} é o diâmetro efetivo do ligador.

$$\text{Madeira: } f_{h,2} = 0,082(1 - 0,01d_{ef})\rho \quad (3)$$

onde ρ é a massa volúmica do elemento de madeira.

$$M_{y,r} = \frac{f_u}{600} 180d_{ef}^{2,6} \quad (4)$$

onde f_u é a tensão de rutura do ligador.

Nestas fórmulas foi considerado um diâmetro efetivo, d_{ef} , igual a 1,1 vezes o diâmetro da raiz da zona roscada, pois segundo a cláusula 8.7.1 (3), deve ser considerado um d_{ef} quando o diâmetro liso da espiga penetra menos de 4 diâmetros no elemento onde está a ponta do parafuso e/ou quando o diâmetro externo da rosca não é igual ao diâmetro liso, o que acontece no caso em estudo, uma vez, que o parafuso é roscado em todo o seu comprimento. Esta consideração deve-se ao facto da resistência lateral de uma ligação aparafusada ser inferior a uma pregada de igual diâmetro, dado a rosca diminuir significativamente o momento plástico da espiga.

No funcionamento ao arranque de um parafuso, a norma EN 1995-1-1 (CEN, 2003) considera a regra dos parafusos, dado que estes possuem uma melhor resistência ao arranque do que um prego de diâmetro equivalente, então o cálculo para a capacidade de resistência ao arranque é determinada pela equações 5:

$$F_{ax,\alpha,R} = n_{ef}(\pi dl_{ef})^{0,8} f_{ax,\alpha} \quad (5)$$

em que n_{ef} é o número efetivo de ligadores; l_{ef} é o comprimento de penetração da rosca na peça que recebe a ponta e $f_{ax,\alpha}$ é a resistência ao arranque a um ângulo α entre o eixo do ligador e o fio.

$$f_{ax,\alpha} = \frac{3,6 \times 10^{-3} \rho^{1,5}}{\sin \alpha^2 + 1,5 \cos \alpha^2} \quad (6)$$

O ângulo α , diz respeito ao ângulo que a força faz com a direção do fio da madeira, logo este é igual a 0, na situação em análise.

Após determinada a capacidade de um ligador é necessário determinar a capacidade resistente de um conjunto de ligadores que tem de ser maior que a força atuante aplicada à viga de madeira. Segundo a norma EN 1995-1-1 (CEN, 2003), a capacidade de uma linha de ligadores paralela ao fio da madeira é dada pela equação 7:

$$F_{v,ef,R} = n_{ef}F_{v,R} \quad (7)$$

em que $F_{v,R}$ é capacidade resistente de um ligador isolado.

Para além disso é necessário calcular as distâncias mínimas de segurança para a utilização destes parafusos, quer entre parafusos, quer entre parafusos e limite exterior do contraplacado. Estas distâncias mínimas permitem um melhor funcionamento da ligação, exigindo assim mais material resistente entre zonas críticas da secção. O aumento destas distâncias mínimas permite obter uma maior ductilidade e um aumento da resistência da secção com vantagem de por vezes se conseguir diminuir o número de ligadores, como é o caso do cálculo do n_{ef} , quanto maior for a distância a_1 mais próximo será o n_{ef} de 1, o que vai levar ao uso de menos ligadores. No entanto para o cálculo do a_2 , $a_{4,c}$ e $a_{4,t}$, utilizou-se uma distância muito próxima da distância mínima exigida pela norma EN 1995-1-1 (CEN, 2003), para não diminuir o valor de d que está representado na Figura 3.3, e assim não aumentar a força atuante sobre os ligadores e consecutivamente o número de ligadores.



Figura 3.3 - Forças aplicadas à viga

Os espaçamentos mínimos exigidos pela norma EN 1995-1-1 (CEN, 2003) estão apresentados na Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Espaçamentos mínimos segundo a norma EN 1995-1-1 (CEN, 2003)

<i>Distâncias mínimas</i>	<i>Com pré-furação</i>
a_1	$(4 + \cos \alpha)d$
a_2	$(3 + \sin \alpha)d$
$a_{3,t}$	$(7 + 5 \cos \alpha)d$
$a_{3,c}$	$7d$
$a_{4,t}$	$(3 + 4 \sin \alpha)d$
$a_{4,c}$	$3d$

A força atuante dos parafusos foi determinada com base na tensão média de rutura da viga, 26MPa. Através dos cálculos efetuados obteve-se um valor de 150kN, o que dava no total 288 parafusos, o que é um número bastante elevado. Posto isso, optou-se por considerar metade dos parafusos, ou seja, considerou-se uma força de 75kN e assim verificar a carga máxima suportada com um número inferior de parafusos, levando a uma solução mais económica e mais rápida de se executar. A redução do número de parafusos e respetivos furos permite não danificar ainda mais a viga.

Assim, atendendo a uma análise visual prévia das fissuras e como base de partida, consideraram-se 3 filas com 12 ligadores por fila em cada face da viga tanto na zona de tração como de compressão. A Figura 3.4 mostra o parafuso utilizado.



Figura 3.4 – Parafuso utilizado

Os resultados intermédios obtidos no cálculo estão apresentados nas tabelas seguintes.

Quadro 3.5 - Capacidade de um ligador

Funcionamento ao corte			Funcionamento ao arranque		t ₁ (mm)	t ₂ (mm)	β
f _{h,1} (N/mm ²)	f _{h,2} (N/mm ²)	M _{y,r} (Nmm)	f _{ax} (N/mm ²)	F _{ax,R} (N)			
34,6	35,3	8477,1	22,9	4494,1	15,0	45,0	1,0
Capacidade de um ligador (N)							
a)	b)	c)	d)	e)	f)		
2280,9	6979,6	3442,4	2438,7	3751,2	2979,1		

Quadro 3.6 - Afastamentos mínimos adotados

Afastamentos mínimos				
a ₁ (mm)	a ₂ (mm)	a _{3c} (mm)	a _{4c} (mm)	a _{4t} (mm)
30	18	42	18	18
Afastamentos adotados				
a ₁ (mm)	a ₂ (mm)	a _{3c} (mm)	a _{4c} (mm)	a _{4t} (mm)
85	20	45	20	20

Quadro 3.7 - Verificação do número de parafusos necessários por fila

n _{ef}	n	F _{v,ef,R} (KN)	F _{ed} (KN)	F _{ed} /6 (KN)
6,0	6,0	13,7	75,1	12,5
F _{ed} /6 < F _{v,ef,r} - Verifica				

3.5 Técnica de Reabilitação Adoptada

De forma a decidir como se deveria dispor os parafusos e o contraplacado nas vigas a reabilitar, analisaram-se primeiro as fissuras de cada viga visualmente. Após a visualização verificou-se que a viga 1 estava bastante danificada, pois para além de se verificarem fissuras na zona de tração também se observavam fissuras na zona de compressão. Outro aspeto foi o facto de as fissuras mais críticas terem alguma excentricidade em relação ao meio vão. Para além disso foi a que apresentou maior deformação antes da aplicação do reforço, com o valor de 47,92mm. As fissuras não tinham comprimentos longitudinais elevados e podem ser observadas na Figura 3.5. A viga 5 não se encontrava tão danificada quando comparada com a viga 1, uma vez, que estava apenas danificada na zona de tração e as fissuras na zona de compressão não eram tão críticas. Para além disso verificou-se que as fissuras mais críticas estavam concentradas junto a um nó, o que é de esperar, visto que, este é um ponto fraco relativamente ao desempenho mecânico da madeira, em particular quando o material fica sujeito a esforços de tração ou flexão. Estas fissuras em termos de comprimento longitudinal não são muito elevados e estão

concentradas no centro da viga. A sua deformação antes da aplicação do reforço era de 28,78mm e as fissuras estão apresentadas na Figura 3.6. Em relação à viga 11, esta era a que se verificava menos danificada quando comparada com a viga 1 e 5. Apenas se verificou uma fissura crítica com comprimento longitudinalmente elevado na zona de tração, outro aspeto que também se verificou foi o facto desta fissura não se encontrar a meio vão da viga, mas sim com alguma excentricidade. A sua deformação antes da aplicação do reforço era de 10,53mm e as fissuras estão apresentadas na Figura 3.7. Os números mencionados para as vigas prendem-se com a numeração que foi dada no estudo realizado anteriormente.

No geral, eram visíveis em todas as vigas outras fissuras longitudinais, mas que não eram visíveis dos dois lados da viga, ou seja, não eram repassadas transversalmente. Por outro lado, as vigas apresentariam outras fissuras que não estariam visíveis, devido a alguma recuperação da posição original da viga.



Figura 3.5 - Fissuras da Viga 1



Figura 3.6 - Fissuras da Viga 5



Figura 3.7 - Fissuras da Viga 11

Como as vigas se encontram bastante danificadas na zona de tração optou-se por deslocar a aplicação dos parafusos das zonas com maior quantidade de fissuras críticas. Assim foi considerado um espaçamento de 20 cm do centro do contraplacado para cada lado no sentido horizontal, e só após essa distância é que se começaram a dispor os parafusos. Assim, o centro do contraplacado ficou alinhado com essas zonas. Outro aspeto que se teve em consideração foi o facto de as fissuras estarem com alguma excentricidade em relação ao meio vão da viga como se mencionou anteriormente. Desta forma, a aplicação do contraplacado foi ajustada a essa excentricidade. As disposições da recuperação de cada viga estão apresentadas na Figura 3.8 e Figura 3.9.

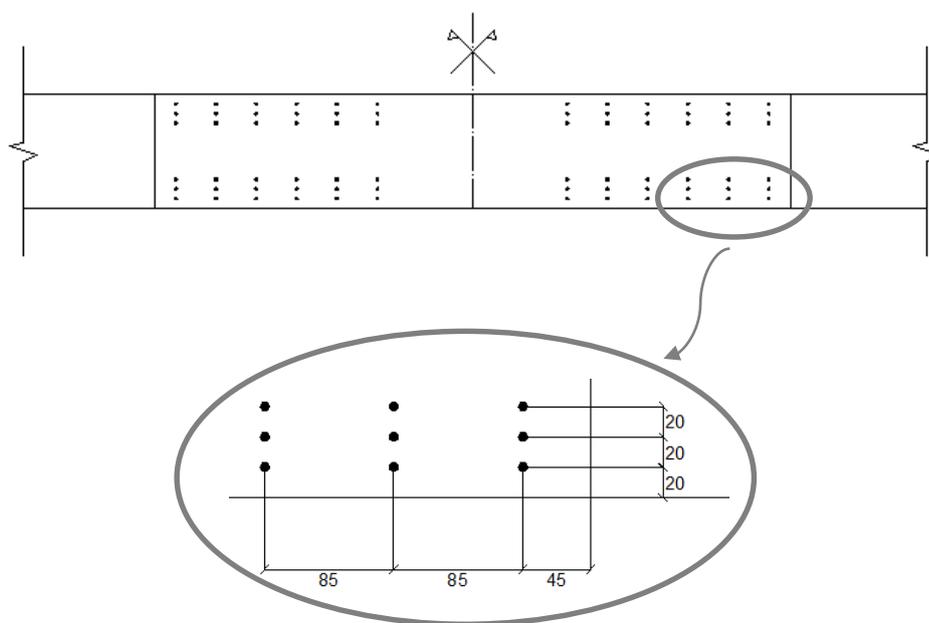


Figura 3.8 - Distância dos parafusos (mm)

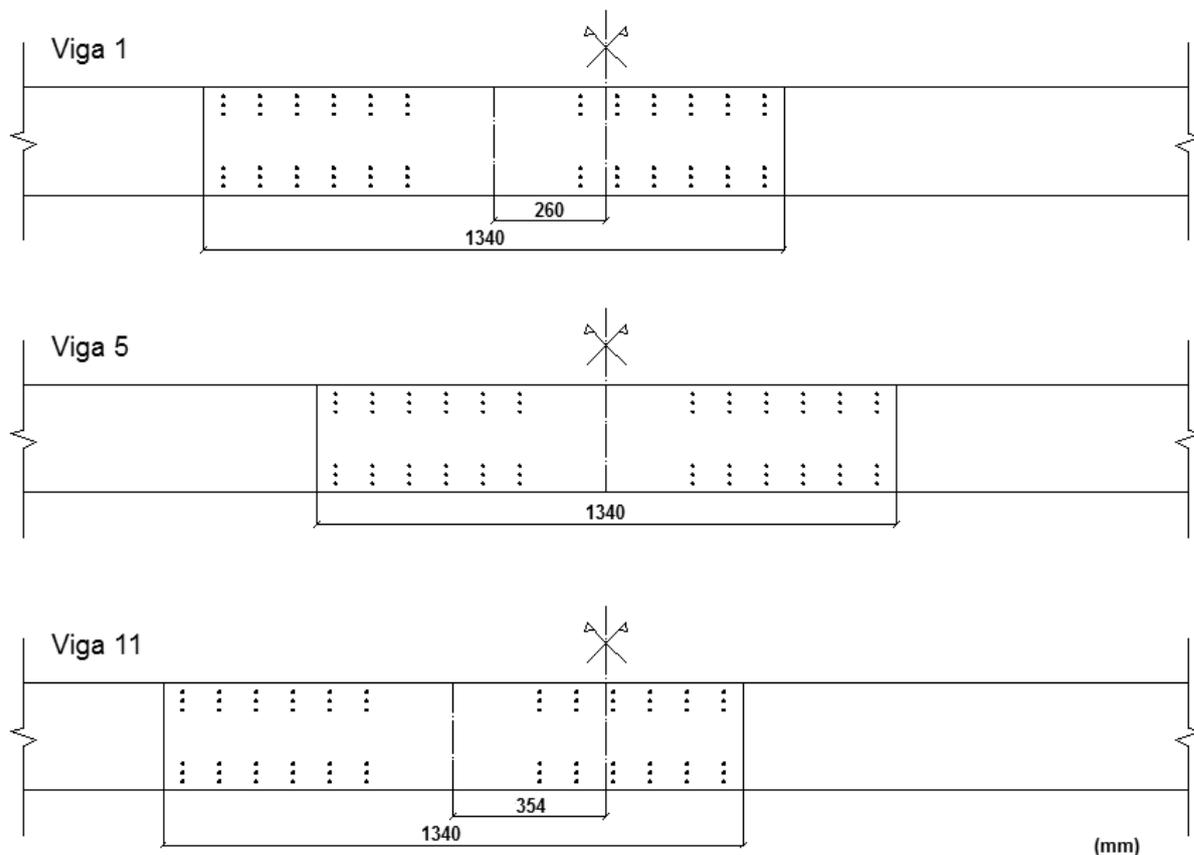


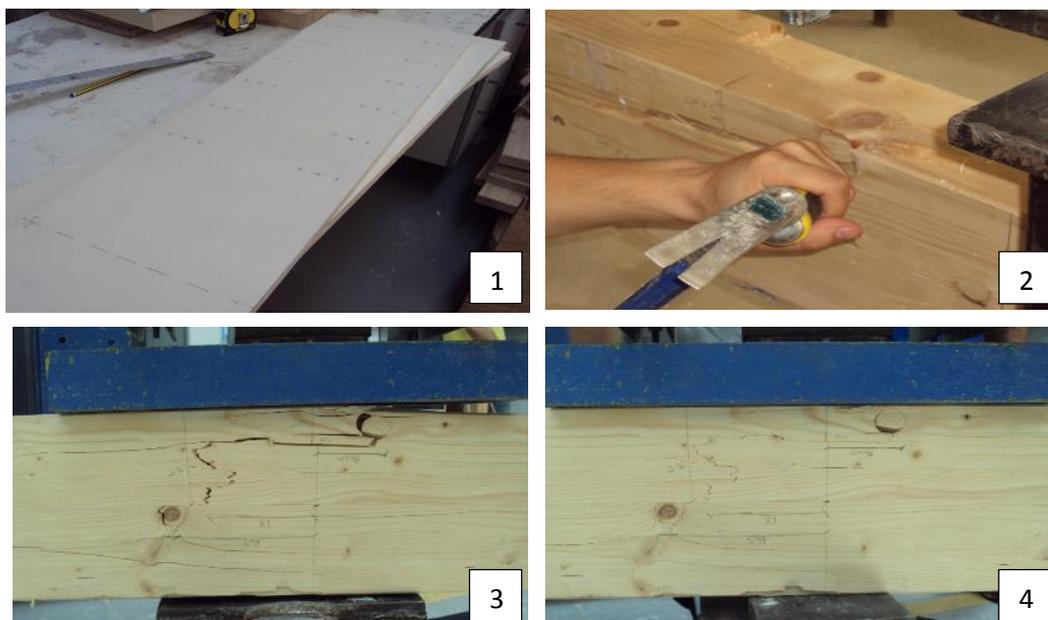
Figura 3.9 – Comprimento longitudinal do contraplacado e excentricidade em relação ao centro da viga (mm)

3.6 Procedimentos de Reabilitação

Neste subcapítulo apresenta-se o procedimento de reabilitação realizado nas vigas no laboratório de investigação. Em primeiro lugar começou-se por marcar os pontos de aplicação dos parafusos e as linhas onde se iria efetuar o corte do contraplacado. De seguida colocou-se a viga sobre os apoios onde se iria realizar o ensaio da norma EN 408 (CEN, 2012), virada ao contrário (zona de tração na face de cima), com o objetivo de ser provocada uma contra-flecha com o atuador hidráulico, para que a viga voltasse a ficar aproximadamente na sua posição original. Também foi necessário limpar algumas fissuras para que quando a viga fosse carregada estas se fechassem facilmente sem sofrerem pressões internas, para desta forma se reduzir ao mínimo o espaço vazio no interior da viga. O carregamento foi transmitido por contacto do atuador em chapas colocadas na zona superior da viga, centradas com as fissuras e assim provocar a contra-flecha. A chapa que se encontrava imediatamente acima da viga tinha

um maior comprimento longitudinal em relação às restantes, pois tinha como função distribuir a força numa área maior e assim juntar o mais possível as superfícies internas criadas pelas fissuras. De forma a garantir que a viga não ultrapassasse o seu estado original foi colocado um apoio na face inferior da mesma para limitar a contra-flecha provocada. Quando se verificou que a viga se encontrava na posição pretendida, parou-se o carregamento, e mantendo-o, começou a aplicar-se o contraplacado nas duas faces laterais, sendo estes fixados com grampos, como mostra a fotografia nº5 da Figura 3.10, para que quando se procede-se ao aparafusamento o material mantivesse a forma pretendida. Devido ao contraplacado ser um material denso, a ligação contraplacado-viga foi realizada com pré-furação, como se referiu anteriormente. Como o tipo de ligadores são parafusos a pré-furação foi realizada com furos de diâmetro igual a 0,7 vezes o diâmetro do parafuso, 4,2mm. Após a realização dos furos, procedeu-se à aplicação dos mesmos, e por fim retirou-se a carga submetida à viga pelo atuador. Os procedimentos de reabilitação estão ilustrados na Figura 3.10.

Este tipo de reabilitação pode fazer-se facilmente em obra, através do escoramento para levar a viga à sua posição original, imobilizar a estrutura durante a reabilitação e mantê-la em serviço. Esta técnica não necessita de remoção de material, o que a torna mais rápida de executar. Para além disso a aplicação de contraplacado com parafusos nas vigas danificadas é um processo fácil e rápido de ser executado. A não necessidade de remoção do pavimento é também um ponto importante, dado que em muitas reabilitações esse procedimento é necessário.



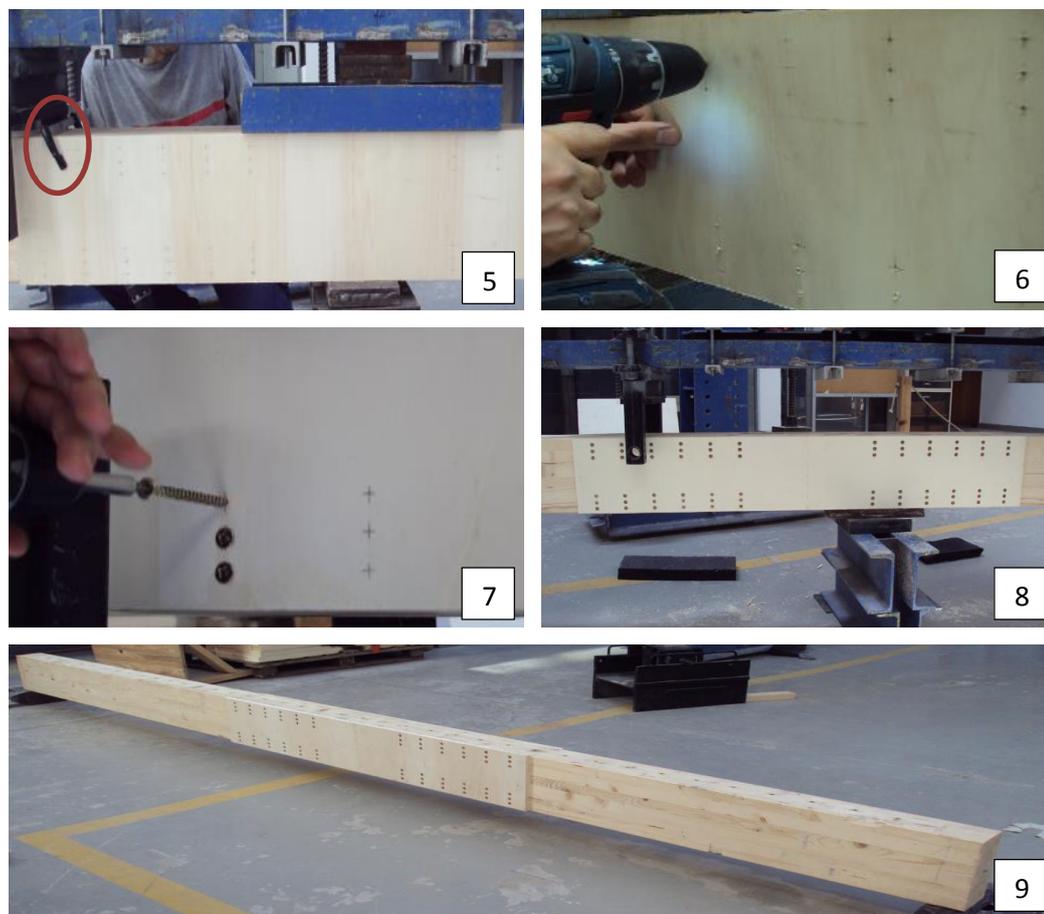


Figura 3.10 -Procedimentos de Reabilitação

3.7 Ensaios

Neste subcapítulo são apresentados os ensaios que foram realizados antes e depois da reabilitação para posteriormente comparar os resultados em ambas as fases do trabalho. Numa primeira fase, ainda quando as vigas não estavam recuperadas foram realizados os ensaios de vibração longitudinal. Numa segunda fase, após a reabilitação das vigas voltaram a serem realizados os ensaios de vibração longitudinal e realizaram-se os ensaios estáticos.

3.7.1 Ensaio Dinâmico: *Timber Grader* MTG

O equipamento comercial *Timber Grader* MTG, representado na Figura 3.11, permite determinar o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal de um elemento de madeira. Este equipamento permite a realização de ensaios dinâmicos de vibração longitudinal de avaliação

não destrutiva. O seu funcionamento consiste na emissão de uma onda de choque (vibração) através do disparo de uma esfera contra a face da secção transversal do elemento, provocando assim uma vibração no elemento, cuja resposta é medida pelo aparelho na mesma face. Na sequência de receção de onda, o equipamento determina e indica a frequência própria de vibração do elemento, bem como o módulo de elasticidade dinâmico que é determinado pelo aparelho através da relação entre o valor da frequência própria de vibração medida e a informação previamente introduzida como as dimensões da peça, a espécie, o teor de água e a massa. Esta operação foi repetida sucessivamente até se obter três leituras iguais, nas vigas antes e após a reabilitação.



Figura 3.11 - *Timber Grader* MTG

Como se referiu anteriormente, para a realização deste ensaio é necessário introduzir no equipamento, diversos dados relativos às vigas testadas. As dimensões e a espécie da madeira já eram conhecidas, no entanto a massa e o teor de água não. Para tal recorreu-se a um humidímetro de agulhas para a medição do teor de água, que consiste na cravação de uma agulha no elemento de madeira na direção perpendicular às fibras, pois pretende-se que a linha de ligação entre a agulha cruze as fibras, uma vez, que é segundo essa direção que ocorrem as menores variações do teor de água. Este procedimento foi realizado para diversos pontos do elemento. Para a medição da massa recorreu-se a uma balança na qual se pesaram as vigas. Estes procedimentos foram realizados antes e depois da reabilitação.



Figura 3.12 - Humidímetro de agulhas (à esquerda) (Bernardo, 2015) e balança (à direita)

3.7.2 Ensaio Dinâmico: Acelerómetro

O ensaio realizado com o acelerómetro caracteriza-se por ser um ensaio não destrutivo do tipo dinâmico. Este ensaio consiste em provocar uma vibração longitudinal, induzida no topo do elemento através de um impacto provocado por um martelo. No topo oposto está fixado um acelerómetro que tem como função medir a resposta dinâmica produzida pelo impacto. Esse acelerómetro está ligado a um módulo de aquisição de dados de alta precisão, modelo *National Instrument USB-4431*, que por sua vez está conectado a um computador. A resposta dinâmica obtida é então tratada no computador no programa *software LabView Signal Express*, que fornece a frequência própria de vibração da peça ensaiada. A Figura 3.13 ilustra o esquema necessário para a realização deste ensaio.



Figura 3.13 - Medição da frequência própria de vibração através do acelerómetro

Devido ao ensaio apenas permitir a determinação da frequência própria de vibração, foi necessário calcular o módulo de elasticidade dinâmico correspondente. Para tal, recorreu-se à equação 8, desenvolvida por Vries, 2006:

$$E_{m,dym} = 4l^2 f^2 \rho \quad (8)$$

em que l é o comprimento do elemento, f é a frequência própria de vibração e ρ é a massa volúmica.

3.7.3 Ensaio Estático: Determinação do Módulo de Elasticidade em Flexão

O módulo de elasticidade estático das vigas é determinado recorrendo a ensaios não-destrutivos de acordo com a norma europeia EN 408 (CEN, 2012). Esta norma estabelece dois métodos

para o cálculo do módulo de elasticidade, o módulo de elasticidade local e o módulo de elasticidade global.

Para a determinação destes parâmetros, a norma EN408 (CEN, 2012) estabelece que a peça a ensaiar deve ser simplesmente apoiada, carregada simetricamente em flexão em dois pontos num vão igual a dezoito vezes a altura da secção (h), sendo esta distância possível de ser alterada de um valor não superior a três vezes a altura da secção da peça sem prejudicar o ensaio, como demonstra a Figura 3.14 e Figura 3.15.

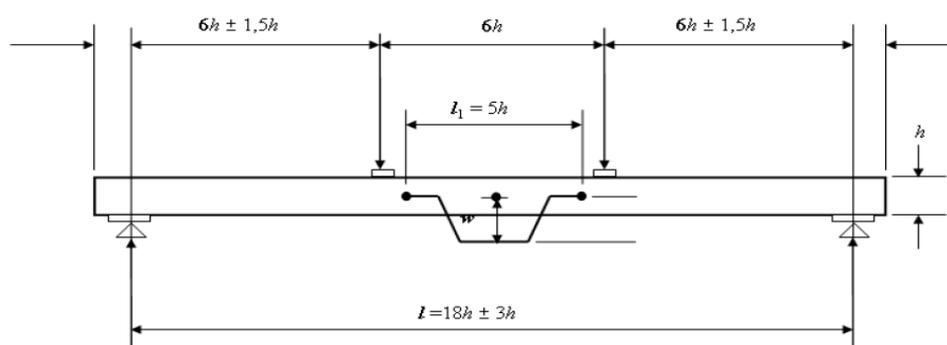


Figura 3.14 - Esquema de ensaio para determinar $E_{m,local}$, de acordo com a EN 408, (CEN, 2012)

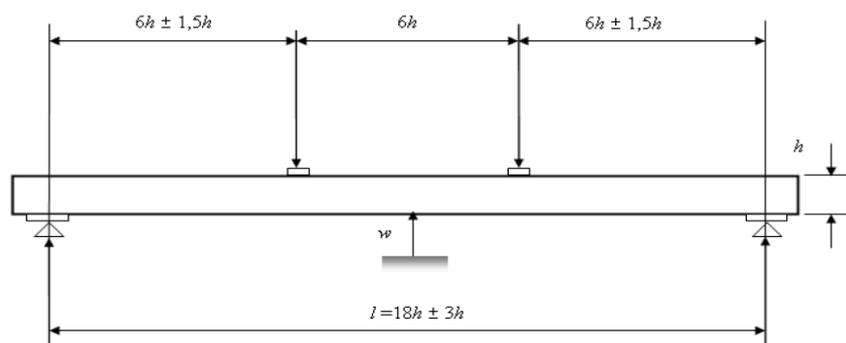


Figura 3.15 - Esquema de ensaio para determinar $E_{m,global}$, de acordo com a EN 408, (CEN, 2012)

Nos ensaios realizados aplicaram-se as duas forças pontuais simétricas a uma distância de $5,33h$ entre os pontos de aplicação dessa mesma força e os apoios. A taxa de movimento de cabeça de carga foi de $0,003h$ (mm/s). A carga máxima aplicada não deve ser superior a 40% da força

máxima estimada de modo a não danificar a peça e mantê-la em regime elástico. A norma EN408 (CEN, 2012) refere que o valor da largura (b) do elemento deve ser igual a este se a secção transversal for constante, caso contrário, deve ser considerada a menor dimensão. Logo, não se consideraram as alterações das dimensões das vigas devido à aplicação do contraplacado para o cálculo dos módulos de elasticidade.

As cargas pontuais foram transmitidas à estrutura através de uma chapa e um cilindro cortado ao meio, com secção em meia-lua. O material usado é aço, como mostra a Figura 3.16. A chapa lisa tem como função garantir que a carga seja transmitida a toda a largura do elemento estrutural, bem como servir de apoio à meia-lua para que não ocorra esmagamento na madeira. A peça em meia-lua garante liberdade de rotação.



Figura 3.16 – Chapas auxiliares para a aplicação das forças à viga

Nestes ensaios são ainda medidos os deslocamentos (w), recorrendo ao uso de defletómetros. Esses defletómetros foram aplicados em 3 pontos do eixo neutro em ambas as faces laterais das vigas para o cálculo do $E_{m,local}$, como mostra a Figura 3.14. Para o cálculo do $E_{m,global}$, foi colocado um defletómetro na face inferior da viga a meio vão, como mostra a Figura 3.15. A Figura 3.17 mostra a aplicação dos defletómetros na viga reabilitada.



Figura 3.17 – Defletómetros

O cálculo dos parâmetros $E_{m,local}$ e $E_{m,global}$, foi realizado através da equação 9 e equação 10, respetivamente, transcritas da norma EN 408 (CEN, 2012):

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (9)$$

em que a é a distância entre a cabeça de carga e o apoio mais próximo; l_1 é distância entre defletómetros; I é a inércia da secção em relação ao eixo de flexão e $\frac{(F_2 - F_1)}{(w_2 - w_1)}$ é o declive correspondente ao intervalo de comportamento elástico no gráfico F-força/w-deformação.

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (10)$$

em que l é o comprimento do elemento; b é a espessura do elemento; h é a altura do elemento e G é o módulo de distorção.

3.7.4 Ensaio Estático: Determinação da Resistência à Flexão do Elemento Estrutural

O módulo de rotura (f_m – Resistência à flexão) é uma propriedade que se determina através de ensaios destrutivos de acordo com a norma EN 408 (CEN, 2012). Este ensaio tem o mesmo esquema que o utilizado para determinar o módulo de elasticidade descrito no subcapítulo anterior, mas com a diferença de que não se medem as deformações, uma vez, que o ensaio é realizado até a viga atingir a rutura e assim determinar a força resistente desta. O esquema de ensaio é apresentado na Figura 3.18.

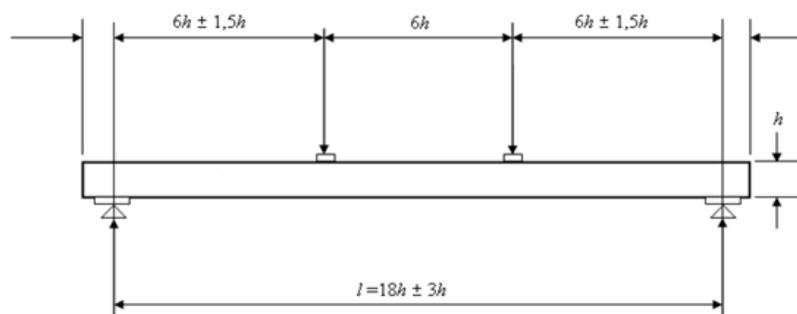


Figura 3.18 - Esquema de ensaio para determinar f_m , de acordo com a EN 408, (CEN, 2012)

No entanto, optou-se pela introdução de defletómetros no mesmo local que nos ensaios estáticos do módulo de elasticidade, bem como a introdução de dois defletómetros, um em cada lado da viga a $\frac{1}{4}$ de vão até uma determinada carga que se julgou ser segura para a integridade dos equipamentos, como mostra a Figura 3.19.

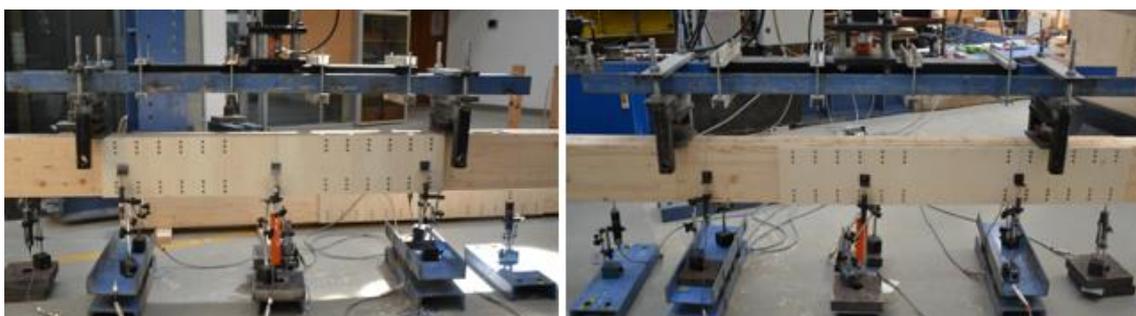


Figura 3.19 - Defletómetros nas vigas 5 (à esquerda) e viga 11 (à direita)

Esta opção tem interesse por ser expetável que a viga apresente deflexões excêntricas relativamente ao centro de massa da viga. A colocação dos defletómetros a $\frac{1}{4}$ de vão permite verificar o comportamento excêntrico do elemento estrutural. A posição do contraplacado difere nas três vigas, ou seja, o contraplacado na viga 5 encontra-se exatamente na zona de momento máximo enquanto nas restantes o mesmo não acontece. Devido a isto interessava perceber com maior rigor a variação de deslocamentos, porque podem ser diferentes em pontos simetricamente opostos da mesma viga, assim como esses comportamentos variarem de viga para viga.

Após ser atingida determinada carga, para a qual os deslocamentos já são elevados ou quando se ouvia algum ruído/sinal da viga, retiravam-se todos os defletómetros e o ensaio prosseguia até à rutura das vigas. A carga deve ser aplicada a um movimento constante de modo a que a carga máxima seja atingida no período de 300 ± 120 s. O cálculo para a determinação da tensão de rutura foi realizado segundo a equação 11, transcrita da norma E N408 (CEN, 2012).

$$f_m(MPa) = \frac{3F_a}{bh^2} \quad (11)$$

onde F_a é a força máxima aplicada pelas cabeças de carga.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados gráficos de frequências, de módulos de elasticidade e de curvas carga-deslocamento resultantes dos ensaios realizados antes e após a reabilitação de cada uma das vigas. Esses resultados serão posteriormente comparados com os já obtidos por outros investigadores do laboratório com as vigas originais. A comparação e a análise desses resultados teve como principal objetivo, avaliar a viabilidade da solução apresentada no capítulo anterior.

4.2 Comparação dos Ensaio Dinâmicos

O Quadro 4.1 apresenta os resultados fornecidos por outros investigadores do laboratório como também os resultados obtidos para as propriedades mecânicas e físicas das três vigas em estudo. Os resultados apresentados dizem respeito aos ensaios dinâmicos.

Quadro 4.1 - Frequências e módulos de elasticidade resultantes dos ensaios dinâmicos

Viga	Configuração	Dimensões			Massa (kg)	W (%)	MTG		Acelerómetro	
		L (mm)	h (mm)	b (mm)			f (Hz)	E (N/mm ²)	f (Hz)	E (N/mm ²)
1	Original	4212,5	239,8	120,5	54,2	-	595	-	591	11010
	Danificada			120,5	52,0	11,5	483	-	506	7764
	Reabilitada			130,1	57,4	11,5	590	10836	588	10706
5	Original	4219,5	240,1	120,5	54,5	-	566	-	564	10107
	Danificada			120,5	53,0	12,0	547	8621	540	9022
	Reabilitada			130,1	58,5	12,0	581	10726	575	10456
11	Original	4218,0	240,2	120,6	56,0	-	-	-	593	11453
	Danificada			120,6	54,0	12,1	571	9567	563	9959
	Reabilitada			130,1	59,5	12,1	610	12039	605	11766

Através da observação do Quadro 4.1 verifica-se que, a massa das vigas danificadas é menor quando comparada com a massa das vigas na sua configuração original. Para o presente trabalho não foi possível obter a informação relativa os teores de água medidos nas vigas originais, pelo que as diferenças de massa registadas se podem dever a variações no teor de água. Para além disso, durante os ensaios destrutivos realizados nas vigas enquanto parte constituinte da laje mista madeira-betão podem ter ocorrido perdas de madeira, bem como durante o processo de desmantelamento da laje após os ensaios.

Analisando o Quadro 4.1 verifica-se que a massa é significativamente maior nas vigas na sua configuração reabilitada em relação à danificada, devido à aplicação de novos elementos à viga, nomeadamente, o contraplacado e os parafusos.

Em relação aos dados obtidos através do *Timber Grader* MTG, pode observar-se que tanto nas vigas originais como nas reabilitadas, relativamente às degradadas, a frequência de vibração medida é superior. A frequência está relacionada com o módulo de elasticidade, isto é, quanto maior for a frequência, maior será o módulo de elasticidade. Neste sentido, pode-se verificar que a reabilitação melhora os valores em termos de frequências, o que quer dizer, que após a reabilitação as propriedades mecânicas do elemento reabilitado são melhores do que as da viga degradada em termos de módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade determinado pelo *Timber Grader* MTG não se encontrava nos dados fornecidos pelos investigadores quando a viga se encontrava na sua configuração original. No entanto o módulo de elasticidade foi determinado nas vigas danificadas e posteriormente nas reabilitadas. Através do Quadro 4.1 pode-se observar que os módulos de elasticidade nas vigas reabilitadas apresentam melhores valores em relação às vigas danificadas, o que vem confirmar o que foi referido atrás. Note-se que o valor do módulo de elasticidade na viga 1 na configuração danificada não é apresentado, pois o aparelho não o conseguiu medir.

Nos dados obtidos pelo acelerómetro, para as frequências, verificou-se o mesmo que no *Timber Grader* MTG. Em relação ao módulo de elasticidade verificou-se que as vigas na sua configuração original apresentam valores superiores em relação às vigas degradadas, o que é de esperar já que as degradadas têm uma menor rigidez. O módulo de elasticidade obtido nas vigas reabilitadas não se pode comparar diretamente com as originais, uma vez que, a determinação deste parâmetro depende da massa volúmica da peça. Para o seu cálculo, considerou-se apenas a massa volúmica do GL24h e não do GL24h em conjunto com o contraplacado e os parafusos.

Para melhor compreensão dos valores obtidos das frequências apresentam-se os gráficos de magnitude-frequências realizados antes e depois da reabilitação das vigas através do acelerómetro.

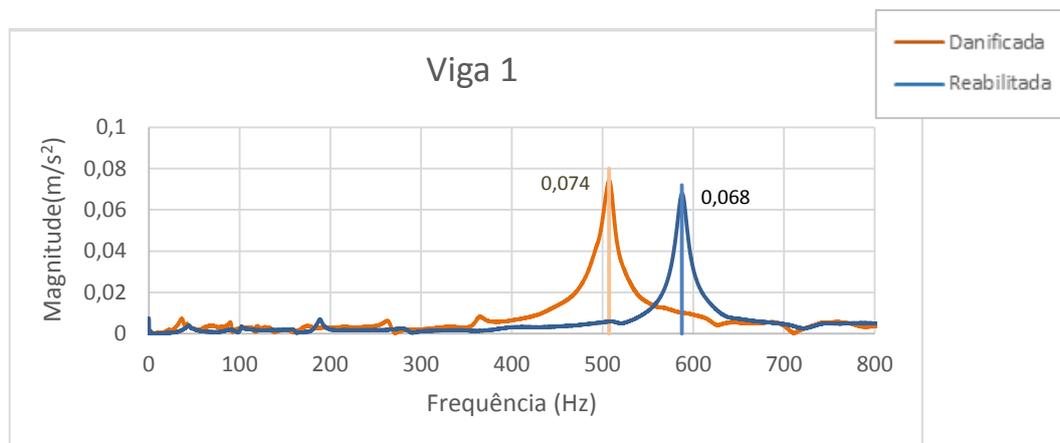


Figura 4.1 - Gráficos das frequências da viga 1 danificada e reabilitada.

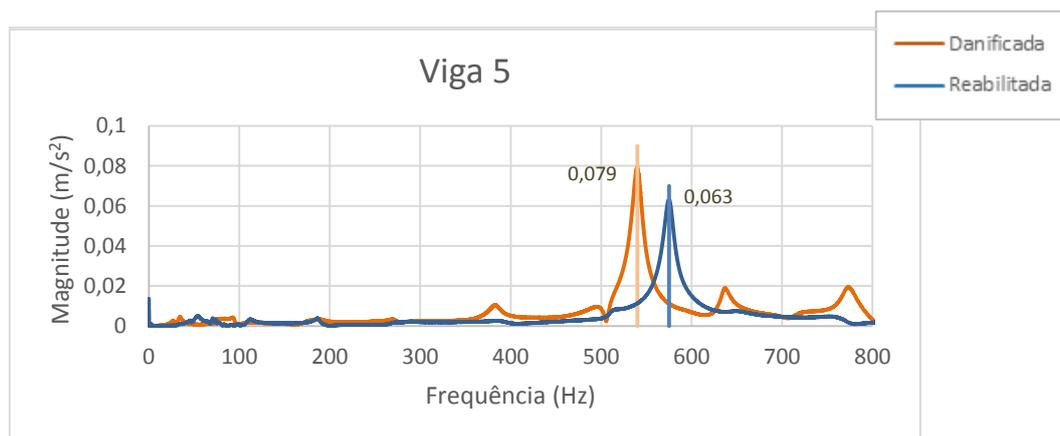


Figura 4.2 - Gráficos das frequências da viga 5 danificada e reabilitada.

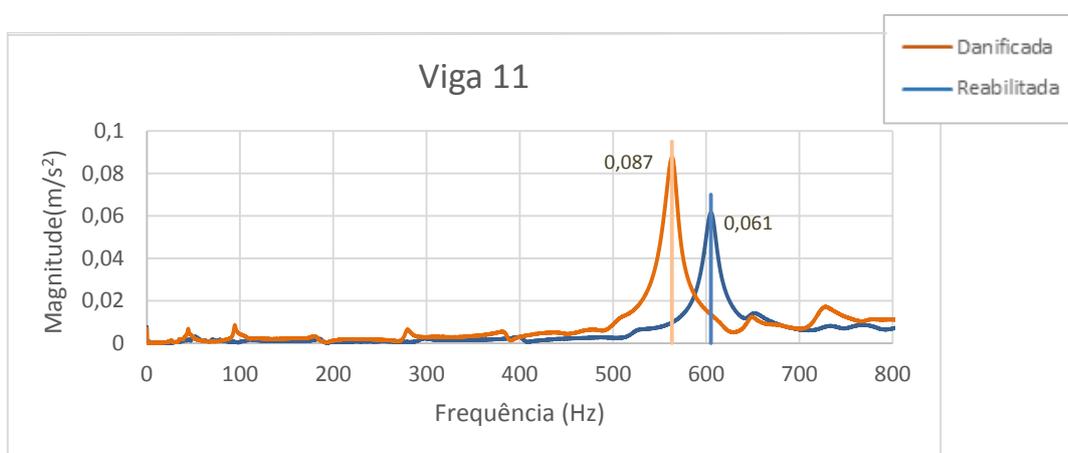


Figura 4.3 - Gráficos das frequências da viga 11 danificada e reabilitada.

A coluna relativa às frequências obtidas através do acelerómetro no Quadro 4.1 mostra um aumento da frequência correspondente à magnitude máxima para as vigas rehabilitadas. Os resultados apresentados foram retirados dos gráficos das Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3 onde se constata o aumento da frequência correspondente aos picos de maior magnitude. Outro aspeto observado é o facto de a magnitude máxima nas vigas degradadas ser maior relativamente às vigas restauradas, isto deve-se, à intensidade do impacto provocado pelo martelo no elemento estrutural, e não com a reabilitação efectuada. Estes aumentos de frequência confirmam o aumento medido através do ensaio *Timber Grader* MTG o que corresponde a um aumento do módulo de elasticidade para as vigas rehabilitadas.

4.3 Comparação dos Resultados do Ensaio Estático não Destrutivo

Os resultados apresentados nesta secção dizem respeito aos ensaios estáticos não destrutivos realizados no laboratório segundo a norma EN 408 (CEN, 2012). São apresentados em forma de gráfico com a relação entre a força e o deslocamento local e/ou global. De forma a permitir uma melhor comparação, os resultados nas vigas com a configuração original e após a reabilitação foram sobrepostos no mesmo gráfico.

Este ensaio foi realizado para uma força máxima estimada, $F_{m\acute{a}x,est}=10,3kN$, carga estimada a 40%, para o modo de rutura condicionado pelos parafusos e a uma velocidade 7,2mm/s. As Figura 4.4, Figura 4.5, Figura 4.6, apresentam os gráficos entre a força e o deslocamento para a viga 1, 5 e 11, respetivamente.

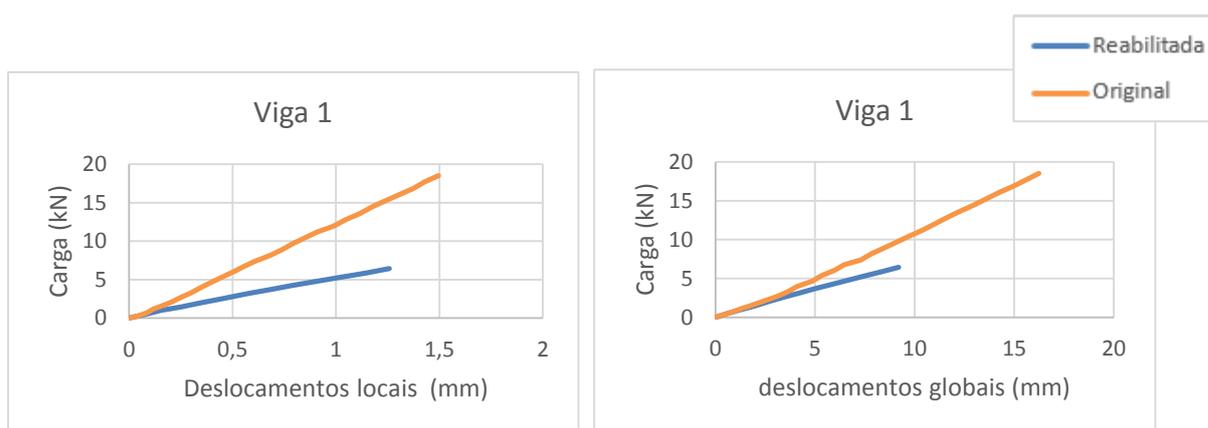


Figura 4.4 - Gráfico dos deslocamentos locais e globais da viga 1, respetivamente

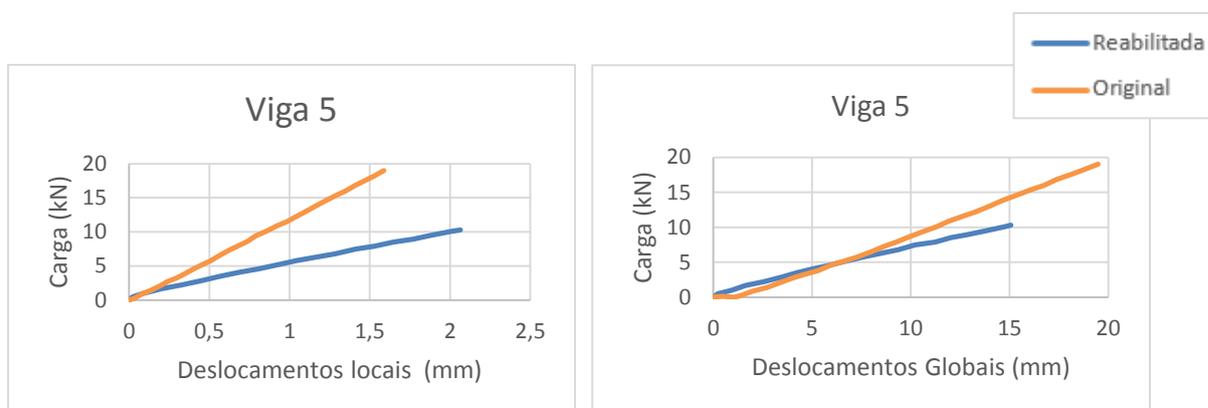


Figura 4.5 - Gráficos dos deslocamentos locais e globais da viga 5, respetivamente

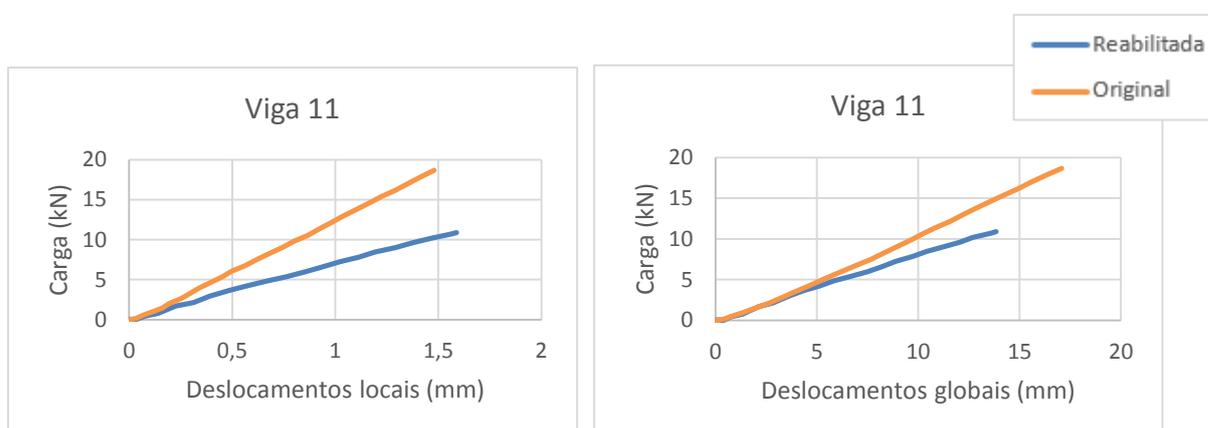


Figura 4.6 - Gráficos dos deslocamentos locais e globais da viga 11, respetivamente

Observando a Figura 4.4, Figura 4.5, Figura 4.6, verifica-se uma relação aproximadamente linear (comportamento elástico) entre a força aplicada e os deslocamentos. Também se pode observar que a reabilitação não foi capaz de restaurar completamente a rigidez do elemento, pois tanto os deslocamentos globais como os locais sofreram um acréscimo significativo para a mesma carga. Observa-se, por isso, entre a viga original e a estrutura reabilitada e para deslocamentos semelhantes, uma redução significativa da força aplicada. Outro aspeto observado consiste no facto de os deslocamentos globais das vigas reabilitadas se aproximarem dos valores da viga no seu estado original para a mesma carga aplicada.

Apresenta-se o Quadro 4.2 com o resumo dos dados dos gráficos apresentados acima, para melhor compreensão.

Quadro 4.2 – Quadro Resumo: Força e deslocamentos locais e globais máximos obtidos

Viga	Força (kN)		$E_{m,local}$ Deslocamentos máx. (mm)		$E_{m,global}$ Deslocamentos máx. (mm)	
	Original	Reabilitada	Original	Reabilitada	Original	Reabilitada
1	18,5	6,4	1,5	1,3	16,2	9,2
5	19,6	10,3	1,6	2,1	19,5	15,1
11	18,7	10,9	1,5	1,6	17,1	13,8

Como se pode observar no Quadro 4.2, a força máxima aplicada na viga 11 foi de 10,9kN, o que é superior a 40% da força máxima estimada indicada pela EN 408 (CEN, 2012). No entanto, não é de esperar dano por se ter excedido esse valor, uma vez, que a relação força-deslocamento apresenta-se linear, ou seja, o ensaio manteve-se na zona de comportamento elástico, como mostra a Figura 4.6.

As Figura 4.7 e Figura 4.8 apresentam os módulos de elasticidade locais e globais, respetivamente.

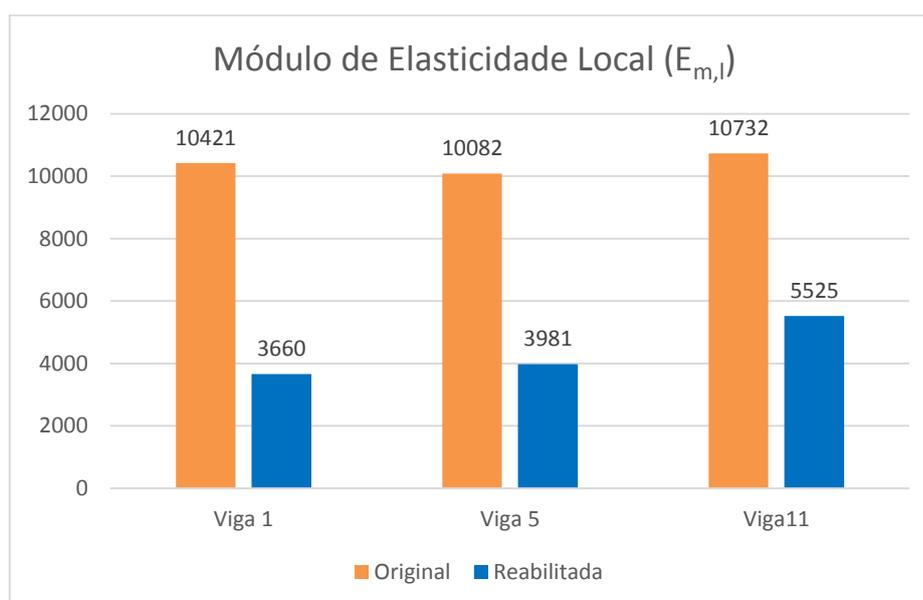


Figura 4.7 - Módulo de Elasticidade Local

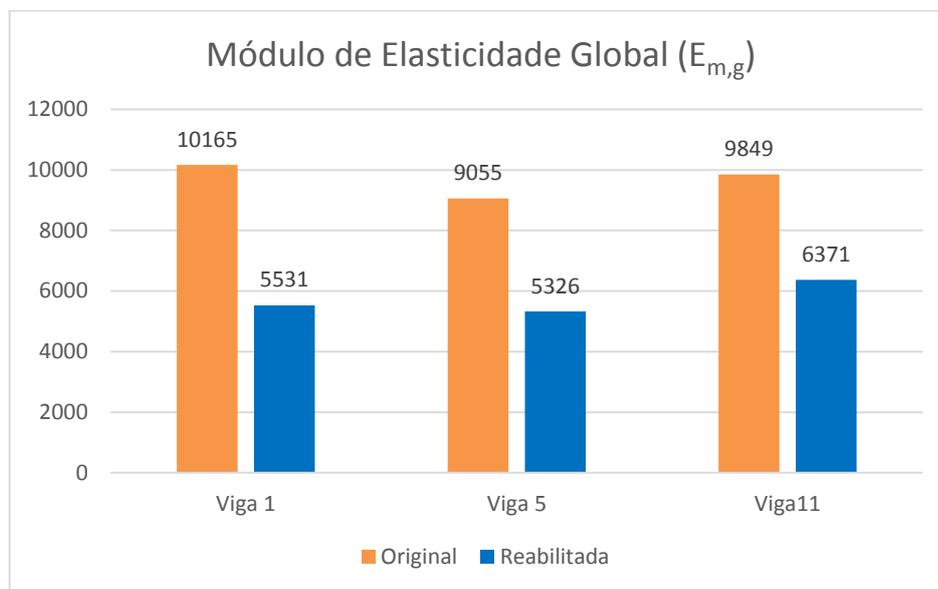


Figura 4.8 - Módulo de elasticidade Global

Observando as Figura 4.7 e Figura 4.8 verifica-se que o módulo de elasticidade local das vigas na sua configuração original é ligeiramente superior ao módulo de elasticidade global. Provavelmente devido ao facto de o módulo de elasticidade global ter em consideração a totalidade da peça, o que faz com que os valores sejam afetados pelos defeitos que estão distribuídos ao longo da viga. O módulo de elasticidade local tem apenas em consideração a zona central da peça, fazendo com que o número de defeitos existentes que afetam este parâmetro seja consideravelmente inferior, aumentando assim ligeiramente os valores.

Nas vigas reabilitadas o mesmo já não se verifica, pois o módulo de elasticidade local é inferior ao global. Provavelmente devido ao facto de a viga estar debilitada com os defeitos e fissuras concentrados na zona central da mesma. Como o módulo de elasticidade local apenas considera medições na zona central, apesar da reabilitação, está afetado por esses defeitos e fissuras. O módulo de elasticidade global, como já se referiu considera a totalidade da peça, logo apresenta melhores resultados. Os gráficos apresentados nas Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6, apresentam menores variações entre os módulos de elasticidade globais, comparadas com as variações observadas para os deslocamentos locais.

Sabendo-se que as vigas recuperaram alguma rigidez à flexão, essa melhoria não foi significativa ao ponto de apresentar valores semelhantes aos das vigas originais. Para além disso, tal como se verificou no subcapítulo anterior a viga que apresentou maior rigidez foi a viga 11.

Comparando a rigidez da viga 11 na sua configuração original e reabilitada, esta recuperou 51% em termos de $E_{m,l}$ e 65% para $E_{m,g}$. No caso da viga 5, esta recuperou a rigidez em 39% para o $E_{m,l}$ e 59% para o $E_{m,g}$, enquanto que a viga 1 obteve valores de 35% e 54%, respetivamente. Em termos de módulo de elasticidade global, embora a viga 5 tenha apresentado valores inferiores relativamente à viga 1, esta teve uma maior recuperação comparativamente à sua configuração original.

É de notar que, o comportamento mecânico difere em termos de rigidez à flexão de viga para viga. Isto é devido ao tipo de danos que cada viga apresenta. Como se referiu no capítulo anterior, a viga que aparentemente se apresentava menos danificada era a viga 11. As vigas 1 e 5 apresentavam fissuras na zona de tração e na zona de compressão, acima do eixo neutro. Esta observação indiciava que estas vigas se apresentavam mais debilitadas do que a viga 11.

O módulo de elasticidade apresenta um valor médio de 4389 MPa para o elemento estrutural, enquanto para a viga original apresenta um valor médio de 10412MPa. Para o caso do módulo de elasticidade global médio o elemento estrutural apresenta um valor de 5743MPa e para a viga original é de 9690 MPa. Em termos de valores médios de recuperação do módulo de elasticidade local para as três vigas foi aproximadamente 42% enquanto para o módulo de elasticidade global foi aproximadamente 59%.

4.4 Resistência à Flexão

Os resultados apresentados nesta secção têm como objetivo analisar a eficácia da reabilitação nos elementos estruturais até estes atingirem a rutura.

O ensaio foi preconizado segundo a norma EN 408 (CEN, 2012). Esta norma diz que a velocidade de rutura deve ser 1/300 do valor da carga de rutura estimada. Inicialmente considerou-se que a rutura seria por plastificação dos parafusos, em que a carga estimada era de 25,7kN sendo a velocidade aproximadamente 0,086kN/s. Apesar da carga de rutura estimada ser menor para o contraplacado em que o seu valor era de 16,2kN, optou-se por considerar inicialmente a carga dos parafusos devido às propriedades do contraplacado terem sido retiradas de uma página de internet de um comerciante de contraplacado. No entanto, ao ensaiar a viga 5 verificou-se que a duração do ensaio foi menor que a descrita na norma referida acima, isto é, menor que 180 segundos. Para além disso a rutura da viga ocorreu devido à rutura do contraplacado, como se verá mais adiante. Neste sentido achou-se por bem usar uma velocidade de rutura menor que corresponderia assim à $F_{máx,est}=16,2kN$. Assim, a velocidade de rutura utilizada para as restantes vigas foi aproximadamente 0,05kN/s.

A Figura 4.9 apresenta a relação entre a força aplicada e o deslocamento a meio vão das três vigas estudadas. Sobrepueram-se no diagrama o traçado destas, o que permite uma melhor comparação, uma vez, que foram rehabilitadas da mesma forma, com o mesmo material e obtiveram resultados diferentes. Estes valores foram obtidos através do defletómetro posicionado a meio vão até determinada carga como se referiu na secção 3.7.4 do capítulo anterior.

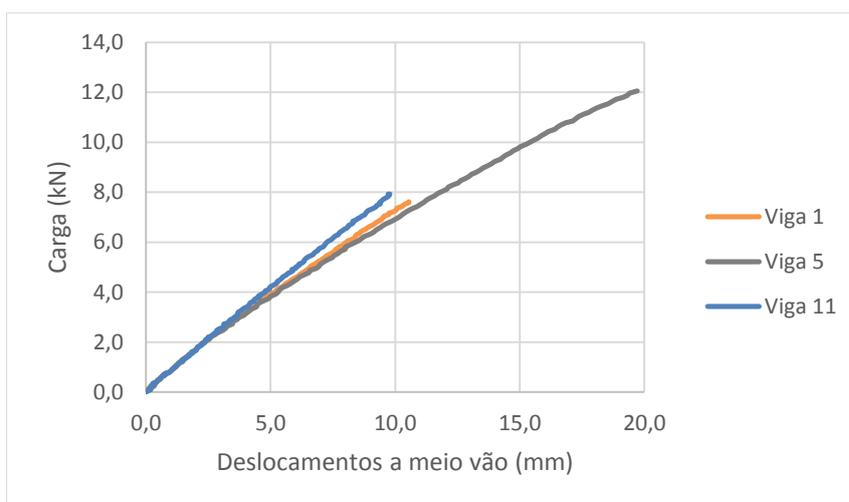


Figura 4.9 - Relação entre a força e o deslocamento a meio vão

Dado que o primeiro ensaio foi realizado para uma velocidade de rutura maior, a viga 5 apresentou maiores cargas aplicadas e maiores deslocamentos obtidos em relação às restantes vigas, como mostra a Figura 4.9. Além disso a máquina de ensaio parou quando o contraplacado atingiu a rutura, pois foi considerado um patamar de segurança no atuador, com o propósito de quando se verificasse uma perda de carga de 5% a máquina de ensaio parava. Nesta situação, retomou-se o ensaio até atingir completamente a rutura. Em relação à viga 1 e 11, verifica-se que estas apresentam valores aproximados até uma determinada carga, no entanto a viga 11 apresentar melhores resultados.

No gráfico verifica-se a existência de uma ligeira curvatura, no entanto, pode afirmar-se que a relação entre as cargas aplicadas e os deslocamentos medidos a relação é aproximadamente linear.

As Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12, apresentam os deslocamentos a $\frac{1}{4}$ de vão da viga 1, 5 e 11, respetivamente. Estes gráficos são apresentados de forma, a verificar se a posição do contraplacado e/ou das fissuras têm influência nas deflexões excêntricas relativamente ao centro de massa da viga.

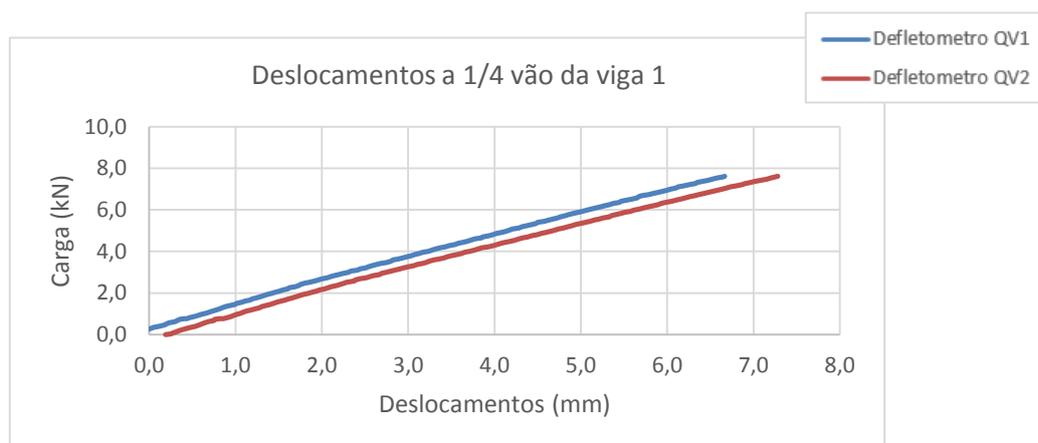


Figura 4.10 - Relação entre a força e o deslocamento a 1/4 de vão da viga 1

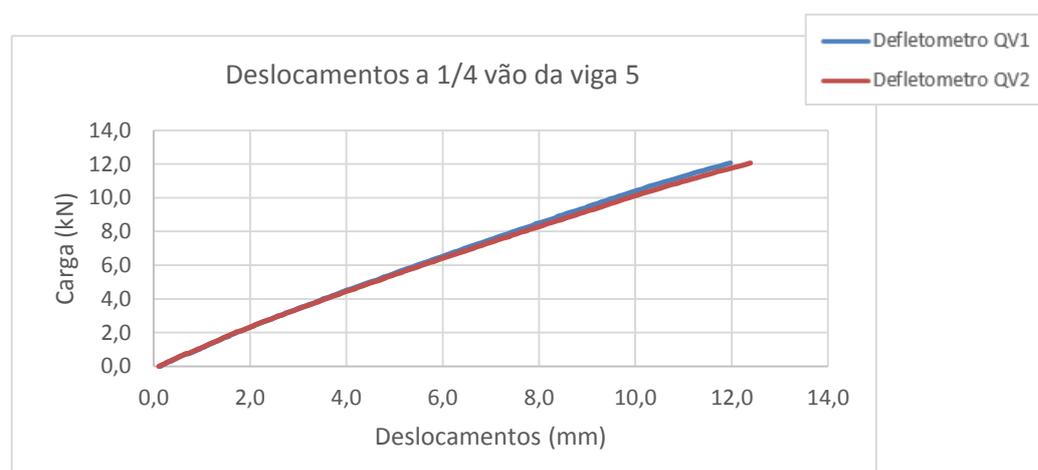


Figura 4.11 - Relação entre a força e o deslocamento a 1/4 de vão da viga 5



Figura 4.12 - Relação entre a força e o deslocamento a 1/4 de vão da viga 11

Observando os gráficos verifica-se que na viga 5 os deslocamentos dos pontos simetricamente opostos são praticamente iguais, talvez devido à reabilitação se apresentar centrada na viga. Nas vigas 1 e 11 o mesmo já não se verifica, uma vez, que a reabilitação está descentrada com o centro da viga. A viga 11 apresenta menor discrepância entre os dois pontos simetricamente opostos quando comparamos com a viga 1, o que se pode dever, como se já se referiu anteriormente, a uma reabilitação mais eficiente.

Como se pode observar na Figura 4.10 o defletómetro QV1 da viga 1 apresenta menores deslocamentos, possivelmente devido à reabilitação descentrada estar no lado do defletómetro QV1. No entanto, na viga 11 não se verifica o mesmo, como mostra a Figura 4.12. Isto pode ser devido às fissuras se encontrarem em pontos diferentes das vigas. Por exemplo, na viga 1 as fissuras não se encontravam tão descentradas quanto as fissuras da viga 11. Já no caso da viga 11 esta apresentava uma fissura muito acentuada que progredia para o lado de QV1 e condicionaria estruturalmente, de forma mais drástica, essa zona levando a maiores deslocamentos. A aplicação do contraplacado permitirá reduzir os deslocamentos na zona onde está aplicado, conferindo maior rigidez a essa parte da estrutura comparativamente à viga degradada, no entanto, os deslocamentos medidos são condicionados pelos danos específicos verificados em cada viga.

A Figura 4.13 apresenta a tensão máxima de rutura de cada viga determinada de acordo com a equação (11).

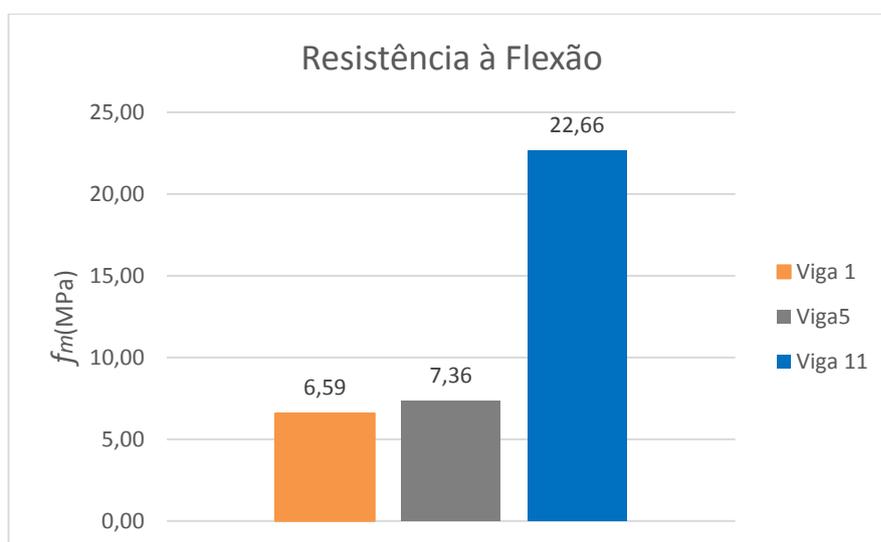


Figura 4.13 - Tensão máxima de rutura das vigas após reabilitação

As três vigas apresentaram comportamentos mecânicos diferentes em termos de resistência à flexão. Cada um dos elementos estruturais reabilitados reage ao ensaio de acordo com a recuperação efetuada, mas também em função dos danos apresentados antes desta. Portanto, os resultados são distintos entre os três elementos, embora semelhantes, em termos de tensão de rutura, entre os elementos 1 e 5. Através do gráfico verifica-se que a viga 1 conseguiu recuperar 25% da sua capacidade de carga, a viga 5 recuperou 28% e a viga 11 conseguiu recuperar 87%. A tensão média de rutura das vigas originais à flexão é de 26MPa, nas reabilitadas é de aproximadamente 12MPa, correspondente a cerca de 46%, o que demonstra que a reabilitação não conseguiu recuperar muito em termos de resistência à flexão.

A reabilitação da viga 11 recuperou significativamente a sua resistência à flexão, possivelmente devido a esta se encontrar menos danificada quando comparada com as outras vigas. A viga 11, apenas apresentava exteriormente visível uma fissura crítica com comprimento longitudinal elevado na zona de tração, enquanto as outras duas apresentavam fissuras críticas na zona de tração e compressão.

4.5 Processo de Rutura

Neste subcapítulo apresenta-se o modo de rutura das 3 vigas. Através das figuras observa-se que em todas as vigas a rutura se iniciou no contraplacado, pela rutura em bloco no alinhamento vertical dos parafusos. Este fenómeno pode ter ocorrido devido ao espaçamento entre os parafusos, apesar de este ser superior ao mínimo indicado pela norma EN 1995-1-1 (CEN, 2003). A rutura do contraplacado deu-se sempre na primeira ou segunda fila de parafusos a contar do centro. A zona central do contraplacado era a que estava sujeita a um maior esforço de tração, pelo que seria de esperar que tal acontecesse. Apesar de se ter efetuado pré-furação, as zonas correspondentes aos alinhamentos verticais dos furos, passaram a ser mais suscetíveis relativamente ao esforço de tração transmitido através do contraplacado. Houve efetivamente uma redução da área provocando, por isso, um aumento localizado da tensão.

Outro aspeto que terá contribuído para o início da rutura antecipada do contraplacado terá sido o fato de no corte das placas de contraplacado estas terem ficado com 3 das 5 camadas (2 exteriores e outra ao centro) com as fibras alinhadas perpendicularmente à direção do esforço de tração. Neste sentido não se aproveitou ao máximo a resistência deste material.

Verificou-se, durante os ensaios, que após o início da rutura do contraplacado o processo de cedência do elemento estrutural era imediato. Ou seja, as fissuras que surgiam no contraplacado propagavam-se de baixo para cima através do alinhamento vertical dos parafusos e o elemento estrutural colapsava imediatamente a seguir.

A Figura 4.14, Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.17 ilustram o modo como se deu o processo de rutura dos elementos estruturais.



Figura 4.14 - Rutura da Viga 1



Figura 4.15 - Rutura por bloco dos parafusos da Viga 5



Figura 4.16 - Rutura da Viga 5



Figura 4.17 - Rutura da Viga 11

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Este trabalho tinha como objetivo a reabilitação de três vigas de lamelado colado com origem em madeira de casquinha branca, GL24h. A reabilitação consistiu na aplicação de contraplacado de madeira de choupou nas duas faces laterais das vigas. A fixação foi efetuada através de aparafusamento com pré-furação e com parafusos de aço. O posicionamento do contraplacado, a distribuição e o modo de aplicação dos parafusos foi determinada por critérios expostos no trabalho.

Apesar de existirem outras opções para a reabilitação, como exposto anteriormente, foi escolhido este método, sem utilização simultânea de outros. O objetivo do trabalho era avaliar este método isoladamente, tendo em conta a simplicidade de execução e ser uma solução económica.

Estas vigas apresentavam-se danificadas, porque tinham sido previamente sujeitas a ensaios destrutivos. Estes ensaios prévios consistiram no carregamento pontual a meio vão, através de uma laje mista de madeira e betão, levando as vigas à rutura. Estes ensaios provocaram nas vigas, danos completamente distintos e heterogêneos.

Durante o trabalho foram seguidas as normas EN 1995-1-1 (CEN, 2003) e EN 408 (CEN, 2012).

Para comparar os resultados da reabilitação das vigas realizaram-se diversos ensaios. Os ensaios dinâmicos não destrutivos consistiram na utilização do *Timber Grader* MTG e do acelerómetro, antes e depois da reabilitação. Os ensaios estáticos não destrutivos foram efetuados com recurso a defletómetros nas vigas reabilitadas. Estes ensaios permitiram a determinação do módulo de elasticidade. Por fim realizaram-se os ensaios estáticos destrutivos através do carregamento dos elementos estruturais para determinação da resistência à flexão.

Relativamente aos ensaios dinâmicos estes apresentaram uma maior frequência e conseqüentemente um maior módulo de elasticidade dinâmico nas vigas reabilitadas, comparativamente com as vigas danificadas. Nos ensaios estáticos verificou-se que as vigas recuperaram alguma rigidez à flexão. No entanto, as vigas 1 e 5 apresentaram apenas uma recuperação de $E_{m,l}$ por volta dos 35/40% e $E_{m,g}$ de 55/60%. A viga 11 foi a que obteve melhores

resultados, recuperando 51% e 65% de $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$, respetivamente. A maior diminuição do $E_{m,l}$ relativamente ao $E_{m,g}$ justifica-se, como referido acima, pelo facto de os danos estarem concentrados na zona central das vigas rehabilitadas. O módulo de elasticidade global, considera a totalidade da peça, logo apresenta melhores resultados.

Através dos resultados obtidos dos ensaios estáticos destrutivos verificou-se que as vigas rehabilitadas apresentaram tensões de rutura inferiores à original. As vigas 1 e 5 apresentaram valores bastantes baixos em termos de resistência à flexão, porém a viga 11 apresentou muito melhores resultados. As vigas 1 e 5 apresentaram uma recuperação de aproximadamente 30% enquanto a viga 11 apresentou uma recuperação de 87%. Nas vigas 1 e 5 a reabilitação não foi tão eficiente devido à degradação que estas apresentavam. Encontravam-se com uma concentração de fissuras a meio vão que se distribuíam quer pela zona sujeita a esforço de tração, quer pela zona sujeita a esforço de compressão da viga. A viga 11 estava visivelmente menos danificada e, deste modo, foi a que melhores resultados apresentou tanto em termos de módulos de elasticidade como de resistência à flexão, sendo o aumento da resistência à flexão bastante significativo.

Apesar dos resultados dos ensaios dinâmicos indicarem uma reabilitação eficiente, os resultados obtidos nos ensaios estáticos mostraram que este tipo de reabilitação é pouco eficiente, quando as vigas se apresentam muito danificadas e com uma concentração de fissuras localizada. Por outro lado, conseguem-se melhores resultados para vigas cujos danos ou fissuras estejam distribuídas apenas pela zona sujeita a esforço de tração.

Esta reabilitação foi condicionada pelas propriedades mecânicas do contraplacado e também pela distribuição dos parafusos de fixação, porque, como se verificou no decorrer do ensaio destrutivo, a cedência do elemento estrutural iniciou-se no contraplacado. É evidente que o facto de os parafusos serem o elemento de transferência de carga da viga para o contraplacado, leva a uma concentração de tensões através dos mesmos e numa zona do contraplacado que se encontra fragilizada pelos furos.

Deve referir-se que esta reabilitação não inclui qualquer ação que leve a uma recuperação das propriedades mecânicas das vigas por si só, como, por exemplo, a injeção de resinas epoxídicas para ligar as superfícies internas estruturalmente separadas pelas fissuras.

5.2 Trabalhos Futuros

Para dar sequência a este trabalho de reabilitação propõe-se para futuros projetos algumas sugestões.

Este processo de reabilitação deve ser consolidado através de um trabalho em que se ensaie um maior número de vigas de forma a tornar mais fiáveis os valores médios de recuperação das propriedades mecânicas dos elementos estruturais.

Os parafusos podem ser aplicados com diferentes distribuições e com ângulos distintos. Por outro lado, o seu número pode ser alterado de forma a otimizar o seu desempenho, visto que neste processo de reabilitação são os parafusos que transmitem ao contraplacado as cargas.

O desempenho do contraplacado na reabilitação é determinante, pelo que devem ser testados outros tipos de contraplacados. Estes contraplacados podem ser testados utilizando diferentes espessuras e aproveitando também o processo de corte de forma a otimizar o seu desempenho.

Em substituição do contraplacado pode utilizar-se um material idêntico ao de origem da viga de madeira lamelada colada que poderá trazer vantagens não só a nível estético como ao nível da redução da influência da pressão de aperto dos parafusos.

Como evolução deste trabalho podem ser introduzidos outros materiais e técnicas no processo de reabilitação.

A colagem do contraplacado à viga pode trazer vantagens ao processo, levando até a uma diminuição do número de parafusos e mantendo o contraplacado livre de furos nas zonas mais solicitadas.

Para recuperar as propriedades mecânicas das vigas pode adicionalmente fazer-se uso de colas ou resinas de forma a ligar internamente as superfícies das fissuras e assim melhorar o comportamento mecânico do elemento estrutural.

Adicionalmente podem aplicar-se parafusos verticalmente através da face inferior das vigas (de baixo para cima) melhorando assim também as suas propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akbiyik A., L. A., Hale W. (2007). "Feasibility investigation of the shear repair of timber stringers with horizontal splits." *Construction and Building Materials*,(21), 991–1000.

Alam, P., Ansell, M. P. e Smedley, D. (2009). "Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements." *Composites Part B-Engineering*, 40,(2), 95-106.

Appleton, J. (2011). "Reabilitação de Edifícios Antigos - Patologias e Tecnologias de Intervenção".

Arriaga, F. (2002). "Intervencion en estructuras de madera,".AITIM, Madrid.

Bernardo, F. (2015). "Uso de Ensaio Dinâmicos na Avaliação de Pavimentos de Madeira". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Bravo C., A. F., González G., Maldonado L. (2011). "Prótesis metálicas para la reparación de cabezas de vigas de madera degradadas." *Informes de la Construcción*, Vol. 63,(521), 37-45.

CEN (2003). "Eurocode 5 - Design of timber structures. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings". EN 1995-1-1. Comité Européen de Normalization.

CEN (2012). "Timber Structures - Determination of Characteristic Values of Mechanical Properties and Density.". EN 408. Comité Européen de Normalization.

CM-VISEU@. "<http://cm-viseu.pt/guiareabcentrohistorico/capitulo9/index.php?pag=32>". Camara Municipal de Viseu, Viseu. 2015.

Cóias, V. (2007). "Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos".ARGUMENTUM, Lisboa.

Costa, L. F. S. d. (2009). "Tipificação de Soluções de Reabilitação De Pavimentos Estruturais Em Madeira Em Edifícios Antigos". Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Porto.

Cruz, H. e Custodio, J. (2010). "Adhesives for On-Site Rehabilitation of Timber Structures." *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24,(8-10), 1473-1499.

Cruz H., M. J., Moura P., Córias V. (2000). "Reforço local de elementos estruturais de madeira por meio de compósitos". Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas. Lisboa.

Custodio, J., Broughton, J. e Cruz, H. (2011). "Rehabilitation of timber structures - Preparation and environmental service condition effects on the bulk performance of epoxy adhesives." *Construction and Building Materials*, 25,(8), 3570-3582.

D'Ambrisi, A., Focacci, F. e Luciano, R. (2014). "Experimental investigation on flexural behavior of timber beams repaired with CFRP plates." *Composite Structures*, 108, 720-728.

Dias A. (2012). "Apontamentos de apoio 2012/2013 da disciplina de Estruturas de Madeira".

Dias A., C. H., Machado J., Cusódio J., Palma P. (2009). "Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira". VERLAG DASHÖFER, Lisboa.

Duarte, A. C. R. (2004). "Reabilitação de Elementos Estruturais de Madeira Com Argamassa Epoxídica Armada. Dissertação de Mestrado". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Feio A., M. S., Cunha V. (2011). "Reabilitação Estrutural: Análise de Técnicas de Reforço em Estruturas de Madeira". 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção. Coimbra.

Franco, S. I. S. (2008). "Proposta de Atribuição de Propriedades Mecânicas a Elementos Estruturais de Madeira Por Inspeção Visual In-Situ". Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto.

Garcia, P. D., Escamilla, A. C. e Garcia, M. N. G. (2013). "Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials." *Composites Part B-Engineering*, 55, 528-536.

Gentile, C., Svecova, D. e Rizkalla, S. H. (2002). "Timber beams strengthened with GFRP bars: Development and applications." *Journal of Composites for Construction*, 6,(1), 11-20.

GERMET, D. V. B., M. V. (1987). "Structural restoration of wooden beams by means of epoxy resin." *Materials and Structures / Materiaux et Construction*.

Jasienko, J. e Nowak, T. P. (2014). "Solid timber beams strengthened with steel plates - Experimental studies." *Construction and Building Materials*, 63, 81-88.

José Aguiar, A. M. R. C., João Appleton (1997). "Guião de Apoio à Reabilitação de Edifícios Habitacionais". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (2005). "Placas de derivados de madeira - Tipos de placas e sua especificação". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Lopes, M. A. C. (2007). "Tipificação de soluções de Reabilitação de Estruturas de Madeira em Coberturas de Edifícios Antigos - Tese de Mestrado". Universidade do Porto,

Martins, T. F. R. M. (2010). "Dimensionamento de Estruturas em Madeira - Coberturas e Pavimentos". Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

ROTAFIX@. "<http://www.rotafix.co.uk/documents/Timber%20Engineering.pdf>". Rotafix Ltd, Swansea. 2015.

SOMAPIL@ (2012). "<http://www.somapil.com/pt/placas/contraplacados/choupo>." 2015.

Vries, P., Gard, W.F. e Schuch, R. (2006). "Development of strength grading system of small diameter round wood."