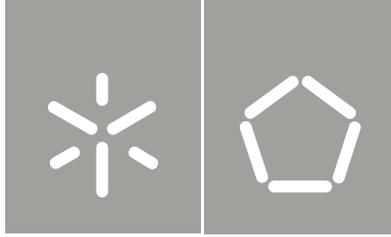




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Filipe Fernandes Lopes

Técnicas de reparação de vigas de MLC
submetidas à flexão



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Filipe Fernandes Lopes

Técnicas de reparação de vigas de MLC
submetidas à flexão

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Manuel Gonçalves Branco

AGRADECIMENTOS

A todos os que contribuíram para a concretização desta dissertação.

Em especial:

Ao Professor Doutor Jorge Manuel Gonçalves Branco, orientador desta dissertação, por me disponibilizar todos os meios ao seu alcance para que o meu trabalho se desenvolvesse da melhor forma possível, pelos valiosos conceitos transmitidos e pela sua permanente preocupação e ajuda na resolução das diversas dificuldades com que me deparei.

A todas as pessoas com quem contactei e colaborei no Departamento de Eng^a Civil. Entre muitos outros, uma palavra especial de gratidão aos técnicos de laboratório, ao João Cunha e ao Marcos, pela preciosa ajuda prestada na realização dos trabalhos experimentais.

Ao Maurício Quintas, que me acompanha desde cedo a nível profissional e por quem eu sempre tive muito gosto em trabalhar, aprender e partilhar conhecimentos.

Aos inúmeros amigos de faculdade, sem vocês com certeza não seria a mesma coisa. Aos colegas de quarto Pedro Escadas e David Branco, com quem partilhei a minha mais profunda intimidade. Ao Ruben Freitas e Jorge Marques pela vossa companhia, alegrando os dias e as noites. À Joana Almeida e Susana Marques por todos os serviços prestados, carinho, mimo e um pouquinho de paciência. Ao Ricardo Silva e Carla Ribeiro por me fazerem lembrar os meus conhecimentos em dimensionamento de estruturas de betão armado. Ao Abel Dias, Ana Gabriela e Mário Cunha, por serem sempre uma agradável companhia. Ao camarada Rui Pinheiro pela ajuda técnica prestada. Ao vizinho de quarto Luís Silva Beto por alinhar em alguns momentos divertidos com os amigos. À Diana Lopes, pelas mensagens de bom fim de semana, pois sabem sempre bem depois de uma semana difícil e cansativa. Ao meu grande amigo Tiago Saraiva, por ser um companheiro de muitas batalhas, com quem sempre partilhei conhecimento, alegrias, tristezas e que sempre esteve presente em todos os momentos mais importantes. A todos vocês, que foram a minha segunda família, um muito obrigado por tudo.

À minha família, em especial aos meus pais e irmãos, por todo o apoio, paciência e preocupação, ao longo deste longo período académico. Tudo que possa dizer é pouco para demonstrar a minha gratidão pelo que fizeram por mim.

RESUMO

Com o objetivo de reparar vigas de madeira lamelada colada (MLC) submetidas à flexão, foi inicialmente efetuado um estudo bibliográfico para conhecer a madeira como material estrutural bem como as suas propriedades físicas, assim como as diversas técnicas existentes para reparação de vigas de madeira.

Numa primeira campanha experimental constituída por ensaios de flexão segundo a normalização existente, para além de serem testadas vigas originais (de referência) de madeira lamelada colada, foram ainda testadas duas técnicas de reparação de fendas em vigas compostas da mesma classe resistente: Parafusos autoperfurantes de rosca completa e varões WB autoperfurantes. Adicionalmente, estudou-se o efeito do uso de cola epoxídica na técnica de reparação utilizada.

Na segunda campanha de ensaios de flexão, foram ainda reparadas e testadas algumas vigas ensaiadas anteriormente (as duas originais e uma das vigas compostas), com varões autoperfurantes com injeção de cola epoxídica e utilizando varões roscados colados para reparação dos finger-joints. Posteriormente, realizaram-se ensaios de corte simples para quantificar a rigidez da ligação madeira-madeira com varões WB perfurantes com e sem cola epoxídica.

Finalmente, após a quantificação da rigidez da ligação, foi realizada uma análise interna das secções transversais comparando os valores resistentes das vigas de referência com as vigas reparadas e discutindo os resultados obtidos à luz das recomendações de cálculo disponíveis.

Palavras-Chave:

Vigas de madeira
Técnicas de reparação
Avaliação experimental
Rigidez da ligação

ABSTRACT

With the aim to repair timber beams under bending, in a first step a state-of-the-art review has been performed to study timber as a structural material looking for its physics and mechanical properties, and analyzing the available techniques for repairing timber beams.

In a first experimental campaign formed by bending tests according to EN 408:2010, in addition to original glulam beams (called, reference beams), two repairing techniques were tested through specimens made by composite sections of the same strength class: self-tapping screws and WB rods. Moreover, the effect of the use of resin was investigated.

In the second experimental campaign of bending tests, some of the beams evaluated in the precedent campaign have been repaired and tested (both original beams and one of the made by the composite section), using WB rods with resin and glued-in rods for repairing the finger-joints. Then, push-out tests were performed to quantify the stiffness of the connection timber-to-timber using WB rods with and without resin.

Finally, after the quantification of the connection's stiffness, an analysis of the cross-section was performed comparing the resistance values of the original beams with the repaired ones and discussing the results within the available guidelines and design recommendations.

Keywords:

Timber beams

Repairing techniques

Experimental evaluation

Stiffness of the connection

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento temático	1
1.2. Objetivos e fases do trabalho	2
1.3. Organização da dissertação.....	3
2. REVISÃO DO ESTADO DE ARTE	5
2.1. A madeira enquanto material natural.....	5
2.2. Madeira lamelada colada	11
2.3. Danos	14
2.4. Causas	17
2.4.1. Naturais.....	17
2.4.2. Biológicas	17
2.4.3. Físicas	18
2.4.4. Erro humano	19
2.5. Relação Dano/Causa	19
2.6. Técnicas de reparação	20
2.6.1. Técnicas tradicionais	21
2.6.2. Técnicas recentes	21
2.7. Principais técnicas de reparação de vigas à flexão	22
2.7.1. Reparação de vigas por aumento da secção com nova madeira	22
2.7.2. Reparação por aplicação de empalmes e talas de madeira	23
2.7.3. Reparação com epóxi e ligadores mecânicos	23
2.7.4. Reparação por cintagem	24
2.7.5. Reparação com perfis e chapas metálicas.....	25
2.7.6. Reparação com armaduras longitudinais ou chapas de face recorrendo a laminados de fibras reforçadas com polímeros	26
2.7.7. Reparação com tirantes metálicos	26
2.8. Relação Dano/Solução	28
2.9. Técnica de reparação recorrendo a ligadores mecânicos com aplicação de resina epóxi	29

2.9.1. Descrição detalhada da técnica	29
2.9.2. Metodologia de cálculo	30
2.9.3. Dimensionamento segundo o Eurocódigo 5.....	31
2.9.3.1 Rigidez da ligação	34
2.9.3.2 Rigidez efetiva de flexão.....	36
2.9.3.3 Tensões normais.....	37
2.9.3.4 Tensões tangenciais máximas	37
2.9.3.5 Forças nos ligadores	38
3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE TÉCNICAS DE REPARAÇÃO À FLEXÃO DE VIGAS DE MLC	39
3.1. Técnicas de reparação de vigas de MLC à flexão em estudo.....	39
3.2. Procedimentos e esquema de ensaios	40
3.3. Ensaios realizados na primeira fase da campanha experimental.....	43
3.3.1. Preparação das vigas compostas	46
3.3.2. Apresentação e análise dos resultados experimentais	49
3.3.3. Conclusões da primeira fase da campanha experimental.....	53
3.4. Ensaios realizados na segunda fase da campanha experimental	54
3.4.1. Preparação das vigas	57
3.4.2. Apresentação e análise dos resultados experimentais	59
3.4.3. Conclusões da segunda fase da campanha experimental	64
4. ANÁLISE DE RESULTADOS	67
4.1. Procedimentos e esquema de ensaio	67
4.2. Preparação dos provetes de ensaio	69
4.3. Apresentação e análise dos resultados dos ensaios	71
4.4. Conclusões	76
5. ANÁLISE INTERNA.....	79
5.1. Considerações e pressupostos	79
5.2. Análise da capacidade resistente da secção.....	80
5.3. Análise da capacidade resistente da ligação.....	86

5.4. Conclusão.....	88
6. CONCLUSÕES.....	89
6.1. Conclusões gerais	89
6.2. Trabalhos futuros	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Direções principais da madeira (Álvarez <i>et al.</i> , 2000).....	5
Figura 2.2 – Efeito da retração num elemento de madeira (Banema)	6
Figura 2.3 - Curvas de retração (Coutinho, 1999).....	7
Figura 2.4 – Tensão de corte. a) Corte por tração b) Corte por compressão (Martins, 2010)....	8
Figura 2.5 – Fluxo de corte (Martins, 2010)	8
Figura 2.6 – Flexão de uma viga simplesmente apoiada (Tsoumis, 1991)	9
Figura 2.7 – Efeito da fluência. a) Diagrama carga vs. tempo; b) Comportamento viscoelástico do material (Melo e Menezzi, 2010)	10
Figura 2.8 – Sala Atlântico do Pavilhão Multiusos – Parque das Nações – Lisboa (Henriques)	12
Figura 2.9 – Finger joint numa peça de MLC	13
Figura 2.10 – Remoção de defeitos de uma lamela de MLC	13
Figura 2.11 – Comparação da resistência à flexão da madeira maciça com a MLC (André, 2006)	14
Figura 2.12 – Fendas longitudinais em viga de MLC (Gray e Gilham, 2006).....	15
Figura 2.13 – Fendas transversais em vigas de MLC (Gray e Gilham, 2006)	15
Figura 2.14 – Elemento de madeira degradado (Berry, 1994)	15
Figura 2.15 – Alteração do aspeto da madeira	16
Figura 2.16 – Vigas com deformação excessiva	16
Figura 2.17 – Adição de um novo elemento em madeira (Arriaga <i>et al.</i> , 2002)	22
Figura 2.18 – Aplicação de empalmes e talas de madeira (CÓIAS, 2007)	23
Figura 2.19 – Utilização conjunta de resina epóxi e ligadores mecânicos (ROTAFIX, 2007)	24
Figura 2.20 – Utilização de cintas metálicas (Arriaga <i>et al.</i> , 2002)	25
Figura 2.21 – Aplicação de chapas e perfis (BARBISAN e LANNER, 2000).....	25
Figura 2.22 – Aplicação de fibras reforçadas com polímeros (Arriaga <i>et al.</i> , 2002)	26
Figura 2.23 – Aplicação de tirantes metálicos (Arriaga <i>et al.</i> , 2002).....	27
Figura 2.24 – Dano mais comum em vigas de madeira sujeitas à flexão.....	29
Figura 2.25 – Viga sujeita à flexão. a) Secção maciça; b) Elementos sobrepostos desligados; c) Elementos sobrepostos ligados; d) Esforços internos (ALVIM, 2002).....	31
Figura 2.26 – Deslocamento e força de corte entre dois elementos (KREUZINGER, 1995) ..	32
Figura 2.27 – Secções transversais e distribuição de tensões de acordo com o Eurocódigo 5.	33

Figura 2.28 – Detalhe de uma viga composta e configuração de equilíbrio de um elemento (KREUZINGER, 1995).....	34
Figura 2.29 – Módulo de Deslizamento secante (CEN, 2004)	35
Figura 2.30 – Distribuição de tensões (KREUZINGER, 1995).....	38
Figura 3.1 – Esquema de ensaio de um elemento à flexão (CEN, 2010a).....	40
Figura 3.2 – Esquema de ensaio e instrumentação utilizada nos ensaios de flexão	42
Figura 3.3 – Procedimento de carga adotado nos ensaios de flexão.....	43
Figura 3.4 – Esquemas representativos dos provetes. a) Vigas de referência (V1 e V2); b) Vigas ligadas por varões WB 16 da Rothoblaas (R1, R2 e R4); c) Vigas ligadas por parafusos autoperfuradores da Rothoblaas (R3). Dimensões em metro (m).....	45
Figura 3.5 – Pormenorização da execução da pré-furação e colocação dos varões WB 16	46
Figura 3.6 – Colocação dos parafusos VGZ 7x260 com ângulo de 45°, com recurso a ponteira TX 30.....	47
Figura 3.7 – Selagem dos pré-furos com espuma	48
Figura 3.8 – Aplicação da cola MAPEWOOD Gel 120 e da pressão durante a cura	48
Figura 3.9 – Curvas experimentais força – deslocamento de todas as vigas ensaiadas	50
Figura 3.10 – Padrões de rotura das vigas ensaiadas. a) Viga V1; b) Viga V2; c) Viga R1; d) Viga R2; e) Viga R3; f) Viga R4	53
Figura 3.11 – Esquema representativo dos provetes ensaiados, reparados com recurso a varões autoperfurantes WB 16 da Rothoblaas e varões roscados da classe 8.8 (V1R, V2R e R4R)	55
Figura 3.12 – Pormenorização da reparação da rotura pelo finger-joint	56
Figura 3.13 – Procedimento de preparação das vigas V1R, V2R e R4R. a) e b) injeção de cola MAPEWOOD Gel 120 nas fissuras; c) e d) aplicação de pressão através de serra-juntas e/ou atuador hidráulico; e) e f) abertura dos roços para inserção do varão roscado 8.8 e posteriormente colado com MAPEWOOD Paste 140; g) e h) pré-furação e colocação dos varões roscados WB 16.....	58
Figura 3.14 – Curvas experimentais força – deslocamento de todas as vigas ensaiadas	59
Figura 3.15 – Deslizamento dos varões longitudinais	62
Figura 3.16 – Rotura dos varões longitudinais	63

Figura 3.17 – Padrões de rotura das vigas ensaiadas. a) Viga VR1; b) Viga VR2; c) Viga RR4	63
Figura 4.1 – Recomendações de EN 26891:1991. a) Procedimento de carga; b) Curva força – deslocamento esperada (CEN, 1991).....	68
Figura 4.2 – Esquema de ensaio e instrumentação	69
Figura 4.3 – Esquema representativo e dimensões dos provetes de ensaio.....	70
Figura 4.4 – Preparação dos provetes de corte simples	71
Figura 4.5 – Curvas experimentais força – deslocamento. a) Provetes não colados; b) Provetes colados.....	72
Figura 4.6 – Proвете com cola após ensaio de corte simples	75
Figura 5.1 – Diagrama de momentos para um nível de carregamento genérico (desprezando a massa da viga por simplicidade)	81
Figura 5.2 – Distribuição de tenções e extensões. a) Secção contínua (V1, V2, R4, R4R, V1R e V2R); b) Secção descontínua (R1 e R2).....	83

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Relação entre os danos e os fenómenos causadores.....	19
Quadro 2.2 – Relação dano/técnica de reparação.....	28
Quadro 3.1 – Quadro resumo das vigas ensaiadas na primeira fase.....	43
Quadro 3.2 – Valores do módulo de elasticidade globais, E_m, g , das vigas V1 e V2.....	49
Quadro 3.3 – Resultados dos ensaios e observação do padrão de rotura	51
Quadro 3.4 – Comparação dos valores (%) da capacidade resistente e rigidez entre as vigas de referência e as compostas.....	52
Quadro 3.5 – Quadro resumo das vigas ensaiadas na segunda fase da campanha experimental.....	54
Quadro 3.6 – Resultados dos ensaios e padrão de rotura	60
Quadro 3.7 – Decréscimo (%) da capacidade resistente e rigidez das vigas reparadas	61
Quadro 4.1 – Valores do módulo de deslizamento, k_{ser} , em N/mm, para os provetes não colados	73
Quadro 4.2 – Valores do módulo de deslizamento, k_{ser} , em N/mm, para os provetes colados	74
Quadro 5.1 – Valores da capacidade resistente da secção transversal segundo EN 1194:1999 para as vigas V1 e V2	81
Quadro 5.2 – Valores da capacidade resistente da secção transversal das vigas ensaiadas	82
Quadro 5.3 – Acréscimo (%) dos valores experimentais médios obtidos nos ensaios das vigas de referência V1 e V2 comparativamente com o sugerido pela EN 1194:1999	83
Quadro 5.4 – Variação (%) dos valores calculados das principais propriedades resistentes para as vigas R1, R2, R4, V1R, V2R e R4R relativamente aos valores médios obtidos nos ensaios de V1 e V2.....	84
Quadro 5.5 – Redução (%) dos valores calculados das principais propriedades resistentes para as vigas V1R, V2R e R4R comparativamente aos valores obtidos nos ensaios de V1, V2 e R4, respetivamente.....	86
Quadro 5.6 – Valores de F_i e F_r, R_d do varão autoperfurante WB 16.....	87

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

As técnicas de reparação de vigas de madeira submetidas à flexão têm por objetivo repor, tanto quanto possível, a capacidade resistente da secção e do elemento a reparar, respeitando, assim, as exigências normativas de cálculo para verificação de Estados Limite Últimos.

1.1. Enquadramento temático

A utilização da madeira como material estrutural é constante ao longo da humanidade, especialmente com grande aplicação em coberturas e elementos de suporte a pavimentos (vigas). Contudo, com a revolução industrial e o aparecimento do betão armado, a utilização da madeira nas estruturas decaiu significativamente.

Atualmente, a madeira volta a ser uma escolha credível face à evolução da indústria da madeira e seus derivados. Tomando como exemplo o desenvolvimento da madeira lamelada colada, que permitiu eliminar e corrigir grande parte dos defeitos característicos da madeira maciça, sobrepondo lamelas de madeira e ligando-as por uma cola altamente resistente, conferindo-lhe uma maior resistência a solicitações externas e consequente diminuição das suas limitações, tais como, extensão do vão e as formas da secção transversal, elementos estruturais e estruturas.

Os danos sofridos pelas vigas de madeira podem ter a sua origem antes ou após a sua aplicação em obra, provenientes de defeitos de crescimento da árvore de origem (nós, orientação das fibras), durante o processo de corte e tratamento (retração), por ação de agentes biológicos e/ou atmosféricos (degradação, alteração das propriedades mecânicas da secção), ou simplesmente por erro de conceção, dimensionamento e sobrecarga.

O primeiro passo para a reparação de qualquer elemento estrutural é a necessidade de uma inspeção visual para identificação e localização dos danos, para que a definição da técnica de reparação a aplicar seja a mais adequada.

Não havendo conhecimento das características mecânicas do elemento a reparar, é necessário efetuar uma caracterização através de ensaios, atribuindo assim uma classe de resistência.

Após a escolha da técnica, se possível ou necessário, deve recriar-se o cenário em laboratório tanto quanto possível, montando o esquema de ensaio de acordo com a normalização existente e técnica adotada e determinar, com isso, o comportamento do material. A solução de reparação pode ser ajustada mediante dos resultados obtidos e só está concluída quando se obtiver um número significativo de valores admissíveis e semelhantes.

Quando tal não é possível (ensaios de laboratório), deve optar-se por ajustar a técnica de reparação a expressões analíticas presentes no Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004), sendo assim possível determinar a sua capacidade resistente.

A capacidade resistente à flexão da secção reparada depende do nível de interação da mesma que fica assegurada pelos elementos de ligação entre as faces desligadas (fendas). Quanto maior for o nível de interação, menor será o deslizamento relativo entre as faces desligadas e maior capacidade resistente apresentará a secção, sendo que as tensões induzidas serão mais baixas. No limite, para uma ligação infinitamente rígida, não surgiria qualquer deslizamento, logo a capacidade resistente seria máxima (interação total). Sendo este um cenário impossível, tratando-se de elementos estruturais de madeira em que o nível de conexão não depende apenas do material de ligação mas também no material estrutural. A determinação da rigidez de ligação utilizada na técnica adotada é obtida através de ensaios de corte (push-out) consoante o tipo de ligação e material estrutural.

1.2. Objetivos e fases do trabalho

Com a realização deste trabalho pretende-se alcançar, de forma faseada, os seguintes objetivos gerais:

1. Identificar e caracterizar as principais soluções de reparação de elementos de madeira sujeitos a flexão;
2. Avaliar experimentalmente algumas técnicas de reparação de vigas de madeira lamelada colada à flexão, analisando os modos de rotura, capacidade resistente e rigidez;

3. Caracterização experimental dos valores da rigidez da ligação da técnica de reparação selecionada para posterior comparação com a bibliografia de referência;
4. Análise interna das vigas ensaiadas com a técnica de reparação selecionada e comparação com a bibliografia de referência.

1.3. Organização da dissertação

O presente trabalho é constituído por 6 capítulos divididos da seguinte forma:

No capítulo 1 apresenta-se uma introdução ao trabalho realizado e definem-se os seus objetivos.

O capítulo 2 apresenta o estado de conhecimento relativo à utilização da madeira como material estrutural, propriedades físicas e mecânicas relevantes para o seu dimensionamento, classificação estrutural, danos e causas mais comuns nos elementos estruturais em madeira, técnicas de reparação mais correntes e regulamentação existente necessária para análise estrutural.

No capítulo 3 apresenta-se a campanha experimental realizada dos ensaios de flexão utilizando as técnicas de reparação selecionadas do estado de conhecimento, descrevendo o material utilizado, preparação dos provetes, procedimentos e esquema de ensaios, apresentação, análise e discussão de resultados.

No capítulo 4 apresenta-se a campanha experimental realizada com ligações ao corte simples, utilizando a ligação selecionada na campanha experimental dos ensaios de flexão. Descreve-se o material utilizado, a preparação dos provetes, os procedimentos e o esquema de ensaios utilizados e apresentam-se os resultados obtidos.

No capítulo 5 apresenta-se a análise interna das vigas ensaiadas com a técnica de reparação selecionada na campanha experimental dos ensaios de flexão, analisando os resultados com a bibliografia de referência.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões da dissertação, sugerindo algumas ideias para complemento e continuação dos estudos nesta área.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO DO ESTADO DE ARTE

2.1. A madeira enquanto material natural

A madeira é um material celular que resulta de um mecanismo de crescimento contínuo, característico das plantas. São conhecidas milhares de espécies de árvores espalhadas pelo mundo inteiro, sendo que cada uma delas contém propriedades que as tornam únicas, mas com características comuns, tais como a estrutura celular com arranjo em forma de anéis concêntricos conferindo-lhe propriedades ortotrópicas (resistência, rigidez e retração), diretamente relacionadas com a sua orientação relativa aos eixos ortogonais principais. Existem outras características comuns à maioria das árvores, como os anéis de crescimento (origem no ciclo de crescimento anual das células), nós, fendas (separação mecânica das células em zonas mais sensíveis) e orientação das fibras (orientação da direção longitudinal das células relativamente aos eixos geométricos do elemento) (André, 2006).

Pelo facto de a madeira ser um material anisotrópico (comportamento diferente para cada uma das direções principais), ela contém três direções principais, a longitudinal (paralela as fibras), a tangencial e a radial (perpendicular aos anéis concêntricos), tal como ilustrado na figura 2.1 (André, 2006).

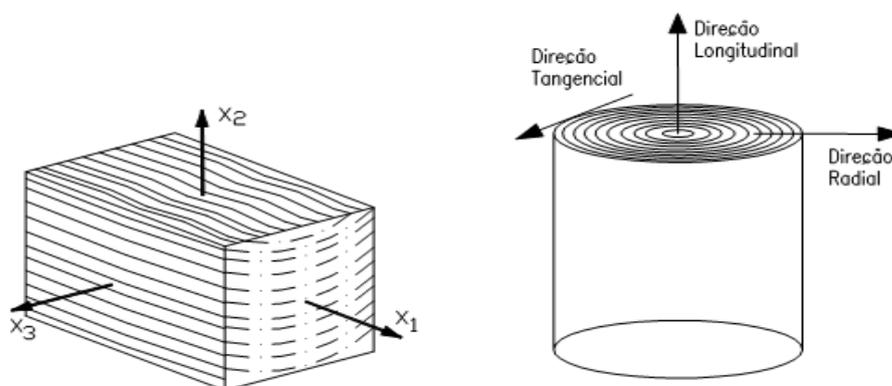


Figura 2.1 – Direções principais da madeira (Álvarez *et al.*, 2000)

Por simplificação, para efeitos de cálculo pode ser considerado um material ortotrópico, adotando um modelo transverso isotrópico contendo apenas as direções paralela às fibras (longitudinal) e a perpendicular às fibras (transversal), considerando assim que as propriedades nas direções, radial e tangencial são as mesmas (ver figura 2.1).

Como propriedades físicas da madeira enquanto material estrutural, necessárias para o desenvolvimento desta dissertação, destacam-se a retração e o teor de água.

A retração (figura 2.2) é o fenómeno caracterizado pela redução da dimensão de um elemento de madeira causada pela perda de água (termo descrito mais à frente).

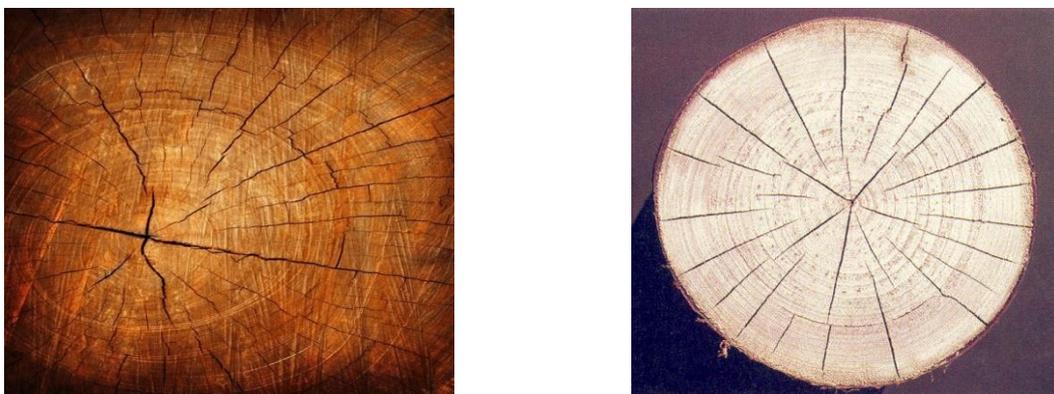


Figura 2.2 – Efeito da retração num elemento de madeira (Banema)

Também a retração apresenta um comportamento anisotrópico, diferente para cada uma das direções (longitudinal ou axial, tangencial e radial). Para a direção longitudinal, a retração que se gera não atinge valores significativos sendo na prática desprezável. Em contrapartida, a retração radial e tangencial pode apresentar variação da dimensão do elemento entre 6 e 10% respetivamente (ver figura 2.3), dando origem a fendilhação ou torção nos elementos de madeira (Szücs *et al.*, 2005).

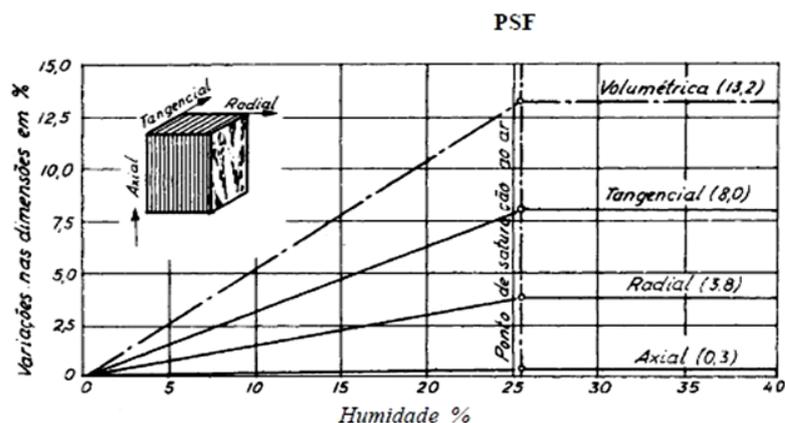


Figura 2.3 - Curvas de retração (Coutinho, 1999)

Analisando a figura 2.3, verifica-se que as alterações na dimensão ocorrem para valores de umidade da madeira abaixo da respectiva umidade de saturação das fibras (PSF), que se situa em média nos 28% (Mateus, 1961).

De notar que existe ainda a possibilidade da ocorrência do processo inverso, ou seja, quando o elemento de madeira está exposto a condições de elevada umidade, esta irá absorver a água provocando um aumento da sua dimensão.

A respectiva utilização da madeira como elemento estrutural deve ser efetuada para uma perda de água até ao ponto de saturação das fibras, não criando problemas como a retração. À medida que se vai libertando água do seu interior dá-se um decréscimo da dimensão do elemento.

Também se utiliza este processo para aumentar a resistência dos elementos de madeira, sendo apenas necessário controlar o processo de secagem para evitar problemas na madeira.

Como propriedades de resistência mecânica da madeira enquanto material estrutural, necessárias para o desenvolvimento desta dissertação, destacam-se a resistência à compressão, tração, corte, flexão e ainda o módulo de elasticidade e fluência.

Propriedades como a resistência à tração ou à compressão, variam consoante a direção considerada, apresentando valores mais elevados na direção paralela às fibras do que transversalmente às mesmas (50 vezes superior no caso de tração e 15 vezes superior no caso

de compressão). Sendo a resistência à compressão cerca de metade da resistência à tração (Martins, 2010).

As tensões de corte também aparecem segundo os dois planos já referidos (longitudinal e transversal). Ao contrário das tensões axiais (tração e compressão), a resistência ao corte tangencial (transversal) é cerca de 3 a 4 vezes maior do que a resistência ao corte axial. No entanto, na prática, esta característica que a madeira apresenta não tem grande relevância, pois a rotura ocorrerá primeiro por corte axial.

Se tivermos em conta a estrutura fibrosa que a madeira apresenta e a maior tendência para o deslizamento das fibras entre diferentes planos, o corte pode ser provocado por tensões de tração (Figura 2.4a) ou de compressão (Figura 2.4b) de sentidos opostos e a atuar em planos afastados entre si (Tsoumis, 1991).

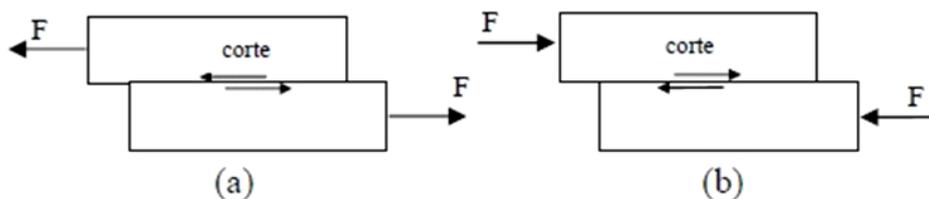


Figura 2.4 – Tensão de corte. a) Corte por tração b) Corte por compressão (Martins, 2010)

Um esforço de corte surge assim que um elemento de madeira é fletido, a não ser que se trate de flexão pura (momento fletor constante), onde não existe fluxo de corte. Define-se fluxo de corte como sendo a força de corte por unidade de comprimento. Pode observar-se na figura 2.5 o aparecimento do fluxo de corte numa viga simplesmente apoiada sujeita à ação de uma carga concentrada a meio vão (flexão simples).

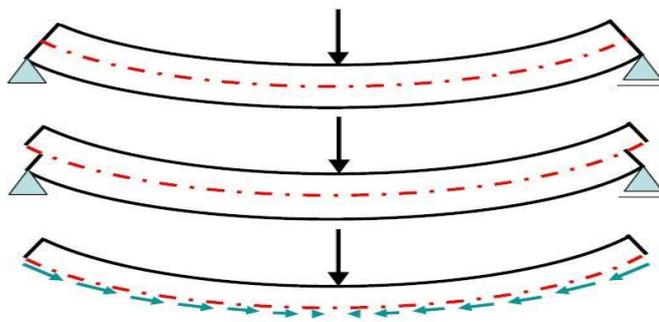


Figura 2.5 – Fluxo de corte (Martins, 2010)

Devido às interferências que as tensões de corte estabelecem com os outros esforços, como trações e compressões, o corte axial torna-se uma propriedade de difícil quantificação. Para o caso concreto da madeira, tendo em vista o seu comportamento relativamente a tensões de tração e compressão transversal, a análise do seu comportamento real é bastante complexa.

A maioria das aplicações estruturais estão sujeitas à ação de cargas que provocam flexão. Por simplicidade, pode afirmar-se que este esforço está presente sempre que há necessidade de vencer a força gravítica e de criar áreas livres debaixo de apoios. Para estes casos desenvolvem-se as três tensões básicas já antes descritas: tensões de tração, compressão e de corte. Por comparação, a resistência da madeira à flexão é mais reduzida do que a dos metais. No entanto, é mais elevada do que a maioria dos restantes materiais. O facto mais favorável da madeira como material estrutural é a sua relação resistência/peso. Na Figura 2.6 verifica-se a distribuição das tensões normais bem como as fibras comprimidas e tracionadas de uma viga simplesmente apoiada submetida a um esforço de flexão quando sujeita a uma carga concentrada a meio vão.

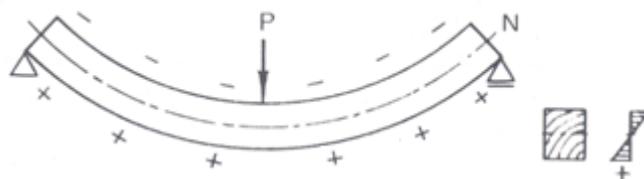


Figura 2.6 – Flexão de uma viga simplesmente apoiada (Tsoumis, 1991)

A elasticidade é a propriedade característica da deformação dos materiais. Se a deformação se encontrar dentro de certos limites, o material recupera a sua configuração inicial assim que lhe for removida a ação.

Esta característica é muito vantajosa para o caso particular da madeira no que diz respeito ao seu comportamento em serviço. A deformação que a madeira vai exibindo ao longo do tempo pode ser um indicador do estado do esforço de um elemento ou da estrutura em si. Como se trata de uma característica com grande relevância, a sua quantificação deve ser o mais precisa possível. O parâmetro que se utiliza para representar a elasticidade é o módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade permite calcular qual a deformação esperada em certas situações de carregamento, usado como ferramenta para prever o comportamento do material. Existência de valores altos deste parâmetro indica alta resistência e baixa capacidade de deformação do material.

Sendo que parte da flexão é provocada pela deformação por corte, os valores do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão estática (viga simplesmente apoiada) são um pouco mais reduzidos do que os correspondentes valores obtidos através de ensaios de tração. Note-se ainda que os módulos de elasticidade determinados a partir de ensaios de compressão axial são mais baixos do que os correspondentes à flexão.

Nos ensaios de flexão pode ainda fazer-se a distinção entre módulo de elasticidade global, determinado entre os apoios e módulo de elasticidade local, determinado entre os pontos de aplicação de cargas onde o esforço transversal é desprezável mas que para o caso concreto da madeira, o seu efeito pode ser importante.

A fluência é um fenómeno característico dos materiais e caracteriza-se pela variação da deformação ao longo do tempo quando o elemento está sujeito a ação de uma carga constante.

No caso concreto da madeira, sendo este um material visco-elástico, a sua deformação depende do histórico do carregamento. Para a aplicação de uma carga constante num determinado intervalo de tempo (figura 2.7a), Δt , o elemento de madeira apresenta, além da deformação instantânea elástica, um acréscimo de deformação variável com o tempo devido ao efeito de fluência. Retirado o carregamento, apenas parte da deformação é recuperada, mantendo-se uma deformação residual permanente com o tempo (Figura 2.7b) (Melo e Menezzi, 2010).

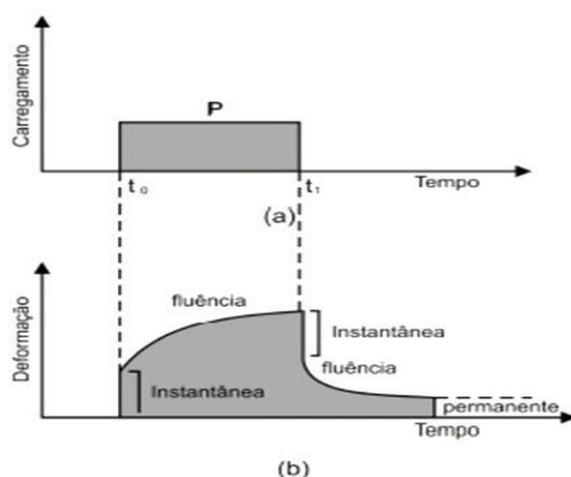


Figura 2.7 – Efeito da fluência. a) Diagrama carga vs. tempo; b) Comportamento viscoelástico do material (Melo e Menezzi, 2010)

O comportamento viscoelástico da madeira ao fenómeno da fluência é por si algo bastante complexo e que depende de vários fatores (Pfeil e Pfeil, 2003):

- Características físicas da madeira (densidade e retração);
- Nível de tensão instalado;
- Histórico de carregamento;
- Nível de humidade;
- Temperatura;
- Tempo.

De referir o facto de que é comum a ocorrência de deformações por fluência da mesma ordem de grandeza das deformações instantâneas elásticas iniciais, que explica assim a redução significativa da rigidez do elemento. A madeira perde assim, para um carregamento constante de longa duração, até cerca de 40% da sua capacidade resistente inicial (Negrão, 2005).

Normalmente, os elementos em madeira quando sujeitos a carregamentos que provocam esforços axiais, de corte ou de flexão, emitem um ruído característico antes que seja atingida a rotura do elemento, permitindo assim uma intervenção prévia.

Nos elementos em madeira maciça, as suas propriedades ficam assim afetadas pelas características mencionadas, decorrentes do crescimento natural da árvore.

A madeira ideal para construção seria a que contem fibras retas, sem nós nem fendas provenientes da secagem e que contenha uma estrutura anatómica homogénea.

2.2. Madeira lamelada colada

A madeira lamelada colada (MLC), constituída por lamelas da madeira coladas entre si, topo a topo e lateralmente, pode ser vista como madeira maciça reconstituída, apresentando um comportamento físico e mecânico semelhante à da madeira maciça, com a vantagem de possibilitar a formação de secções transversais de grande dimensão e com comprimentos superiores. Possibilita a eliminação de imperfeições resultantes do seu crescimento enquanto árvore, obtendo-se um material de construção mais homogéneo e de melhor qualidade (André, 2006).

Permite também a criação de ilimitadas formas estruturais, desde vigas mais simples, vencendo grandes vãos, até vigas complexas em forma de arco. Este tipo de derivado de madeira é utilizado, geralmente, na construção de habitações, armazéns, pontes pedonais, etc.

No entanto, quando sujeitas a cargas muito elevadas, o seu uso torna-se limitado, uma vez que apresenta uma rigidez reduzida quando comparado com outros materiais estruturais, tais como o betão e o aço. Também problemas relacionados com manutenção e a durabilidade limitam o seu uso. Por outro lado, aspetos relacionados com o ambiente, estética e relação resistência/peso são a favor da sua utilização.

Em Portugal, a maior obra construída em madeira lamelada colada até ao momento é a cobertura do Pavilhão Multiusos de Lisboa (figura 2.8), executada em 1998. Apresentando até a data de construção, o maior vão em madeira lamelada colada da Europa com 113 metros (Henriques).

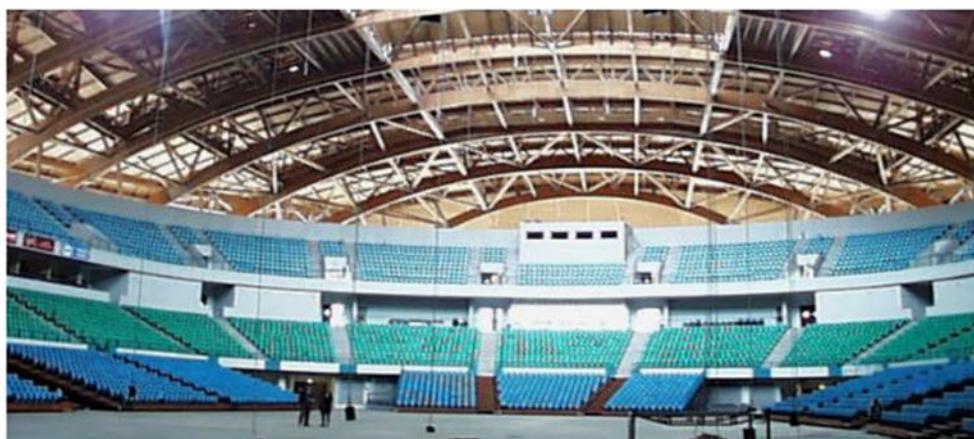


Figura 2.8 – Sala Atlântico do Pavilhão Multiusos – Parque das Nações – Lisboa
(Henriques)

Na produção de vigas lameladas coladas são utilizadas tábuas de madeira que em primeiro lugar são classificadas quanto à sua resistência à flexão e quanto à sua rigidez (módulo de elasticidade à flexão), apresentando estas uma espessura máxima de 45 mm. Posteriormente, as tábuas da mesma classe são colocadas topo a topo para produzir uma lamela comprida e unidas normalmente por ligações de entalhes múltiplos, designados por finger joints (ver figura 2.9). A lamela assim obtida é então sobreposta e colada juntamente com outras, para obtenção da secção transversal desejada (André, 2006).

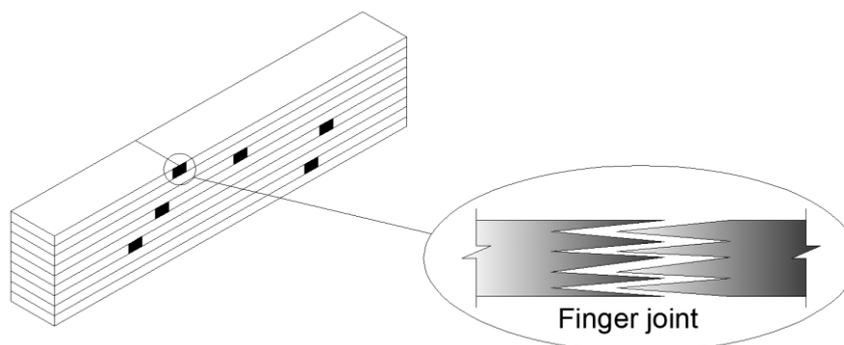


Figura 2.9 – Finger joint numa peça de MLC

É aquando da produção da madeira lamelada colada que se torna possível a remoção das imperfeições ou defeitos de crescimento ou secagem, tais como nós e fendas de retração. A imperfeição ou defeito é identificada e removida através de corte da lamela nessa zona (figura 2.10) (André, 2006).

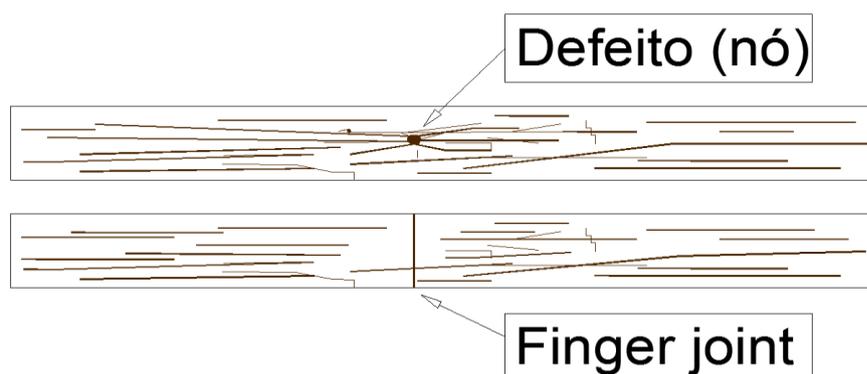


Figura 2.10 – Remoção de defeitos de uma lamela de MLC

Assim, as propriedades da madeira lamelada colada tornam-se mais fiáveis e melhoradas quando comparadas com as da madeira maciça. Com todo este processo de seleção de material, classificação, remoção de defeitos e colagem, para um provete com as mesmas dimensões e com o mesmo tipo de madeira, o valor característico da resistência bem como o seu valor médio utilizado para o dimensionamento estrutural, é maior em estruturas de MLC comparativamente com a madeira maciça (ver figura 2.11) (André, 2006).

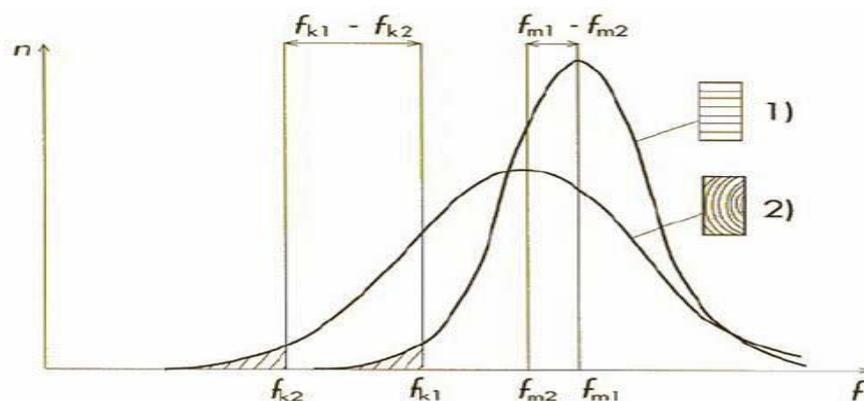


Figura 2.11 – Comparação da resistência à flexão da madeira maciça com a MLC
(André, 2006)

2.3. Danos

O aparecimento de danos em vigas de madeira é proveniente de fenómenos físicos/químicos, através de processos naturais ou não naturais. O seu aparecimento pode surgir antes ou depois da sua colocação em obra, levando neste último caso a uma perda da sua capacidade resistente podendo colocar em causa a segurança da estrutura.

Para evitar o colapso do elemento ou até da própria estrutura, torna-se necessário fazer inspeções periódicas para avaliar as suas condições e determinar a necessidade de intervenções futuras. As inspeções serão efetuadas in-situ conforme as suas necessidades e/ou disponibilidade.

Para caracterização do estado de conservação de vigas lameladas coladas, e identificação das causas que levam à sua degradação, é possível usar-se fichas de inspeção, tal como apresentado no anexo A.

Os principais danos observáveis que levam a diminuição da capacidade resistente da secção e do elemento são:

- Fendas longitudinais – Fendas orientadas na direção das fibras da madeira (ver figura 2.12).



Figura 2.12 – Fendas longitudinais em viga de MLC (Gray e Gilham, 2006)

- Fendas transversais – Aparecem devido à rotura do finger joint (MLC) ou em zonas de nós (figura 2.13).



Figura 2.13 – Fendas transversais em vigas de MLC (Gray e Gilham, 2006)

- Alteração da secção transversal – Diminuição da secção útil, quer a nível interno, quer externo (figura 2.14).



Figura 2.14 – Elemento de madeira degradado (Berry, 1994)

- Alteração das propriedades físicas e mecânicas – Com o passar do tempo, a duração da carga atuante no elemento de madeira provoca uma diminuição da sua capacidade resistente, uma vez que diminui o módulo de elasticidade. Aspectos como a cor também podem ser alterados por fenómenos externos (figura 2.15).



Figura 2.15 – Alteração do aspeto da madeira

- Deformação excessiva – Embora o elemento cumpra os requisitos relativamente aos Estados Limite Últimos, devido ao efeito da fluência pode não cumprir os requisitos relativos ao serviço, pondo em causa o conforto da construção (ver figura 2.16).



Figura 2.16 – Vigas com deformação excessiva

2.4. Causas

Existe uma série de fenómenos que origina o aparecimento dos danos já apresentados. Após a sua colocação em obra os elementos estruturais estarão mais ou menos suscetíveis a alguns destes fenómenos mediante do tratamento que lhe for conferido. Independentemente das causas que levam ao aparecimento de qualquer dano na estrutura, todas elas estão condicionadas pelo fator tempo.

Os elementos podem estar inseridos em ambientes mais ou menos propícios ao ataque de fenómenos não naturais.

2.4.1. Naturais

As causas naturais para o aparecimento de patologias e danos não podem ser controladas, uma vez que aparecem no processo de crescimento da árvore.

- Existência de defeitos – Imperfeições geométricas, orientação das fibras e aparecimento de nós tornam a madeira mais suscetível a danos futuros uma vez que estes defeitos contribuem para uma maior heterogeneidade do material;
- Teor de humidade – A madeira apresenta fibras de paredes celulóticas hidrófilas na sua constituição que apresentam um determinado teor de água, pelo que as propriedades se alteram em função desse grau. Quanto menor o grau de humidade, maior será a capacidade resistente do material;
- Espécie da madeira – A própria estrutura atómica e a constituição do tecido lenhoso e variável de espécie para espécie, pelo que se torna importante proceder a uma boa identificação e prever, assim, os danos característicos da mesma (Arriaga *et al.*, 2002, Barreal, 1998, DCTA-UPM, 1998).

2.4.2. Biológicas

Sendo a madeira um material orgânico, esta serve de alimento para agentes biológicos que degradam a matéria. O aparecimento dos agentes biológicos está ligado ao teor em água presente no ambiente. Sendo que, normalmente, valores elevados do respetivo teor em água propiciam o seu aparecimento.

O aparecimento de fungos ocorre para valores do teor em água superiores a 20%, estando o limite máximo de teor em água relacionado com as necessidades de oxigénio de cada um dos fungos em causa.

Também as térmitas aparecem para valores de teor em água iguais aos já referidos para os fungos. Estas geralmente atacam a madeira em contacto com o solo, utilizando a mesma como alimento e abrigo.

Apenas os carunchos atacam a madeira relativamente seca, penetrando-a, dando origem a galerias onde depositam os seus ovos.

Para além dos agentes já inumerados, também as bactérias e as formigas podem degradar a madeira, utilizando a como abrigo.

A suscetibilidade de uma madeira ao ataque de agentes biológicos está ligada com a sua espécie (durabilidade normal). Informações sobre a durabilidade normal de algumas espécies com interesse comercial da Europa podem ser encontradas na norma NP EN 350-2 (Arriaga *et al.*, 2002, Franco).

2.4.3. Físicas

Algumas propriedades da madeira provocam direta ou indiretamente danos nos seus elementos:

- Imperfeições físicas – A heterogeneidade do material também pode levar a erros imprevisíveis de cálculo da capacidade resistente.
- Temperatura/Fogo – O contacto com o fogo degrada e altera as propriedades do material.
- Retração e fluência – A perda de água e conseqüente secagem da madeira bem como a constante atuação de cargas levam o elemento de madeira a diminuir o seu volume e fendilhar. A atuação permanente de cargas leva o elemento a deformar-se levando a um decréscimo do módulo de elasticidade. Mesmo que seja aliviada ou retirada essa carga, o elemento não volta por completo ao seu estado inicial, sendo que parte da deformação permanece (Barreal, 1998, DCTA-UPM, 1998).

2.4.4. Erro humano

Geralmente, se não for alvo de uma rápida intervenção, pode por em risco a segurança do elemento ou mesmo da própria estrutura:

- Erros de concepção – São exemplo disso a utilização excessiva de cargas permanentes, existência de cargas cumulativas, trações perpendiculares às fibras, erros de cálculo e erros aquando da sua colocação em obra;
- Imperfeições geométricas – A geometria inadequada do elemento pode levar a erro imprevisíveis de cálculo.

2.5. Relação Dano/Causa

É possível então relacionar os vários danos que um elemento estrutural está sujeito com os fenómenos a eles associados (quadro 2.1).

Quadro 2.1 – Relação entre os danos e os fenómenos causadores.

Dano	Causa
Fendas longitudinais	Retração da madeira Excesso de carga Trações perpendiculares às fibras Imperfeições Heterogeneidades
Fendas transversais	Excesso de carga Imperfeições Heterogeneidades
Alteração da secção transversal (degradação)	Humidade Agentes biológicos Temperatura/Fogo Luz solar/Radiação
Alteração das propriedades mecânicas	Agentes biológicos Agentes químicos Temperatura/Fogo Luz solar/Radiação
Deformação excessiva	Secção transversal insuficiente Retração Fluência Humidade Excesso de carga

2.6. Técnicas de reparação

Tanto as estruturas antigas como as recentes necessitam de constantes operações de manutenção para se manterem operacionais e assim não colocar em risco a comodidade dos habitantes. Tais intervenções podem ser de maior ou menor envergadura mediante da sua necessidade.

Esta necessidade de intervenção está direta ou indiretamente ligada as causas mencionadas anteriormente.

Antes de se partir para determinada intervenção num elemento estrutural, é necessário elaborar uma análise bem cuidada que resulta de um processo de levantamento e avaliação do mesmo elemento.

Nessa análise deve constar todos os danos sofridos pelo elemento estrutural em estudo bem como as possíveis ações de intervenção. De todas as propostas deve ser escolhida aquela que parecer mais viável a nível estético e económico, assegurando a capacidade resistente pretendida.

Feita a análise estrutural, em último recurso, pode optar-se pela total substituição do elemento estrutural. Isto se se concluir que o elemento é irreparável.

As técnicas de intervenção em estruturas de madeira podem ser divididas em dois grupos:

- Técnicas de reparação – Estas têm por objetivo repor a capacidade resistente da secção e do elemento a reparar, respeitando assim as exigências normativas de cálculo para verificação de Estados Limite Últimos (ELU- EC5);
- Técnicas de reforço – Estas têm por objetivo aumentar a capacidade resistente da secção e do elemento, devido a elevadas ações de cálculo que normalmente estão associadas a mudança de utilização do elemento ou da estrutura em que está inserido, respeitando assim as exigências preconizadas pelos Estados Limite Últimos, ou simplesmente limitar a deformação, respeitando assim os Estados Limite de Utilização (ELU e ELS – EC5).

Como já referido, qualquer que seja o objetivo, existem normalmente várias possibilidades de intervenção. A escolha da técnica adequada a cada caso deve levar em conta vários fatores, devendo estes ser estudados e avaliados para cada caso, nomeadamente: o contexto da

intervenção, do tipo de material existente e que se pretenda aplicar, tipo de dano e degradação, vantagens, inconvenientes e limitações associadas a cada técnica.

Dentro das principais técnicas de reparação para vigas de madeira sujeitas a flexão, é possível separar-se em tradicionais e recentes. Importa referir ainda que existem outras técnicas de reparação para falhas nas uniões de elementos, problemas nos apoios, deficiências de contraventamento, encurvadura, etc, que não serão alvo de estudo nesta dissertação.

2.6.1. Técnicas tradicionais

As técnicas tradicionais resultam geralmente de processos mais simples mas que no entanto demonstram ser eficazes na reconstituição da capacidade resistente original. Dentro das quais se destacam as principais técnicas (CECCOTI *et al.*, 1998):

1. Aplicação de empalmes e talas de madeira;
2. Reparação de fendas com parafusos;
3. Reparação de fendas por cintagem;
4. Adição de novos elementos de estrutura de reforço em madeira;
5. Colocação de elementos e próteses metálicas (chapas e perfis em aço);
6. Aplicação de tirantes de aço;
7. Reparação com betão.

2.6.2. Técnicas recentes

As técnicas recentes geralmente definem-se como sendo aquelas que recorrem a materiais mais recentes. Por esse facto, estas técnicas são sinónimo de custos mais elevados e com exigência de mão-de-obra mais especializada. De entre as varias técnicas recentes de reparação, destacam se as seguintes (CECCOTI *et al.*, 1998):

1. Reparação com adesivo epóxi;
2. Reparação de fendas com varões;
3. Utilização de argamassa de epóxido para aumentar a inércia;
4. Reparação com compósitos de fibras reforçadas com polímeros (FRP);

5. Consolidação de descontinuidades por colocação de armadura distribuída na madeira;
6. Aplicação de tirantes de aço pré-esforçado.

2.7. Principais técnicas de reparação de vigas à flexão

Aqui apresentam-se e descrevem-se as principais técnicas disponíveis para a reparação de vigas de madeira lamelada colada submetidas a esforços de flexão.

2.7.1. Reparação de vigas por aumento da secção com nova madeira

Para os casos em que a secção transversal não apresenta uma capacidade resistente suficiente, pode ser implementada uma solução simples e tradicional que consiste na adição de novas peças que serão ligadas as já existentes (figura 2.17).

- Principal aplicação – Geralmente associada a alteração no uso do elemento, incêndios e ataques biológicos que provoquem a degradação da secção;
- Materiais utilizados – Pregos e/ou parafusos de aço inoxidável, galvanizado ou devidamente protegido da corrosão e madeira devidamente tratada e seca;
- Principais vantagens – Aproveitamento do material original, operação pouco invasiva e solução barata;
- Principais desvantagens – Existência de pré-deformações na peça original em relação a nova.

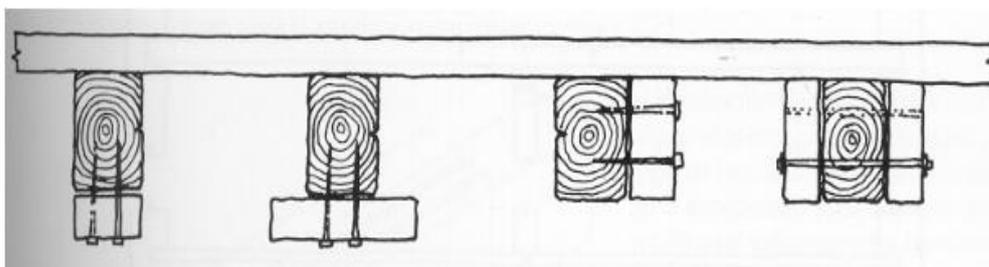


Figura 2.17 – Adição de um novo elemento em madeira (Arriaga et al., 2002)

2.7.2. Reparação por aplicação de empalmes e talas de madeira

Consiste em manter a madeira que não se encontra degradada e substituindo-se as partes deterioradas por novos elementos. A ligação entre os novos e os velhos elementos é estabelecida pela introdução de peças auxiliares como pregos, parafusos, cintas ou cavilhas (figura 2.18).

- Principal aplicação – Geralmente associada a peças danificadas quer por ataques biológicos, fendilhação ou até rotura por cargas excessivas;
- Materiais utilizados – Pregos, cintas metálicas e/ou parafusos de aço inoxidável, galvanizado ou devidamente protegido da corrosão, cavilhas de madeira com grande capacidade resistente e madeira nova devidamente tratada e seca;
- Principais vantagens – Aproveitamento do material original, operação pouco invasiva e barata,
- Principais desvantagens – Necessidade de total extração da madeira danificada, assim como total e eficaz ligação a nova. Utilização de outro material no caso das cintas.

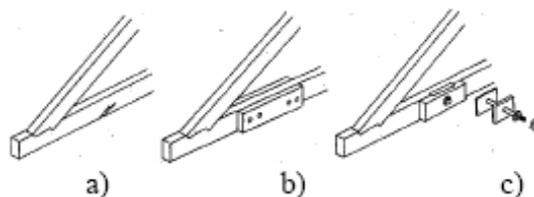


Figura 2.18 – Aplicação de empalmes e talas de madeira (CÓIAS, 2007)

2.7.3. Reparação com epóxi e ligadores mecânicos

A reparação das fendas é efetuada pela introdução de adesivo epóxi juntamente com a colocação de conectores por forma a unir as duas faces desligadas da fenda. No caso de fendas radiais, a colocação dos conectores deve ser com inclinação de forma a maximizar a resistência à flexão destes elementos (ver figura 2.19).

- Principal aplicação – Geralmente associada a fendas provenientes de cargas excessivas ou devido a retração e fluência da madeira;
- Materiais utilizados – Resina epóxi, varões conectores de aço inoxidável, ou outros materiais compósitos;

- Principais vantagens – Aproveitamento do material original, aumento da resistência ao fogo, atmosférico e biológico. Melhoramento do comportamento mecânico do elemento, nomeadamente o acréscimo de rigidez. Solução barata;
- Principais desvantagens – Introdução de materiais diferentes dos originais e não tradicionais. A resistência ao fogo a longo prazo permanece uma incógnita. Alteração da rigidez, alterando a distribuição dos esforços. Técnica com pouca experiência comercial.

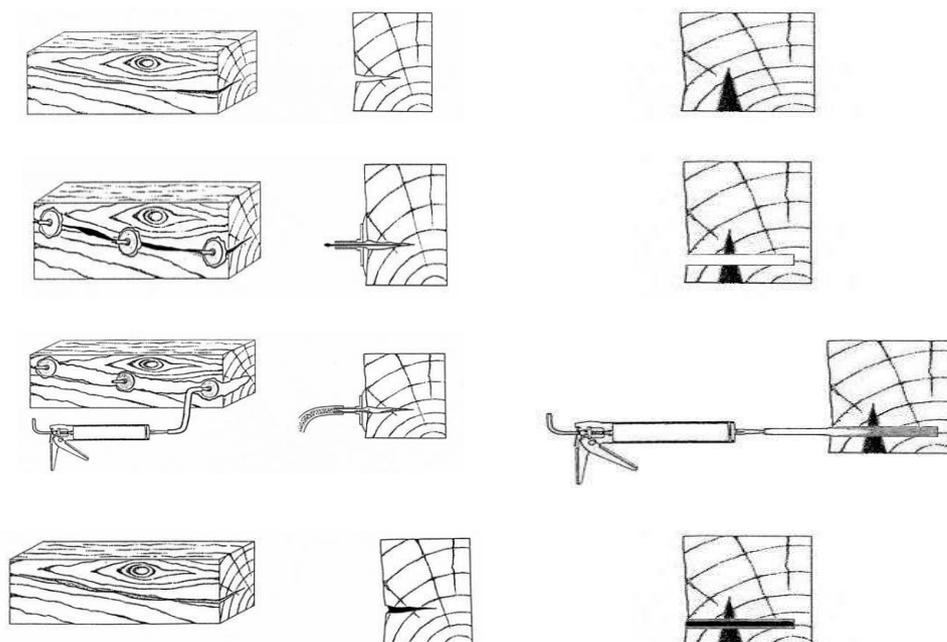


Figura 2.19 – Utilização conjunta de resina epóxi e ligadores mecânicos (ROTAFIX, 2007)

2.7.4. Reparação por cintagem

Utilização de barras metálicas que fecham as fendas por mero aperto. Estas são fixadas por intermédio de pregos electrozincados ou de aço (ver figura 2.20).

- Principal aplicação – Geralmente associado a fendas de topo ou internas, provenientes de cargas excessivas ou devido a retração e fluência da madeira;
- Materiais utilizados – Barras metálicas em aço galvanizado ou devidamente protegido da corrosão, pregos electrozincados ou em aço;
- Principais vantagens – Aproveitamento do material original. Operação pouco invasiva. Solução barata com execução simples e eficaz;

- Principais desvantagens – Introdução de material diferente do original, não tradicional e pouco estético.

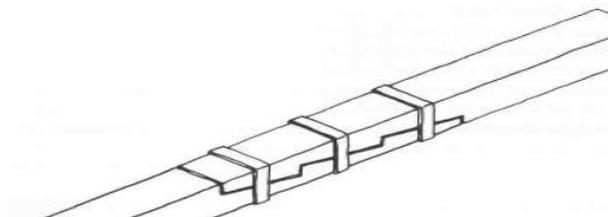


Figura 2.20 – Utilização de cintas metálicas (Arriaga *et al.*, 2002)

2.7.5. Reparação com perfis e chapas metálicas

Solução muito utilizada para reparar peças à flexão, no entanto muito discutida no que toca ao seu comportamento face a incêndios e ao impacto visual que provoca. Emprega-se nas faces deterioradas ou em zonas de rotura da madeira tendo que apresentar uma ampla superfície de pregagem ou aparafusamento. Com isto é possível aumentar a rigidez do elemento, logo a resistência do mesmo (figura 2.21).

- Principal aplicação – Geralmente aplicada a elementos de faces degradadas, ou em faces que apresentem rotura quando sujeitas a flexão, ou para “coser” fendas transversais quando os finger joints entram em rotura;
- Materiais utilizados – Utilizam-se chapas ou perfis laminados de aço inoxidável, galvanizado ou corretamente protegido da corrosão, pregos e/ou parafusos;
- Principais vantagens – Operação pouco invasiva e aproveitamento de material original. Solução relativamente barata;
- Principais desvantagens – Introdução de materiais diferentes dos originais.

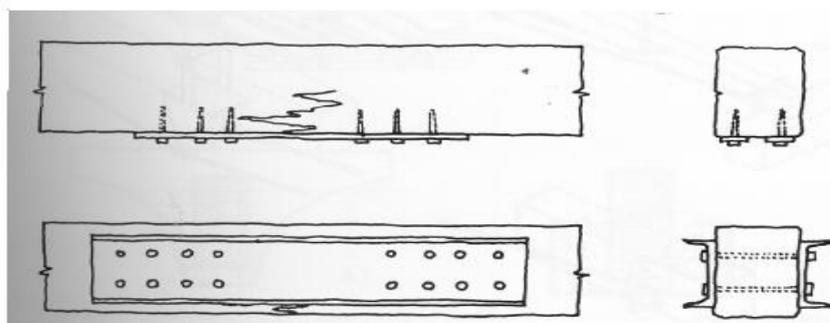


Figura 2.21 – Aplicação de chapas e perfis (BARBISAN e LANNER, 2000)

2.7.6. Reparação com armaduras longitudinais ou chapas de face recorrendo a laminados de fibras reforçadas com polímeros

Consiste na ligação do reforço ao elemento em madeira. A ligação pode ser efetuada para a face tracionada e para a comprimida. Para o caso de se optar por armadura longitudinal, esta deve ser inserida em ranhuras e preenchendo os espaços vazios com composto epóxico por forma a garantir a ligação entre a armadura e o elemento em madeira. Não são apenas utilizadas fibras de carbono mas também fibras de vidro e varões metálicos para reparar elementos em madeira (ver figura 2.22).

- Principal aplicação – Geralmente aplicada a casos em que o elemento apresenta uma secção reduzida para fazer face aos esforços atuantes, fendas longitudinais ou transversais, alteração das propriedades do material e deformações excessivas;
- Materiais utilizados – Utilizam-se fibras reforçadas com polímeros, varões metálicos e resina epóxi para aderir os diferentes materiais;
- Principais vantagens – Operação pouco invasiva e aproveitamento de material original;
- Principais desvantagens – Introdução de materiais diferentes dos originais que provocam a alteração da distribuição de esforços e rigidez. Solução cara que requer mão-de-obra muito especializada.

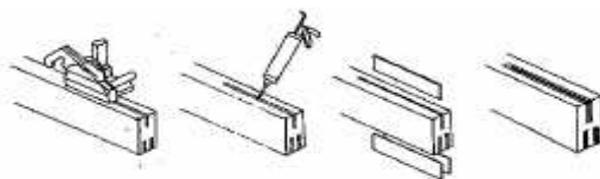


Figura 2.22 – Aplicação de fibras reforçadas com polímeros (Arriaga *et al.*, 2002)

2.7.7. Reparação com tirantes metálicos

Esta solução consiste na aplicação de tirantes de aço ou aço pré-esforçado que permite a redução da deformação do elemento e ao mesmo tempo melhorar as condições de tensão da secção, ficando o tirante tracionado e a viga comprimida. No caso da utilização de cabos de

pré-esforço, a sua aplicação pretende anular a flexa inicial, diminuindo as trações através de uma pré compressão da secção transversal. Obtém-se assim um aumento da sua capacidade resistente. No entanto será necessária uma correta ancoragem dos cabos nas extremidades do elemento a reparar (figura 2.23).

- Principal aplicação – Geralmente associada a elementos com secção reduzida, alterada, com deformação excessiva e/ou que apresente fendas tanto horizontais como longitudinais. Normalmente provenientes de excesso de carga aplicada ao elemento ou degradação do mesmo;
- Materiais utilizados – Chapas de ancoragem, varões de aço, varões ou cabos de pré-esforço. O aço deverá ser galvanizado ou devidamente protegido da corrosão;
- Principais vantagens – Operação pouco invasiva e aproveitamento de material original;
- Principais desvantagens – Introdução de materiais diferentes dos originais e necessita de mão-de-obra especializada. Solução cara.

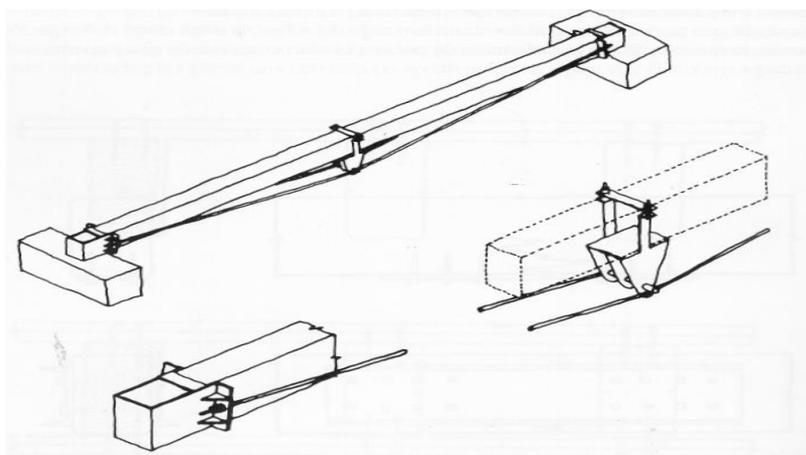


Figura 2.23 – Aplicação de tirantes metálicos (Arriaga *et al.*, 2002)

2.8. Relação Dano/Solução

Apresenta-se de forma resumida as diversas soluções referidas no ponto 2.7 e o respetivo dano. Pretende-se desta forma sintetizar as diversas opções disponíveis para os projetistas com vista à reparação de vigas de madeira lamelada colada submetidas a esforços de flexão que se encontrem danificadas (quadro 2.2).

Quadro 1.2 – Relação dano/técnica de reparação

Dano	Técnica de reparação
Fendas longitudinais	Reparação com ligadores mecânicos Reparação por cintagem Selagem e injeção de resina epóxi Reparação com perfis ou chapas Reparação com tirantes metálicos e pré-esforço
Fendas transversais	Reparação com ligadores mecânicos Selagem e injeção de resina epóxi Reparação com perfis ou chapas Reparação com tirantes metálicos e pré-esforço
Alteração da secção transversal	Reparação com ligadores mecânicos Selagem e injeção de resina epóxi Aumento da secção transversal com nova madeira Aplicação de empalmes Aplicação de armadura longitudinal ou laminados de fibras reforçadas Reparação com perfis ou chapas metálicas Reparação com tirantes metálicos e pré-esforço Substituição de madeira por perfis metálicos
Deformação excessiva	Reparação com ligadores mecânicos Aplicação de tirantes metálicos e pré-esforço Aplicação de armadura longitudinal ou laminados de fibras reforçadas
Alteração das propriedades mecânicas	Todas as técnicas mencionadas, uma vez que a perda de resistência leva a estrutura a sofrer os outros danos acima referidos.

2.9. Técnica de reparação recorrendo a ligadores mecânicos com aplicação de resina epóxi

Da análise do quadro resumo acima descrito que relaciona os danos mais comuns que as vigas podem sofrer com as técnicas de reparação de vigas sujeitas a flexão, facilmente se verifica que a técnica que está mais presente é aquela que recorre à aplicação de ligadores mecânicos com refechamento das fendas com resina epóxi. Esta técnica para além de ser relativamente económica e não necessitar de mão-de-obra especializada, permite cobrir a maioria das necessidades de reparação.

Mais se verifica que os danos mais comuns são a abertura de fendas transversais e longitudinais (figura 2.24) e a degradação da secção transversal, e nestes dois casos a utilização desta técnica permite a ligação de ambas as faces de uma fenda como possibilita a adição de um novo elemento em madeira.



Figura 2.24 – Dano mais comum em vigas de madeira sujeitas à flexão

2.9.1. Descrição detalhada da técnica

Em seguida procede-se à descrição detalhada da técnica mais relevante mencionada no ponto 2.9:

1. Limpar as fendas, removendo a poeira através de jato de ar ou aspiração;
2. Fissuras superiores a 5 mm devem ser preenchidas com composto epóxi, no entanto se a fissura penetrar pelo menos 30% da secção transversal será necessário colocação de conector para ligar ambas as faces da fenda;

3. Deverão ser calculados o número, diâmetro, comprimento e espaçamento de varões por forma a serem capazes de suportar a tensão de corte e evitar rotura longitudinal do elemento. O mesmo poderá ser obtido experimentalmente recorrendo a ensaio de flexão de forma iterativa. Os ligadores podem ser em aço, aço inoxidável, fibra de carbono e vidro. No caso de aplicação dos últimos, estes poderão estar envolvidos por resina epóxi (glued-in rods);
4. Remover excesso de resina e fazer acabamento (cuidados estéticos).

Aplicações, vantagens e inconvenientes já foram mencionados anteriormente nas principais técnicas de reparação (ponto 2.7.3).

2.9.2. Metodologia de cálculo

Seguindo a hipótese de Navier Bernoulli, uma viga maciça que apresente uma secção transversal qualquer, dispõe de uma distribuição contínua de tensões e deformações longitudinais ao longo da sua altura (figura 2.25a). Por outro lado, para elementos sobrepostos independentes formando uma mesma secção transversal (sem conector a ligar as diferentes faces), a distribuição das tensões e deformações apenas é contínua ao longo da altura de cada elemento (figura 2.25b).

Ainda para o caso de elementos sobrepostos mas que desta vez se apresentem interligados, os conectores (ligadores mecânicos) vão limitar os deslizamentos relativos entre as faces dos respetivos elementos (interação). A distribuição das tensões e deformações ainda que apresentem descontinuidades nas faces em contacto são inferiores às descontinuidades verificadas para elementos independentes (sem conexão – sem interação) tal como indica a figura 2.25c.

Assim importa salientar que o comportamento intermédio da secção transversal (conexão parcial – interação parcial) é diretamente proporcional à rigidez dos elementos de conexão. Sendo estes deformáveis (ligação elástica) onde após a deformação imposta pela flexão, irão ocorrer deslizamentos relativos entre as faces em contacto dos elementos constituintes da secção transversal. Assim, a inércia das secções ligadas por conexão passa a ter apenas uma percentagem das secções maciças. Essa percentagem dependerá da geometria da mesma secção e da rigidez da ligação. Importa ainda referir que o cenário ideal seria obter uma

ligação infinitamente rígida onde não surgiriam deslizamentos relativos entre ambas as faces na união dos dois elementos que constituem a secção transversal.

A interação da secção é garantida pela transmissão dos esforços rasantes pelos elementos de ligação. Esses elementos devem ser capazes de suportar as tensões de corte presentes na zona de união (figura 2.25d) (ALVIM, 2002).

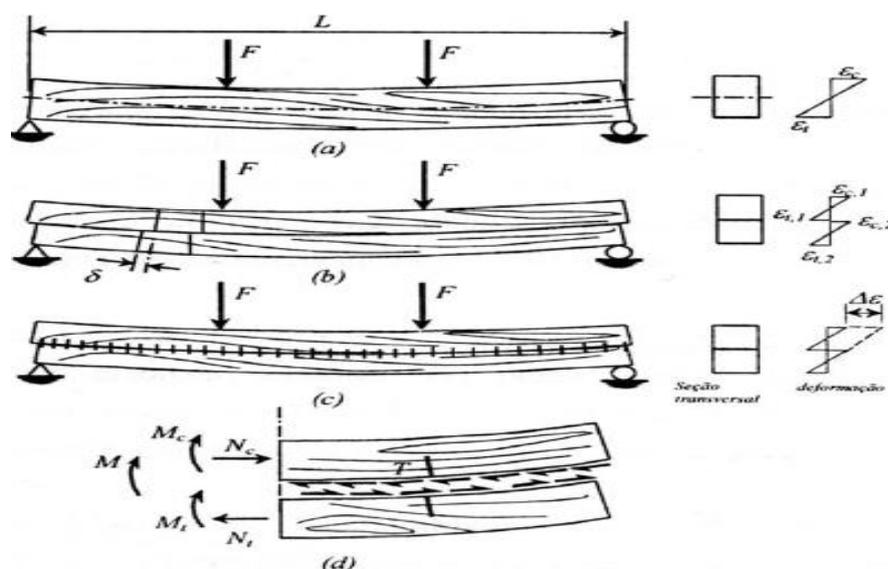


Figura 2.25 – Viga sujeita à flexão. a) Secção maciça; b) Elementos sobrepostos desligados; c) Elementos sobrepostos ligados; d) Esforços internos (ALVIM, 2002)

Assim, fica explícita a necessidade de critérios para o dimensionamento de elementos de madeira formados por secções compostas como se verá mais a frente. Para o seu dimensionamento irá ser apenas considerado o estipulado pelo Eurocódigo 5

2.9.3. Dimensionamento segundo o Eurocódigo 5

O anexo B do Eurocódigo 5 apresenta o critério de dimensionamento para vigas compostas, ligadas por conectores metálicos (ligações flexíveis). O modelo adotado consiste na análise das vigas como sendo formadas por elementos em equilíbrio e utilizando equações de compatibilidade de deslocamentos.

O modelo de cálculo é um método simplificado de análise que se baseia na teoria da elasticidade linear e nas seguintes hipóteses:

- As uniões são contínuas e uniformemente distribuídas, apresentando as mesmas propriedades mecânicas em todo comprimento da viga;
- O deslocamento relativo entre as faces dos elementos em contacto é proporcional ao esforço atuante na conexão;
- As flechas dos elementos da viga composta são sempre os mesmos em qualquer que seja a sua posição ao longo do vão;
- A distribuição das deformações ao longo da secção transversal é linear;
- Os elementos constituintes da viga composta seguem a lei de Hooke;
- Desprezadas as deformações produzidas pelo esforço tangencial para cálculo dos deslocamentos da secção transversal;
- As vigas simplesmente apoiadas apresentam um vão l . Para vigas contínuas, utiliza-se l igual a 0,8 do vão considerado e para vigas em consola, utiliza-se l igual ao dobro do vão considerado;
- As diferentes partes constituintes (madeira, placas de derivados da madeira) são inteiras ou são unidas por ligações coladas de topo;
- O espaçamento s entre ligadores é constante ou varia uniformemente em função do esforço transversal entre s_{min} e s_{max} , com $s_{max} \leq 4s_{min}$ (figura 2.26);
- As diferentes partes constituintes da secção transversal são ligadas entre si por ligadores metálicos com um módulo de deslizamento K ;
- O módulo K é a relação entre a força atuante e o deslocamento u relativo entre os elementos constituintes da secção transversal (figura 2.26);
- A força aplicada segundo a direção z origina um momento fletor $M = M(x)$ de variação sinusoidal ou parabólica e um esforço transversal $V = V(x)$.

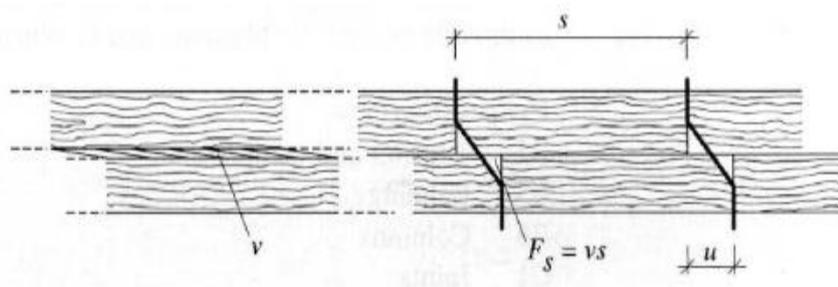


Figura 2.26 – Deslocamento e força de corte entre dois elementos (KREUZINGER, 1995)

Sendo:

$$v = \frac{F_s}{S} \quad (2.1)$$

$$C = \frac{K}{s} \quad (2.2)$$

$$v = Cu \quad (2.3)$$

Onde v é o fluxo de esforço rasante atuante na superfície de contacto das faces dos elementos constituintes da secção (N/mm); F_s é a força actuante no conector (N); u é o deslocamento da ligação (mm); K é o módulo de deslizamento (N/mm); e, C é a rigidez da ligação (N/mm²).

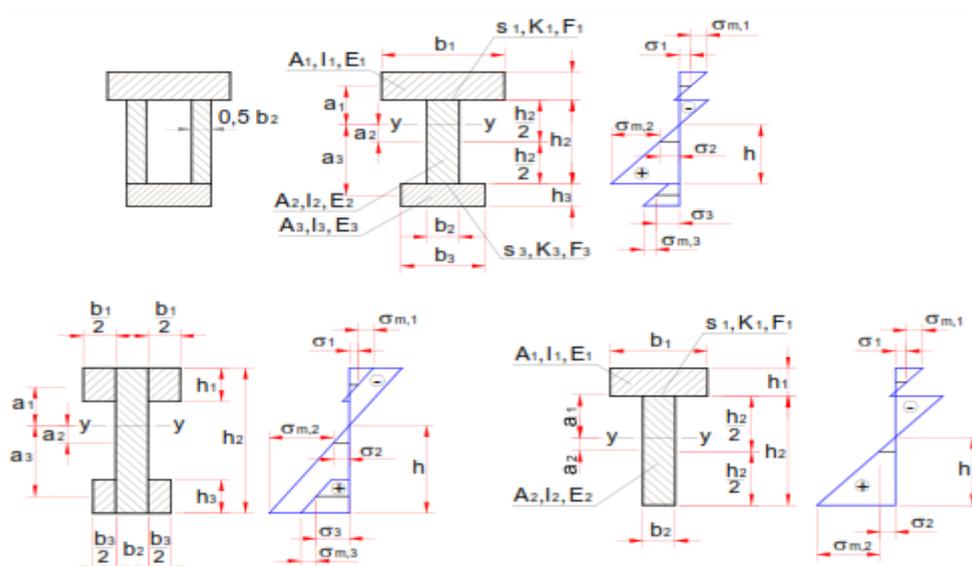


Figura 2.27 – Secções transversais e distribuição de tensões de acordo com o Eurocódigo 5

Apresenta-se em detalhe o esquema utilizado para o método de análise simplificado proposto pelo Eurocódigo 5 para obtenção das respetivas equações (ver figura 2.28).

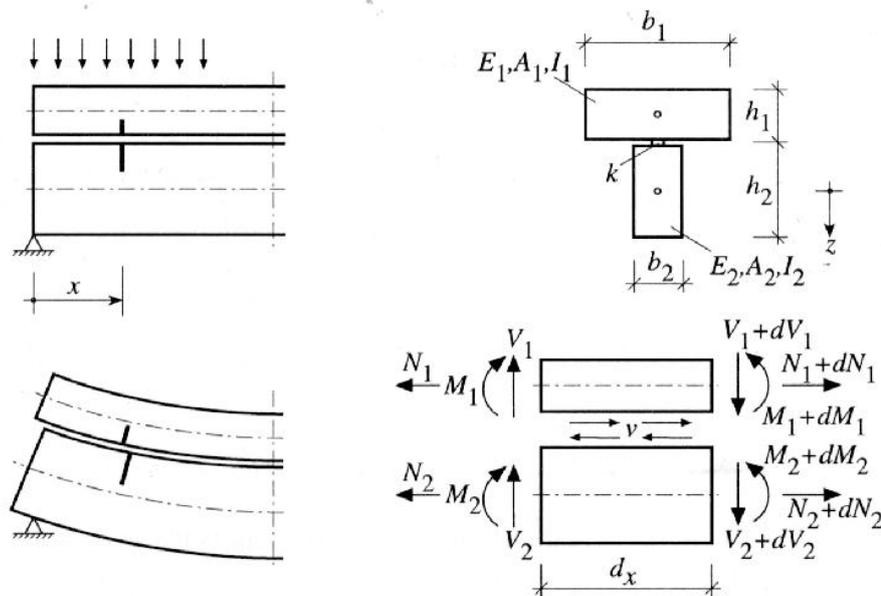


Figura 2.28 – Detalhe de uma viga composta e configuração de equilíbrio de um elemento (KREUZINGER, 1995)

2.9.3.1 Rigidez da ligação

Como já referido anteriormente, no instante em que uma determinada viga composta é solicitada por ações externas, é introduzido um esforço rasante na zona de ligação entre as faces em contacto que tem como função transmitir esse esforço às referidas faces. No entanto, os elementos que efetuam a ligação não apresentam um comportamento infinitamente rígido, verificando-se um deslizamento relativo entre os elementos sobrepostos, assim como a deformação dos conectores (comportamento elástico). Esse deslizamento em função da rigidez da ligação entre os elementos provoca assim uma diminuição das propriedades mecânicas da secção. É sabido ainda que a rigidez das ligações é influenciada por fatores como: o tipo de ligação, espaçamento, resistência e elasticidade da madeira utilizada.

O comportamento da ligação (madeira mais conector) pode ser descrito pelo Módulo de Deslizamento K .

Autores como EHLBECK e LARSEN (1991), indicam que o Eurocódigo 5 utiliza dois valores de Módulo de Deslizamento, um deles a ser utilizado no dimensionamento para os Estados Limites Últimos, K_u , e outro a ser utilizado no dimensionamento para os Estados Limites de Utilização, K_{ser} . K_{ser} é visto como a secante da curva carga – deslocamento para uma carga de aproximadamente 40% da carga máxima F_{max} (figura 27), sendo que para valores de carga inferiores a esse ponto (0 a $0,4 F_{max}$) se considera uma relação linear entre a

força aplicada e o deslocamento a ela associado. De salientar ainda que o ponto $0,4 F_{max}$ corresponde ao deslocamento instantâneo u_{inst} sofrido pelo elemento de ligação. Por outro lado, K_u é visto como a secante da curva carga – deslocamento para uma carga de aproximadamente 60 a 70% de F_{max} (figura 2.29). Por simplificação, para dimensionamento, K_u pode ser considerado $2/3$ de K_{ser} .

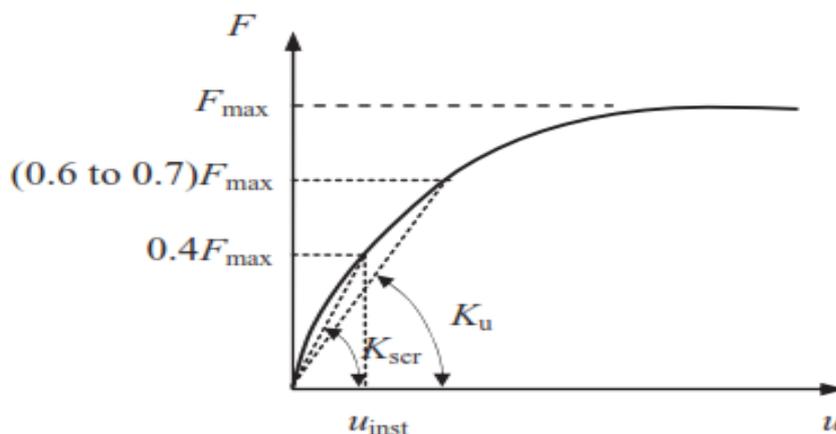


Figura 2.29 – Módulo de Deslizamento secante (CEN, 2004)

Ehlbeck e Larsen (1991) indicam uma expressão empírica para estimar o valor do módulo de Deslizamento para os Estados Limites de Utilização, K_{ser} também presente no Eurocódigo 5 (expressão 2.4).

$$K_{ser} = \frac{\rho_k^{1,5} \cdot d}{20} \quad (2.4)$$

Onde d é o diâmetro do elemento de ligação em mm e ρ_k é o valor da massa volúmica da madeira em kg/m^3 . Se as peças que constituem a secção forem de madeiras diferentes, deve-se utilizar $\rho_k = \sqrt{\rho_{k_1} \cdot \rho_{k_2}}$ (EHLBECK e LARSEN, 1991).

2.9.3.2 Rigidez efetiva de flexão

Após o cálculo o Módulo de Deslizamento é então possível calcular a rigidez efetiva de flexão através da expressão 2.5.

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (2.5)$$

Sendo que:

$$A_i = b_i \cdot h_i \quad (2.6)$$

$$I_i = \frac{b_i h_i^3}{12} \quad (2.7)$$

$$\gamma_i = \left[1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i}{K_i L^2} \right]^{-1} \text{ para } i = 1 \text{ e } 3, \gamma_2 = 1 \quad (2.8)$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i E_i A_i}, \quad 0 < a_2 < \frac{h_2}{2} \quad (2.9)$$

$$a_1 = \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) - a_2 \quad (2.10)$$

$$a_3 = \left(\frac{h_2 + h_3}{2} \right) - a_2 \quad (2.11)$$

$$s_{ef} = 0,75s_{min} + 0,25s_{max} \quad (2.12)$$

Onde E_i é o módulo de elasticidade de cada elemento da secção transversal; A_i é área de cada elemento constituinte da secção transversal; I_i é a inercia de cada elemento constituinte da secção transversal; γ_i é o fator de redução de inercia; a_i é a distância ente o centro de gravidade de cada elemento ao eixo neutro y-y da secção; s_i é o espaçamento dos elementos de ligação na interface do elemento i com o elemento 2; L é o vão efectivo da viga; K_i é o módulo de deslizamento da ligação entre o elemento i e o elemento 2; $K_i = K_{ser,i}$ para os Estados Limites de Utilização; $K_i = K_{u,i}$ para os Estados Limites Últimos; h_i é a altura de cada elemento que constitui a secção transversal; e b_i é a largura de cada elemento que constitui a secção transversal.

Nota: só existe $i = 3$ se a secção for composta por três elementos. Para o caso em que apenas é formada o dois elementos, todos os termos com $i = 3$ serão nulos (ver figura 2.27) (CEN, 2004).

2.9.3.3 Tensões normais

O cálculo das tensões normais atuantes para qualquer secção ao longo de determinado elemento, bem como na sua zona de ligação das faces em contacto (condicionada pela deslizamento) é dada por:

$$\sigma_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (2.13)$$

$$\sigma_{m,i} = 0,5 \cdot E_i \cdot h_i \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (2.14)$$

Onde M é o momento flector actuante; σ_i é a tensão ao nível do centro geométrico de cada elemento da secção transversal (figura 2.27); e $\sigma_{m,i}$ é tensões nas extremidades dos elementos da secção transversal (ver figura 2.27).

As tensões totais de compressão e/ou tração são dadas em qualquer elemento da secção transversal pela soma de $\sigma_i + \sigma_{m,i}$ (ver figura 2.27) (CEN, 2004).

2.9.3.4 Tensões tangenciais máximas

As tensões tangenciais são máximas para o elemento em alma (considera-se a alma como o elemento 2) onde as tensões normais são nulas (ver figura 2.30). Para o cálculo das tensões tangenciais é utilizada a seguinte expressão:

$$\tau_{2,max} = (\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0,5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h_2^2) \cdot \frac{V}{b_2 \cdot EI_{ef}} \quad (2.15)$$

Onde V é a força rasante máxima (CEN, 2004).

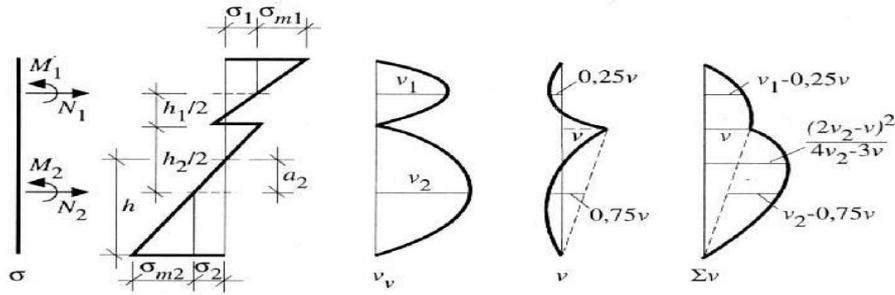


Figura 2.30 – Distribuição de tensões (KREUZINGER, 1995)

2.9.3.5 Forças nos ligadores

Os conectores terão que ser capazes de resistir ao esforço rasante, independentemente da flexibilidade dos mesmos. A expressão que garante a transmissão do esforço entre os elementos da secção transversal e assim evitar a rotura dos mesmos é a seguinte:

$$F_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i \cdot s_i \cdot \frac{V}{(EI)_{ef}} \text{ para } i = 1 \text{ e } 3 \quad (2.16)$$

Onde $s_i = s_i(x)$ é o espaçamento entre os ligadores definido no ponto 2.9.3 (CEN, 2004).

CAPÍTULO III

3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE TÉCNICAS DE REPARAÇÃO À FLEXÃO DE VIGAS DE MLC

Pretende-se avaliar experimentalmente a eficiência de duas técnicas de reparação à flexão de vigas de madeira lamelada colada selecionadas a partir da revisão bibliográfica apresentada no capítulo anterior.

Para o efeito, planeou-se uma campanha experimental composta por ensaios de flexão que se podem dividir em duas fases:

1. Inicialmente, pretende-se avaliar o comportamento de vigas de referência, intactas, bem como de vigas compostas utilizando diferentes técnicas de ligação entre as duas secções transversais independentes, simulando, assim, a reparação de uma fenda longitudinal contínua ao longo da viga;
2. Na segunda fase, é estudada com maior detalhe uma das técnicas de reparação selecionada com base nos resultados da fase de ensaios precedente.

3.1. Técnicas de reparação de vigas de MLC à flexão em estudo

Qualquer proposta terá que ter em conta que a intervenção de reparação a partir da zona superior de uma viga é um cenário muito difícil, senão impossível, visto que as mesmas normalmente servem de apoio a uma laje.

No âmbito deste trabalho considera-se que as vigas a reparar não apresentam sinal de degradação provocada por agentes biológicos ou atmosféricos, apresentando apenas fendas longitudinais (localizadas sensivelmente a metade da altura da secção transversal).

Considerando ainda que, antes da aplicação de qualquer técnica de reparação, devem ser aliviadas as cargas atuantes sobre a viga.

Com base nos pressupostos acima descritos e claro, tendo a preocupação em controlar os custos, foram selecionadas duas possíveis técnicas de reparação à flexão de vigas de madeira:

a) Parafusos autoperfurantes de rosca completa e b) Varões WB autoperfurantes.

3.2. Procedimentos e esquema de ensaios

Os ensaios de flexão realizados seguem o estipulado pela EN 408:2010, permitindo a quantificação do valor local e global do módulo de elasticidade, $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$, respetivamente, e da resistência à flexão, f_m , das vigas de madeira lamelada colada.

Segundo a norma, o elemento de madeira a ensaiar deverá apresentar um comprimento mínimo, l , total de 19 vezes a altura da secção, h . Apresentando um carregamento à flexão simétrico de dois pontos, $F/2$, num vão de 18 vezes a altura da secção, provocando assim um momento flector constante entre os dois pontos de aplicação do carregamento (terço de vão central entre apoios - $6h$). As condições de ensaio deverão permitir a simulação de uma viga simplesmente apoiada. Todo esquema de ensaio acima descrito encontra-se esquematizado na figura 3.1.

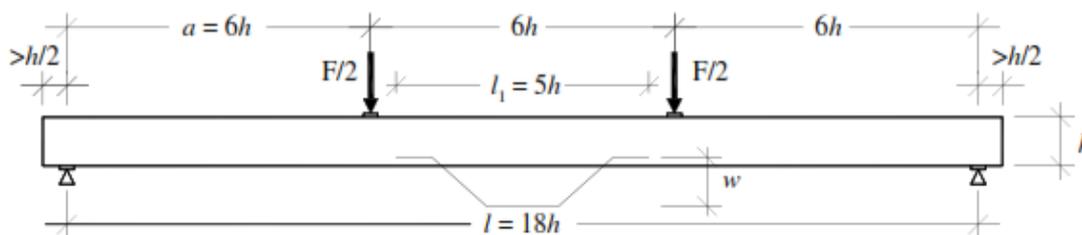


Figura 3.1 – Esquema de ensaio de um elemento à flexão (CEN, 2010a)

A velocidade de aplicação de deslocamento deverá ser constante e não deverá exceder o valor de 0.003 mm/s. A carga máxima aplicada deverá ser alcançada em 300 ± 120 segundos.

A partir dos ensaios pretende-se obter os valores do módulo de elasticidade à flexão, local e global, assim como a sua resistência à flexão. Para a sua obtenção serão tidos em conta os aspetos normativos existentes na norma EN 408:2010.

Assim, para a obtenção do módulo de elasticidade local, $E_{m,l}$, aplica-se a seguinte expressão:

$$E_{m,l} = \frac{a \cdot l_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot I \cdot (w_2 - w_1)} \Leftrightarrow \frac{a \cdot l_1^2 \cdot \Delta F}{16 \cdot I \cdot \Delta w} \quad (3.1)$$

Onde ΔF é o incremento de carga na porção de linha reta do diagrama que relaciona força e deslocamento; Δw é o incremento de deslocamento correspondente (mm); a é a distância entre a posição de ponto de carga e o suporte mais próximo (mm); l_1 é a distância para medição das deformações locais; I é o momento de inércia da secção em estudo (mm⁴).

Este parâmetro corresponde à relação força/deslocamento entre os dois pontos de aplicação de carga, para valores compreendidos entre 10 e 40% da força máxima atuante.

De igual forma, para obtenção do módulo de elasticidade global aplica-se a seguinte expressão:

$$E_{m,g} = \frac{l^3 \cdot \Delta F}{b \cdot h^3 \cdot \Delta w} \left[\left(\frac{3 \cdot a}{4 \cdot l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad (3.2)$$

Onde b é a largura da secção transversal (mm); h é a altura da secção transversal (mm); l é o comprimento do vão (mm).

Este parâmetro corresponde à relação força/deslocamento entre apoios, para valores compreendidos entre 10 e 40% da força máxima atuante.

A resistência à flexão é obtida através da aplicação da carga até a rotura do elemento, sendo dada pela seguinte expressão:

$$f_m = \frac{a \cdot F_{\max}}{2 \cdot W} \quad (3.3)$$

Onde F_{\max} é a forma máxima aplicada no momento em que o elemento atinge a rotura (N); W é o módulo de flexão da secção transversal (mm³).

Para ter em conta o efeito de volume quando as vigas de madeira lamelada colada têm uma altura inferior a 600 mm, os resultados deverão ser multiplicados por:

$$k_{size} = \left(\frac{b}{150}\right)^{0.05} \cdot \left(\frac{h}{600}\right)^{0.1} \quad (3.4)$$

De salientar que todas as vigas ensaiadas pertencem à classe de resistência GL24h de acordo com a NP EN1194:1999 (ver anexo B), apresentando uma secção transversal total 140x400 mm² submetidas a ensaio de flexão de quatro pontos com um vão livre de 3.84 m.

A figura 3.2 apresenta o esquema de ensaio definido para o programa experimental assim como a instrumentação utilizada.

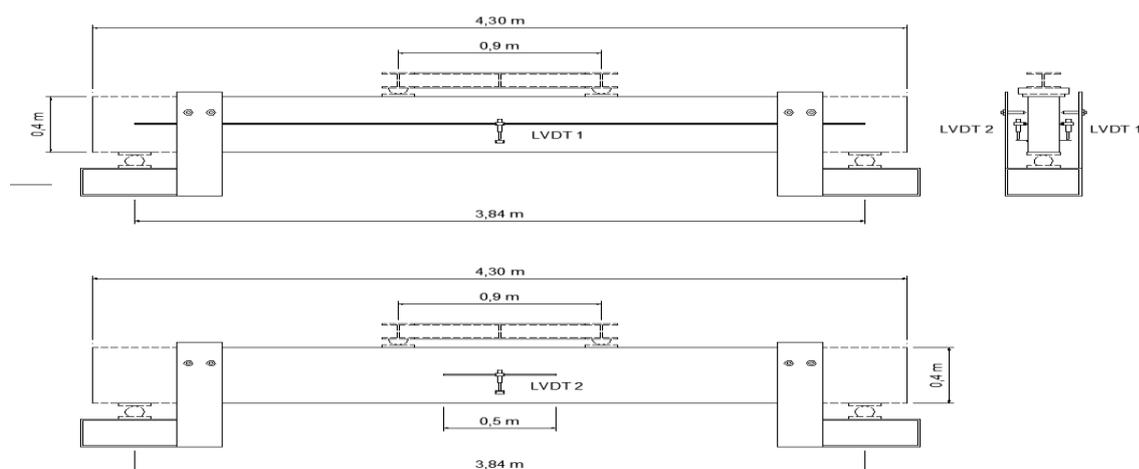


Figura 3.2 – Esquema de ensaio e instrumentação utilizada nos ensaios de flexão

Devido à limitação do equipamento disponível para os ensaios de flexão, e considerando que se decidiu realizar ensaios com vigas que apresentam alguma esbelteza ($400/140=2,86$), o esquema de ensaio, nomeadamente as relações geométricas ($l=18h$), não foram seguidas integralmente pela EN 408:2010 por questões económicas e de espaço disponível para armazenamento do material e realização dos ensaios experimentais (ver figura 3.1). Como a natureza dos ensaios é de cariz comparativo para assim avaliar a eficiência das soluções de reparação, o não seguimento integral da norma não se revela ser um entrave com grande influência nos resultados esperados.

No decorrer dos ensaios foi registada a força aplicada pelo atuador hidráulico através da célula ligada ao mesmo. Foi de igual forma registada a evolução das flechas a meio vão através do LVDT 1 (± 75 mm) e LVDT 2 (± 50 mm), sendo que este último regista a deformação relativa ao tramo central onde os esforços de corte são nulos. A localização dos respetivos instrumentos pode ser visualizada na figura 2, nomeadamente os LVDT's situados a meia secção transversal total para todos os provetes de ensaio. De salientar também a

utilização especial de chapas metálicas nos pontos de atuação de carga e de reação (4 pontos) evitando assim o esmagamento dos provetes nessas zonas. Também de destacar o facto da utilização de barras verticais com parafusos para assegurar a segurança dos técnicos visto que a secção apresenta alguma esbelteza e por isso sujeita a fenómenos de bambeamento a nível do elemento.

Quanto ao procedimento de carga, os ensaios foram efetuados sob deslocamentos constantes a uma velocidade de 0,15 mm/s que prevê um ciclo inicial de carga e descarga de forma a prever um melhor ajuste do material, servindo para calcular o módulo de elasticidade em flexão das vigas. O módulo de elasticidade em flexão (E) e a rigidez das vigas (k) foram quantificados tendo por base o segmento da curva experimental força – deslocamento entre os 0 e os 300 segundos após o ciclo de carga e descarga (figura 3.3).

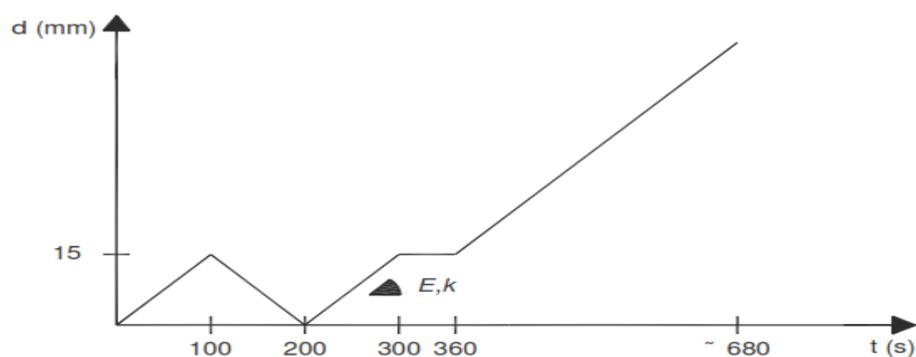


Figura 3.3 – Procedimento de carga adotado nos ensaios de flexão

3.3. Ensaio realizados na primeira fase da campanha experimental

O quadro 3.1 apresenta de forma resumida as vigas ensaiadas na primeira fase de ensaios, bem como a técnica de reparação a elas associadas:

Quadro 3.1 – Quadro resumo das vigas ensaiadas na primeira fase

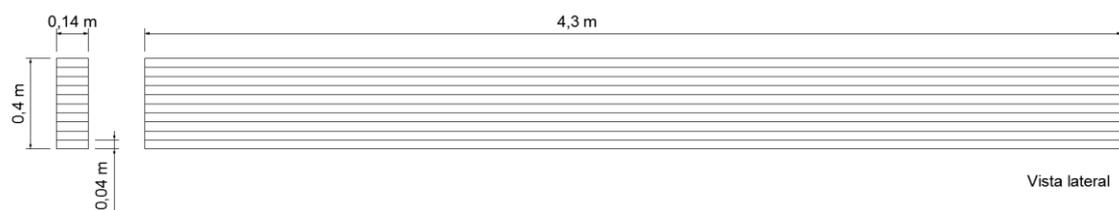
Referência	Viga
V1	Referência
V2	
R1	Reparada com varões WB autoperfurantes
R2	
R3	Reparada com parafusos VGZ autoperfurantes
R4	Reparada com varões WB autoperfurantes e com cola epoxídica

Como verificado no quadro acima, foram ensaiadas 6 vigas de madeira lamelada colada adquiridas como pertencentes à classe resistente GL24h conforme a NP EN1194:1999. Sendo que duas das quais foram ensaiadas como vigas de referência (V1 e V2) com secção transversal 140x400 mm². Em seguida foram ensaiadas duas vigas compostas (R1 e R2) de dois elementos sobrepostos (secção transversal 140x200 mm²), ligados entre si com varões WB 16 da Rothoblaas, formando uma secção transversal 140x400 mm². Uma das vigas compostas (R3) ensaiada foi ligada através de parafusos autoperfurantes VGZ 7x260 da Rothoblaas, formando igualmente uma secção transversal de 140x400 mm². Por fim, uma viga composta (R4) ligada entre si com cola epoxídica MAPEWOOD Gel 120 com posterior colocação varões WB 16 da Rothoblaas. Todos os provetes ensaiados apresentam um vão total de 4300 mm (ver anexo B).

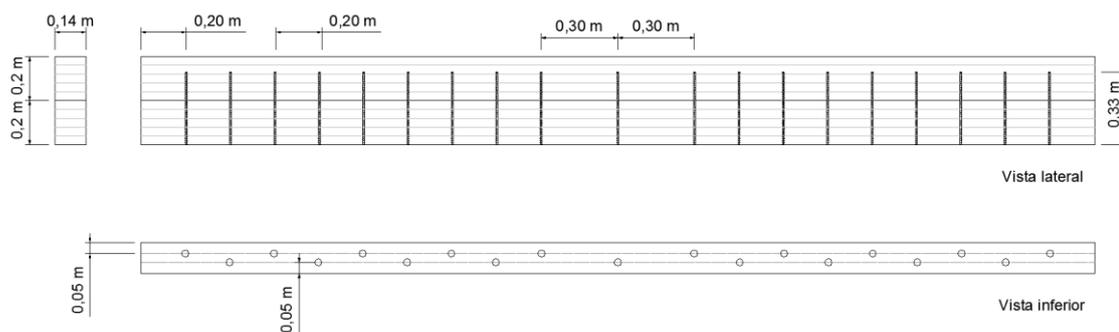
A colocação da cola epoxídica conduz a um aumento significativo da rigidez da viga composta. A união dos elementos com cola serve para simular, quase integralmente, a selagem de fendas existentes nos elementos de madeira a reparar.

Dados complementares relativos aos materiais utilizados, madeira, cola e ligadores metálicos podem ser consultados no anexo B.

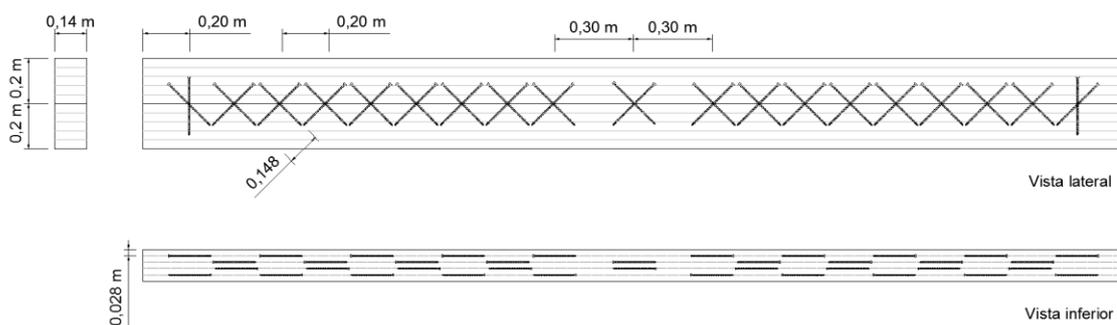
Em seguida são apresentados esquemas representativos das vigas ensaiadas, podendo visualizar-se esquematicamente as vigas de referência (figura 3.4a), as vigas ligadas através de varões WB 16 da Rothoblaas (figura 3.4b) e a viga ligada por parafusos autoperfurantes VGZ 7x260 da Rothoblaas (figura 3.4c).



a)



b)



c)

Figura 3.4 – Esquemas representativos dos provetes. a) Vigas de referência (V1 e V2); b) Vigas ligadas por varões WB 16 da Rothoblaas (R1, R2 e R4); c) Vigas ligadas por parafusos autoperfuradores da Rothoblaas (R3). Dimensões em metro (m)

Importante referir que os esquemas adotados na construção das vigas compostas seguem o know-how disponível na bibliografia de referência. Catálogos do distribuidor e a experiência dos técnicos que auxiliaram a construção dos provetes foram determinantes, procurando assim seguir o seguinte conjunto de regras (CEN, 2004):

- Espaçamento dos ligadores deve ser mais reduzido em zonas correspondentes a esforços de corte mais elevados – tramos extremos;

- São seguidos valores para espaçamentos mínimos sugeridos pelo Eurocódigo 5;
- O comprimento de amarração necessário para mobilizar a resistência axial do material de ligação (varões e/ou parafusos) deve ser de pelo menos 8ϕ – oito vezes o diâmetro do material de ligação;
- Relativamente aos parafusos autoperfurantes de rosca completa, utilizados na construção da viga R3, apresentam um comportamento mais eficiente quando colocados a um ângulo de 45° relativamente à direção do esforço de corte. Ainda relativamente à eficiência da ligação, a colocação mais eficiente corresponde à sua disposição em conjunto de dois “X”;
- Adotar furação em quincôncio, evitando assim a fissuração dos elementos de madeira.

3.3.1. Preparação das vigas compostas

Relativamente à construção das vigas R1 e R2, para proceder à colocação dos varões WB 16 como elemento de ligação, foi necessário efetuar uma pré-furação, que de acordo com o catálogo da Rothoblaas, deverá ser de 12 mm. Quanto à pré-furação, esta foi executada individualmente para cada um dos dois elementos constituintes da secção transversal da viga composta, devido a limitações de equipamentos e ferramentas. Efetuada a pré-furação, procedeu-se à sua limpeza com recurso a ar comprimido para posterior colocação dos varões roscados. Os varões foram colocados e fixados manualmente com recurso a uma chave de roquete e uma ponteira específica, fornecida pela Rothoblaas juntamente com os varões WB 16. Na figura 3.5 são apresentadas algumas fotos representativas da preparação das vigas R1 e R2.



Figura 3.5 – Pormenorização da execução da pré-furação e colocação dos varões WB 16

Para a construção da viga R3, recorreu-se a colocação de parafusos autoperfurantes VGZ como elemento de ligação dos dois elementos constituintes da secção transversal da viga composta. A sua colocação requer no entanto mais cuidados que os varões roscados WB, especialmente por estes terem que ser colocados com um ângulo de 45° relativamente à fenda a uma profundidade de 148 na diagonal (ver figura 3.4c).

A colocação dos parafusos autoperfurantes a 45° é garantida com recurso a um acessório comercializado pela Rothoblaas que permite a colocação de parafusos com ângulos entre 0° e 180° . Como se trata de um acessório dispendioso, optou-se por utilizar uma cunha de madeira cortada com o ângulo necessário. Para a sua fixação como elemento de ligação no interior da secção transversal da viga composta, tal como acontece para os varões WB, a Rothoblaas disponibiliza uma ponteira específica em função do diâmetro do parafuso, permitindo assim a sua fixação à profundidade desejada. Para este caso em concreto, foi utilizada uma ponteira TX 30 com 150 mm de comprimento.

Na figura 3.6 é apresentada uma foto representativa da preparação da viga R3 com a colocação dos parafusos VGZ.

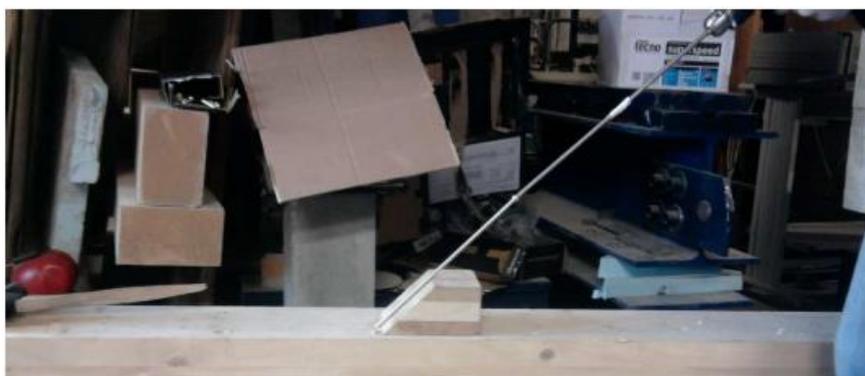


Figura 3.6 – Colocação dos parafusos VGZ 7x260 com ângulo de 45° , com recurso a ponteira TX 30

Por último, a preparação da viga R4, é semelhante ao processo adotado para a construção das vigas R1 e R2. Difere apenas na colagem dos dois elementos constituintes da viga composta com cola epoxídica MAPEWOOD Gel 120, previamente à colocação dos varões roscados WB 16.

De forma a evitar qualquer tipo de interferência entre a cola e os varões WB, os pré-furos de 12 mm foram selados antes da aplicação da cola (ver figura 3.7).



Figura 3.7 – Selagem dos pré-furos com espuma

Após a colagem com aplicação de pressão sobre a secção composta (recurso a 3 serra-juntas), a viga foi deixada num processo de cura durante sete dias para que a cola mobilizasse a totalidade da sua resistência. Após este período de cura da cola, aplicaram-se os varões roscados WB 16 tal como já descrito para as vigas R1 e R2 (figura 3.8).



Figura 3.8 – Aplicação da cola MAPEWOOG Gel 120 e da pressão durante a cura

De salientar que a aplicação de apenas 3 serra-juntas simula a dificuldade existente em obra para introduzir e manter pressão no processo de selagem de fendas.

Encontra-se ainda disponível no anexo C, o pré-dimensionamento do espaçamento dos varões autoperfurantes WB 16 ($S=200$ mm) em função das características da classe de madeira (módulo de elasticidade da massa volúmica) e do próprio varão (diâmetro interno da rosca).

3.3.2. Apresentação e análise dos resultados experimentais

Tal como já referido, os ensaios realizados possibilitam a definição do módulo de elasticidade local, $E_{m,l}$, e global, $E_{m,g}$. O módulo de elasticidade em flexão (E) e a rigidez das vigas (k) foram quantificados tendo por base o segmento da curva experimental força/deslocamento entre os 0 e os 300 segundos, tal como indicado no ponto 3.2, seguindo o estabelecido pela norma EN 408:2010. Esta mesma refere que o incremento de força e o incremento de deslocamento a substituir nas expressões 3.1 e 3.2 terão que ser obtidas através da regressão linear da zona do gráfico força/deslocamento entre 10 e 40% da força máxima aplicada, com aproximação (R^2) igual ou superior a 0,99.

Da substituição nas expressões 3.1 e 3.2 para caracterização do módulo de elasticidade local e global respetivamente, obtém-se os resultados apresentados mais abaixo. Novamente, tal como estabelecido no ponto 3.2, para ter em conta a probabilidade de defeitos existentes num dado material, ou para os provetes ensaiados à flexão que apresentem altura inferior a 600 mm, os resultados deverão ser multiplicados por k_{size} . De notar ainda que para a quantificação do módulo de elasticidade local não foi possível utilizar o incremento de carga entre 10 e 40% da carga máxima aplicada, o que explica o respetivo valor de R^2 ligeiramente inferior a 0,99 estabelecido pela EN 408:2010. Tal se deve ao facto de o LVDT 2 ter sido removido antes de atingida 40% da carga máxima.

Tal como na viga V1, o valor do módulo de elasticidade local definido para a viga V2 apresenta o valor de R^2 inferior ao estipulado pela regulamentação existente, de novo tal pode ser explicado pelo facto de o LVDT 2 ter sido removido antes de atingida 40% da carga máxima.

Os valores dos respetivos módulos de elasticidade das vigas V1 e V2 encontram-se no quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Valores do módulo de elasticidade globais, $E_{m,g}$, das vigas V1 e V2

Viga	Módulo de Elasticidade	Sem considerar k_{size}	Considerando k_{size}
V1	$E_{m,g}$ (MPa)	12706	12159
V2	$E_{m,g}$ (MPa)	14613	13984

Apresentam-se de seguida os resultados dos ensaios em forma das curvas experimentais força – deslocamento para as vigas V1, V2, R1, R2, R3 e R4, facilitando uma posterior análise comparativa (figura 3.9).

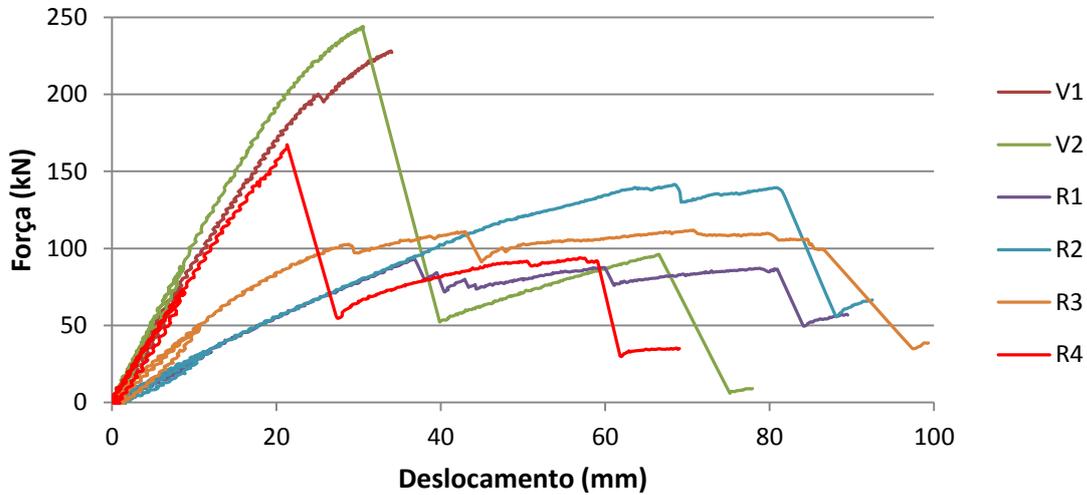


Figura 3.9 – Curvas experimentais força – deslocamento de todas as vigas ensaiadas

Da visualização da figura 3.9, é bastante perceptível na maior parte dos ensaios realizados, uma tendência para um comportamento predominantemente linear do material até a rotura.

Para obtenção do valor da tensão de resistência à flexão (f_m após k_{size}), as vigas foram levadas até à rotura. As observações efetuadas durante o ensaio, referentes ao padrão de rotura encontrado para as vigas são apresentadas no quadro abaixo assim como o valor da força máxima aplicada em cada ensaio (F_{max}) e o respetivo valor do módulo de elasticidade global ($E_{m,g}$ após k_{size}), rigidez (k) e tempo necessário até atingir a rotura (ver quadro 3.3).

Quadro 3.3 – Resultados dos ensaios e observação do padrão de rotura

Viga	Tempo (F_{\max}) (s)	F_{\max} (kN)	k (N/mm)	f_m (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	Padrão de rotura
V1	717	229,2	8940	43,2	12159	Predominante na face de colagem e finger-joints
V2	646	245,3	10009	46,2	13984	Predominante na face de colagem e finger-joints + nó
R1	546	94,2	2741	-	-	Coincidência entre nós e finger-joints (importante deslizamento entre elementos e esmagamento da face superior)
R2	787	142,6	3100	-		Predominante na face de colagem e finger-joints (importante deslizamento entre elementos)
R3	737	114,2	5132	-		Predominante na face de colagem e finger-joints
R4	492	169,2	8655	31,9		Predominante na face de colagem e finger-joints + nó

Da análise das curvas experimentais força – deslocamento (ver figura 3.9) em simultâneo com o quadro 3.3, verifica-se que a técnica de reparação materializada pela colocação dos varões WB16 (vigas R1 e R2) tem um decréscimo significativo da rigidez quando comparadas com as vigas V1 e V2. Em termos de valor da força máxima atingida, as vigas R1 e R2 atingiram valores de 94,22kN e 142,61kN, respetivamente. A variabilidade dos resultados obtidos por esta técnica foi associada a uma execução menos cuidada da viga R1. Esta redução (34% comparativamente com R2), resultado de uma menos cuidada execução deve ser tida em atenção. O uso de parafusos VGZ, avaliado através da viga R3, conduz a menor redução da rigidez (comparativamente com a técnica de reparação anterior) mas uma menor eficiência em termos de valor da força máxima aplicada (114,17kN). De salientar que esta técnica de reparação, pela colocação de parafusos de uma forma mais contínua ao longo do

desenvolvimento da fissura, permite um comportamento mais suave (menos brusco) da fenda. Contudo, os cuidados necessários à sua execução reportados em cima, são importantes desvantagens. A colagem das duas secções transversais previamente à colocação dos varões WB, avaliado através da viga R4, revelou ser a técnica mais eficiente tanto a nível da rigidez da viga composta como no valor da força máxima aplicada (169,18kN).

Para facilitar a análise, é apresentado ainda no quadro 3.4, o decréscimo de carga resistente e rigidez das vigas compostas R1, R2, R3 e R4 em relação as vigas de referência V1 e V2 em forma de percentagem. Sendo que a maior diferença será em relação a viga V2 (maior capacidade resistente) e consequentemente a menor diferença em relação à viga V1 (menor capacidade resistente).

Quadro 3.4 – Comparação dos valores (%) da capacidade resistente e rigidez entre as vigas de referência e as compostas

Viga	Δk_{max}	Δk_{min}	ΔF_{max}	ΔF_{min}
R1	74,1	71,9	61,6	58,9
R2	70,7	68,2	41,9	37,8
R3	51,5	47,4	53,5	50,2
R4	18,1	11,3	31,0	26,2

Na figura 3.10 encontram-se imagens dos padrões representativos das vigas ensaiadas após rotura à flexão.

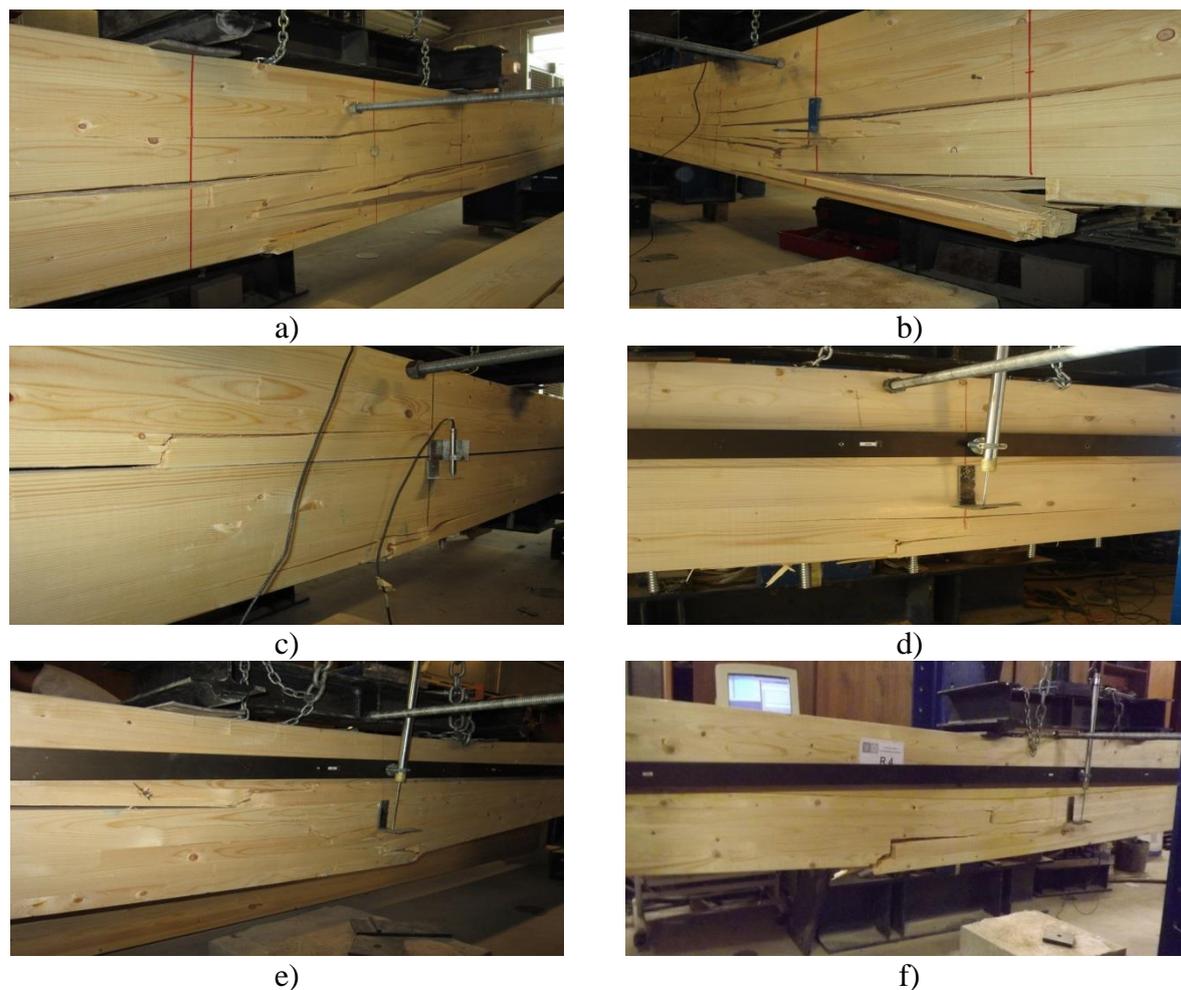


Figura 3.10 – Padrões de rotura das vigas ensaiadas. a) Viga V1; b) Viga V2; c) Viga R1; d) Viga R2; e) Viga R3; f) Viga R4

Informações pormenorizadas sobre os padrões de rotura das vigas ensaiadas encontram-se no anexo D, sob forma de alçados.

3.3.3. Conclusões da primeira fase da campanha experimental

Da análise dos resultados apresentados anteriormente, facilmente se conclui que a técnica que melhor se adequa à reparação das fendas longitudinais, é a que incorpora os varões roscados WB 16 da Rothoblaas. Comparando as vigas R2 (varões roscados WB 16) com a viga R3 (parafusos autoperfurantes da Rothoblaas), verifica-se que a viga R2 apresenta uma capacidade resistente mais significativa que a viga R3 ($\approx 25\%$ superior), embora a sua rigidez seja menor ($\approx 40\%$ inferior). Volta-se a referir o facto de a técnica utilizada para a viga R3 ser

de difícil execução especialmente quando aplicada in-situ, com cuidados significativos a ter em conta, fortalecendo mais uma vez a escolha da técnica adotada com recurso a varões roscados WB 16 da Rothoblaas.

O reduzido valor da rigidez da viga R2 em relação a R3, foi compensado em R4 na qual se complementa a colocação dos varões autoperfurantes WB com cola epoxídica. Esta não só aumentou a capacidade resistente em relação a R2 ($\approx 19\%$ superior) como elevou o valor da rigidez para valores próximos das vigas de referência ($\approx 69\%$ superior a R3).

3.4. Ensaios realizados na segunda fase da campanha experimental

Analisando as roturas observadas na primeira fase dos ensaios de flexão, verifica-se o aparecimento de fendas transversais, perpendiculares à direção de corte. Este fenómeno é designado como sendo uma rotura através dos finger-joints, presente nos padrões de rotura das vigas ensaiadas (V1, V2, R1, R2, R3 e R4), com especial destaque para as vigas que apresentaram maior rigidez à flexão (V1, V2 e R4) onde o seu aparecimento foi mais notório (aparecimento de maior número de finger joints rompidos). Como as soluções adotadas para a reparação de fendas longitudinais não se revela eficaz quanto a este modo de rotura, decidiu-se complementar a técnica com melhor comportamento à flexão utilizada na primeira fase dos ensaios, tornando-a assim mais eficaz na reparação de todos os padrões de rotura que as vigas em madeira lamelada colada apresentaram.

O quadro 3.5 apresenta de forma resumida as vigas ensaiadas na segunda fase de ensaios, bem como a técnica de reparação a elas associadas:

Quadro 3.5 – Quadro resumo das vigas ensaiadas na segunda fase da campanha experimental

Ref.	Viga
V1R	Reparação com varões WB autoperfurantes, varões roscados e com cola epoxídica
V2R	
R4R	

Foram ensaiadas 3 vigas de madeira lamelada colada adquiridas como pertencentes à classe resistente GL24h conforme a NP EN1194:1999. Sendo que as vigas ensaiadas a partir das vigas de referência V1 e V2 passam a designar-se por V1R e V2R (secção transversal $140 \times 400 \text{ mm}^2$), respetivamente. Para fechar as fendas das vigas V1R e V2R, foi utilizado o mesmo processo adotado para a viga R4, selando as fendas com recurso a cola epoxídica MAPEWOOD Gel 120 (aumento da rigidez do elemento) e posterior fixação de varões autoperfurantes WB 16 da Rothoblaas, apenas complementado com a colocação de varões roscados da classe 8.8 (na horizontal) nas zonas da rotura dos finger-joints fixados com cola epoxídica MAPEWOOD Paste 140. De igual modo, a viga ensaiada a partir da viga composta R4, passa a designar-se R4R (secção transversal total $140 \times 400 \text{ mm}^2$). A viga RR4 apresenta um esquema em tudo igual às vigas V1R e V2R e, tal como na primeira fase de ensaios, todos os provetes ensaiados apresentam um comprimento total de 4300 mm.

De referir novamente que as vigas V1, V2 e R4 foram escolhidas para a segunda fase de ensaios à flexão por apresentarem roturas mais representativas do tipo de rotura (pelo finger-joint).

Mais informações acerca da cola epoxídica MAPEWOOD Paste 140 encontram se no anexo B.

Em seguida é apresentado um esquema representativo das vigas ensaiadas com recurso à técnica adotada para a segunda campanha de ensaios (figura 3.11).

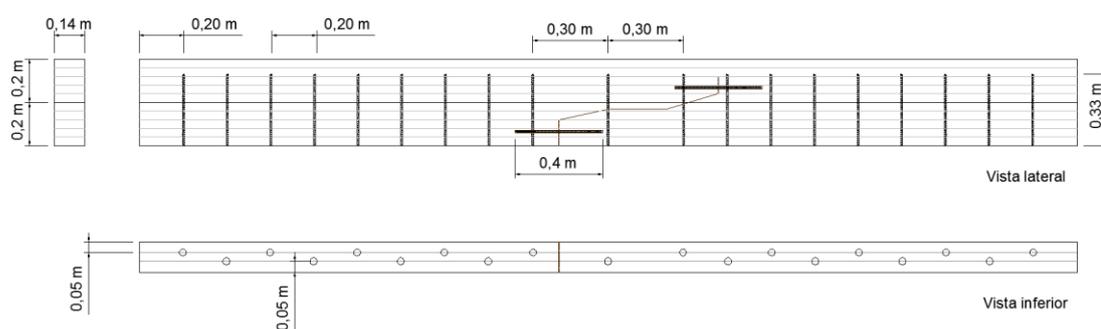


Figura 3.11 – Esquema representativo dos provetes ensaiados, reparados com recurso a varões autoperfurantes WB 16 da Rothoblaas e varões roscados da classe 8.8 (V1R, V2R e R4R)

Para melhor compreender o processo de colocação dos varões roscados 8.8 para reparação da rotura pelo finger-joint, apresenta-se em pormenor a sua localização bem como a distinção entre os diversos materiais e dimensões (figura 3.12).

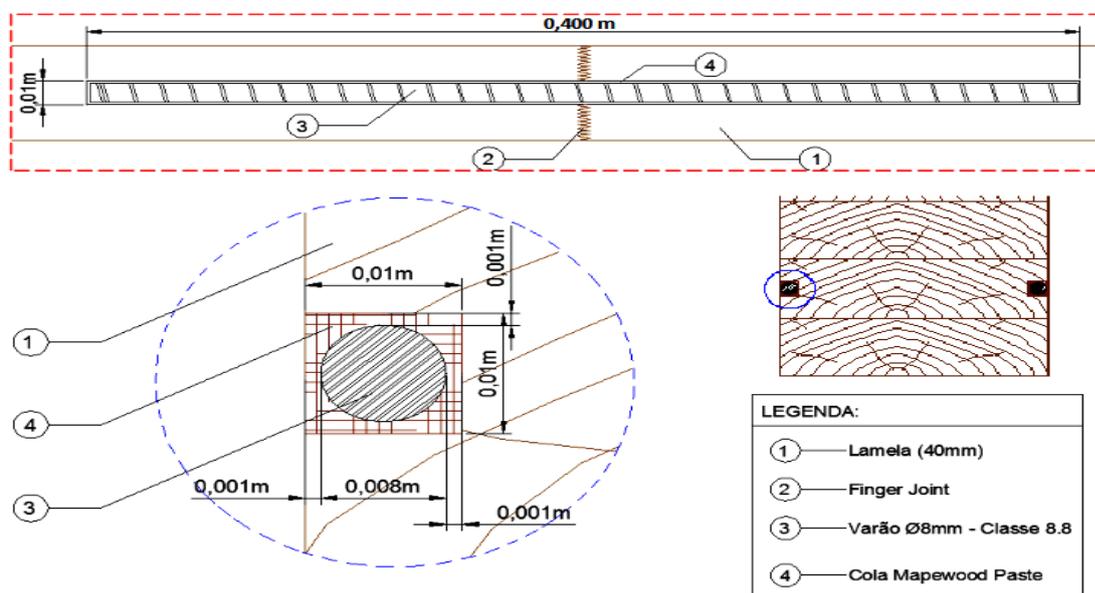


Figura 3.12 – Pormenorização da reparação da rotura pelo finger-joint

É ainda apresentado no anexo E o cálculo que permite chegar ao diâmetro desejável ($\varnothing = 8$ mm) para o varão roscado metálico 8.8, utilizado na reparação dos finger-joints.

Tal como em 3.3, o esquema adotado na construção das vigas reparadas seguem o *know-how* disponível na bibliografia de referência. Catálogos do distribuidor e a experiência dos técnicos que auxiliaram a construção dos provetes foram determinantes, procurando assim seguir o seguinte conjunto de regras (CEN, 2004):

- Espaçamento dos ligadores deve ser mais reduzido em zonas correspondentes a esforços de corte mais elevados – tramos extremos;
- São seguidos valores para espaçamentos mínimos sugeridos pelo Eurocódigo 5;
- O comprimento de amarração necessário para mobilizar a resistência axial do material de ligação (varões e/ou parafusos) deve ser de pelo menos $8\varnothing$ – oito vezes o diâmetro do material de ligação;
- Adotar furação em quincôncio, evitando assim a fissuração dos elementos de madeira.

3.4.1. Preparação das vigas

Relativamente à preparação das vigas V1R e V2R, começa-se por injetar a cola MAPEWOOD Gel 120 em todas as fissuras visíveis (ver figura 3.13a e 3.13b). Após a injeção de cola epoxídica nas fissuras, segue-se a aplicação de pressão (atuador hidráulico e serra-juntas) durante o tempo de cura da cola (ver figura 3.13c e 3.13d). Em seguida executam-se roços com dimensões 10x10x400 mm³ com uma topia, incluindo a sua limpeza para posterior colocação dos varões roscados de 8 mm com comprimento de 400 mm e envolvidos por cola epoxídica MAPEWOOD Paste 140 (ver figura 3.13e e 3.13f). Tendo a cola mobilizando a resistência necessária para a fixação dos varões autoperfurantes WB 16, repete-se o processo de pré-furação e colocação dos varões roscados WB 16 de acordo com o catálogo da Rothoblaas utilizado na preparação das vigas compostas R1, R2 e R4 (ver figura 3.13g e 3.13h). De salientar apenas a necessidade de uma broca com 300 mm de extensão para se proceder à pré-furação, visto que não se trata de vigas compostas como na primeira fase de ensaios. Assim a furacão é efetuada de uma forma contínua até à profundidade desejada de 300 mm.

Quanto à preparação da viga R4R, repetem-se todos os processos descritos na preparação das vigas V1R e V2R, excluindo apenas a necessidade de executar a pré-furação e colocação dos varões roscados WB 16, visto já terem sido anteriormente colocados aquando da preparação da viga composta R4.

Por último, é de ressaltar o facto da aplicação da pressão com recurso ao atuador hidráulico e/ou serra-juntas servir não apenas para a completa selagem das fissuras mas também para retirar a deformação permanente, proveniente da rotura das vigas ensaiadas na primeira campanha de ensaios, ficando assim com um aspeto semelhante ao inicialmente apresentado.

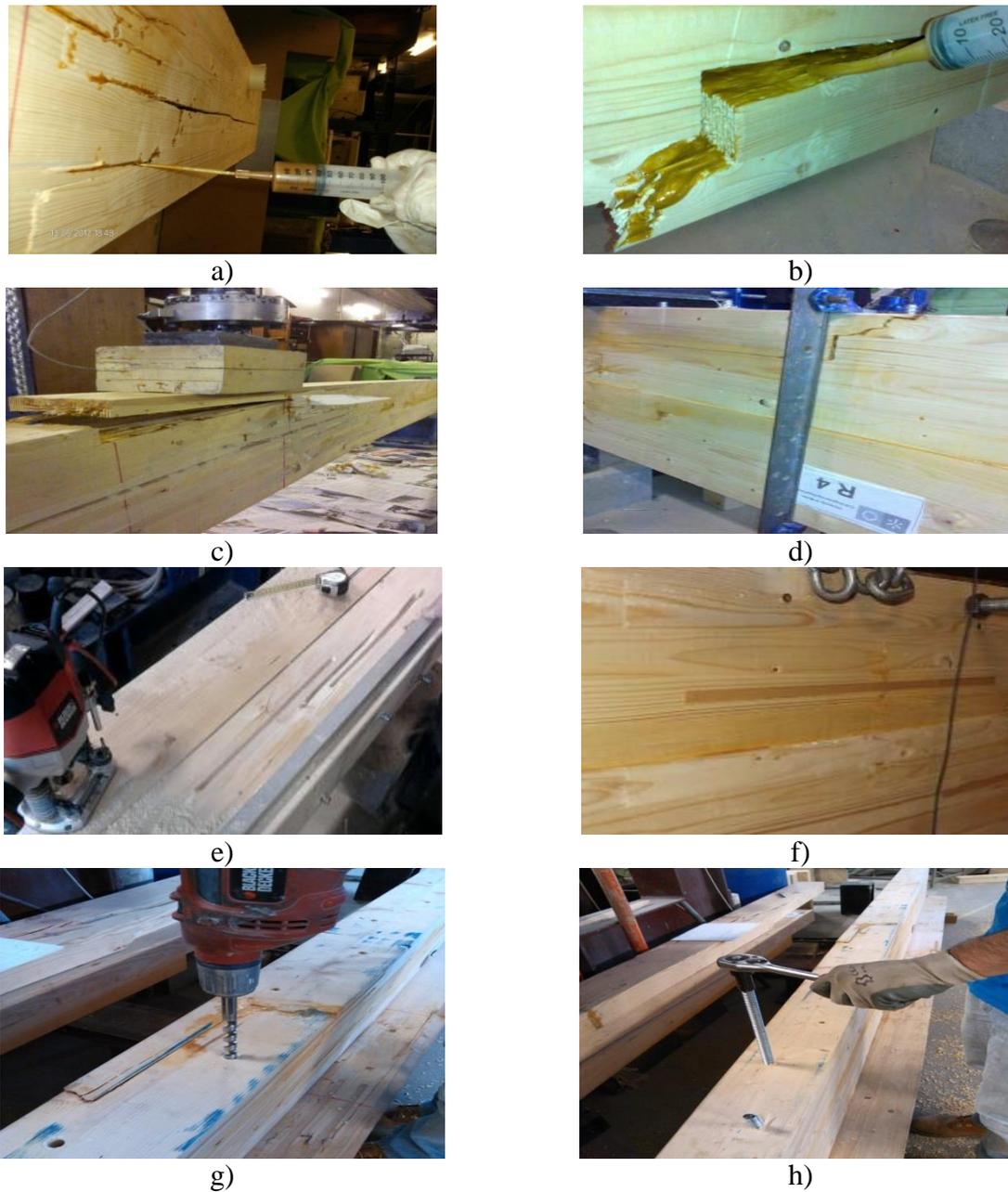


Figura 3.13 – Procedimento de preparação das vigas V1R, V2R e R4R. a) e b) injeção de cola MAPEWOOD Gel 120 nas fissuras; c) e d) aplicação de pressão através de serra-juntas e/ou atuador hidráulico; e) e f) abertura dos roços para inserção do varão roscado 8.8 e posteriormente colado com MAPEWOOD Paste 140; g) e h) pré-furação e colocação dos varões roscados WB 16

3.4.2. Apresentação e análise dos resultados experimentais

Apresentam-se de seguida os resultados dos ensaios sob a forma das curvas experimentais força/deslocamento para as vigas V1, V2, V1R, V2R, R4 e R4R, facilitando uma posterior análise comparativa (ver figura 3.14). A incorporação das curvas relativas às vigas V1, V2 e R4, já ensaiadas na primeira campanha de ensaios, tem por finalidade uma análise mais detalhada daquela que foi a técnica adotada aquando da primeira campanha de ensaios de flexão para reparação das vigas nesta segunda campanha de ensaios. Assim, será possível verificar a redução da capacidade resistente das vigas ensaiadas (V1R, V2R e R4R) relativamente às vigas originais (V1, V2 e R4).

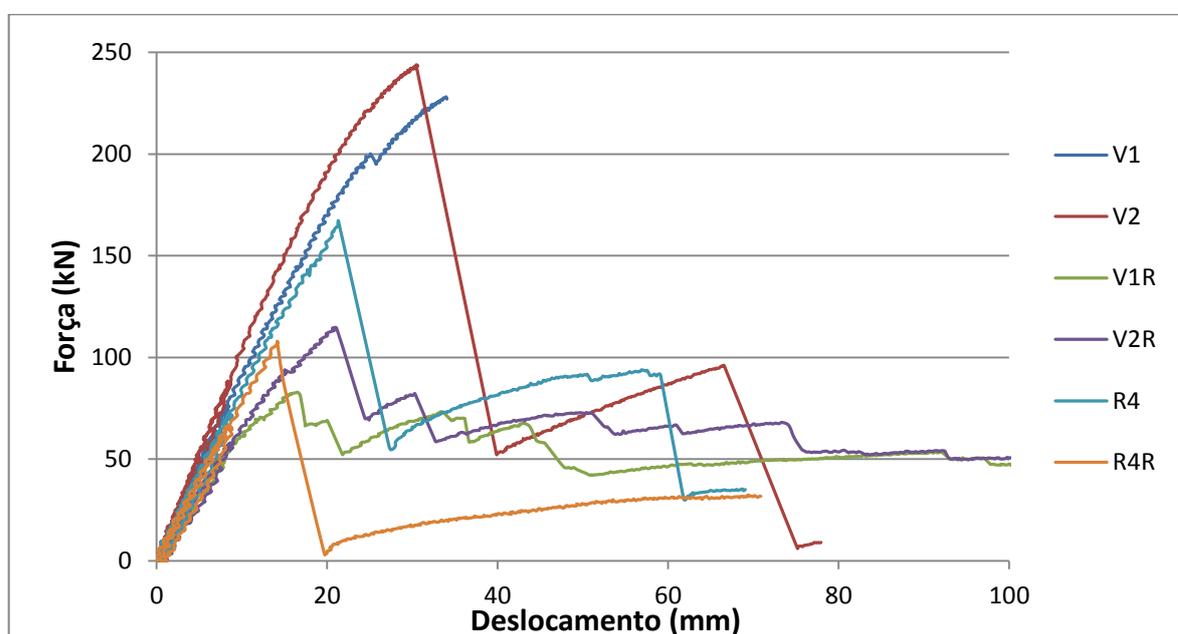


Figura 3.14 – Curvas experimentais força – deslocamento de todas as vigas ensaiadas

Observando a figura 3.14 torna-se fácil avaliar a eficácia da técnica de reparação adotada. É ainda perceptível, da análise das curvas experimentais referentes às vigas ensaiadas na segunda campanha de ensaios realizados (V1R, V2R e R4R), como já esperado, uma tendência para um comportamento predominantemente linear das vigas até a rotura bem como valores da rigidez próximos dos valores das vigas que lhes deram origem (V1, V2 e R4).

As observações efetuadas durante e após o ensaio referente ao padrão de rotura encontrado para cada uma das vigas, são apresentadas no quadro 3.6. Apresentam-se de igual forma, os valores da força máxima aplicada em cada ensaio (F_{max}), assim como o seu respetivo valor do

módulo de elasticidade global ($E_{m,g}$ após k_{size}), rigidez (k), resistência à flexão (f_m) e tempo necessário até atingir a rotura.

Quadro 3.6 – Resultados dos ensaios e padrão de rotura

Viga	Tempo (F_{max}) (s)	F_{max} (kN)	k (N/mm)	f_m (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	Padrão de rotura
V1	717	229,2	8940	43,2	12159	Predominante na face de colagem e finger-joints
V2	646	245,3	10009	46,2	13984	Predominante na face de colagem e finger-joints + nó
R4	492	169,2	8655	31,9	-	Predominante na face de colagem e finger-joints + nó
V1R	444	83,9	6384	15,8		Predominante na face de colagem e finger-joints (deslizamento do varão horizontal) + nó
V2R	480	115,9	7571	21,8		Predominante na face de colagem e finger-joints (deslizamento do varão horizontal) + nó
R4R	413	111,7	8347	21,0		Predominante na face de colagem e finger-joints (deslizamento do varão horizontal) + nó

Da análise das curvas experimentais força – deslocamento (ver figura 3.14) e do quadro 3.6, referentes à técnica de reparação adotada, facilmente se verifica uma grande coerência no que diz respeito aos resultados obtidos para as vigas ensaiadas (V2R e R4R), verificando-se grande semelhança no tempo de rotura, força máxima e conseqüente resistência à flexão.

De salientar o facto de os valores obtidos para a força máxima e rigidez obtidos na viga V1R apresentarem um desfazamento relativamente importante quando comparado com as vigas V2R (27,5% e 15,7%, respetivamente) e R4R (24,8% e 23,5%, respetivamente), facilmente explicado pelo facto de a viga V1R ter apresentado um decréscimo da secção aquando da rotura da viga V1 (preenchimento com cola epoxídica), problemas decorridos durante o

ensaio da viga V1R, levando à repetição do ensaio (mais significativo) e possivelmente um menor cuidado na preparação da viga.

Tal como apresentado no quadro 3.6, também os padrões de rotura apresentam grande similaridade entre as vigas ensaiadas na segunda campanha de ensaios.

Para facilitar uma análise mais pormenorizada, apresenta-se ainda no quadro 3.7, o decréscimo de carga resistente e rigidez das vigas V1R, V2R e R4R em relação a V1, V2 e R4, respetivamente.

Quadro 3.7 – Decréscimo (%) da capacidade resistente e rigidez das vigas reparadas

Viga	ΔF_{max}	Δk
V1R	63,4	28,3
V2R	52,8	24,4
R4R	34,0	3,6

Analisando o quadro 3.7, verifica-se que a maior redução nos valores da rigidez e força máxima ocorre na viga V1R com perdas de 28,3% e 63,4%, respetivamente. Esta redução será proveniente de um menor cuidado aquando da sua reparação, especialmente na colagem e celagem de fendas e reconstituição da secção transversal (preenchimento com cola MAPE WOOD Paste 140). Por outro lado, a menor redução ocorreu na viga R4R, que apresenta uma redução de 3,6% e 34% para os valores da rigidez e força máxima, respetivamente. O desfasamento de valores em relação às restantes vigas deve-se essencialmente ao facto de esta apresentar um nível de fissuração menor que V1R e V2R, o que leva à necessidade de uma menor intervenção nos trabalhos de reparação. Analisando os valores médios, a redução da rigidez ronda os 20% e a redução da força máxima obtida é de aproximadamente 50%.

Realizando agora uma análise relativamente aos valores médios das vigas de referência e descartando a viga V1R pelo seu desfasamento em relação as vigas V2R e R4R pelos motivos apresentados acima, procedesse à análise mais profunda do comportamento das vigas V2R e R4R comparando com as vigas de referência V1 e V2.

Sendo que uma reparação pode ocorrer para diferentes níveis de fissuração, faz sentido recorrer numa primeira fase à comparação entre os valores médios das vigas de referência (V1 e V2) e a viga que simula a abertura de uma fenda longitudinal ao longo da viga (R4),

reparada com a técnica adotada na primeira campanha de ensaios. Analisando os resultados experimentais, verifica-se uma redução de 28% para o valor de F_{\max} e 15% para o valor de k . Valores interessantes tendo em conta a manutenção da elevada rigidez conferida pela colocação da cola epoxídica MAPEWOOD Gel 120.

De igual modo, efetua-se uma comparação entre os valores médios das vigas de referência (V1 e V2) e os valores médios das vigas que teoricamente representam melhor o pior cenário possível na reparação de vigas submetidas à flexão (V2R e R4R), visto que ambas atingiram a rotura antes de serem reparadas. Do confronto resulta uma redução de aproximadamente 50% no valor de F_{\max} e 20% no valor de k . Vale a pena referir novamente que, tratando-se teoricamente do pior cenário possível para uma viga a ser reparada, os resultados são igualmente bastante satisfatórios, principalmente pelos valores da rigidez se manterem num nível muito elevado a semelhança da viga R4.

O facto de a viga V2R (rotura de viga intacta) e R4R (rotura de viga composta) terem origens diferentes e apresentarem valores de F_{\max} e k bastante similares, acaba por reforçar a coerência dos resultados da reparação das vigas após atingirem a rotura.

De referir ainda, que o deslizamento da maior parte dos varões longitudinais (figura 3.15) colocados para reparar a abertura dos finger-joints condicionou os valores da sua resistência à flexão, pelo que forçosamente seriam mais elevados se tal deslizamento tivesse sido impedido.



Figura 3.15 – Deslizamento dos varões longitudinais

Contudo, ainda foi possível verificar a rotura de alguns varões longitudinais, denotando certa eficácia do método utilizado para níveis de carga mais elevados (ver figura 3.16).



Figura 3.16 – Rotura dos varões longitudinais

Na figura 3.17 encontram-se imagens dos padrões representativos das vigas ensaiadas após rotura à flexão.



a)



b)



c)

Figura 3.17 – Padrões de rotura das vigas ensaiadas. a) Viga VR1; b) Viga VR2; c) Viga RR4

Informações pormenorizadas sobre os padrões de rotura à flexão das vigas ensaiadas encontram-se no anexo D, sob forma de alçados.

3.4.3. Conclusões da segunda fase da campanha experimental

O comportamento das vigas reparadas, bem como os resultados experimentais obtidos estão muito dependentes do nível de fissuração apresentado pela viga antes da intervenção de reparação. Adicionalmente, o nível de fissuração também tem forte influência na eficácia da intervenção. Sendo que quanto maior o nível, menor será a eficácia da intervenção.

Em termos médios, verificou-se uma redução de 50% e 20% dos valores de F_{\max} e k das vigas reparadas em relação às vigas de referência. Percentagem satisfatória, visto que se trata da reparação de vigas que atingiram a sua capacidade resistente com padrões de rotura muito significativos.

Focando na análise das vigas R4 e R4R, verifica-se uma redução de 34% no valor de F_{\max} e aproximadamente 4% no valor de k . Este resultado permite reforçar a ideia de que a redução da rigidez quando se passa da reparação de uma viga com apenas uma fenda longitudinal ao longo do seu vão, para a reparação de uma viga considerada inapta é de aproximadamente 5%, tal como verificado acima com a passagem da redução de 15% (R4) para 20% (V2R e R4R) nos valores da rigidez, tendo sempre por base as vigas de referência.

Não foi conseguida a totalidade da eficiência dos varões colocados horizontalmente com objetivo de reparar a abertura dos finger-joints, pelo que se deveria optar por outro método na colocação dos referidos varões por forma a evitar o seu escorregamento quando a viga está sob um nível de carregamento elevado. Mesmo assim, observando os padrões de fissuração das vigas reparadas, verificou-se que estes foram capazes de conferir continuidade longitudinal às lamelas e impedir que algumas das fendas tivessem origem nas fendas reparadas.

Quanto à cola epoxídica utilizada para a celagem de fendas, esta revelou ser bastante eficaz, conferindo valores da rigidez relativamente próximos das vigas de referência, obrigando também ao aparecimento de novas fendas.

De referir que de um modo geral, as vigas ensaiadas apresentaram níveis de fissuração e padrões de rotura, semelhantes.

CAPÍTULO IV

4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES AO CORTE SIMPLES

Neste capítulo apresenta-se um programa experimental composto por ensaios de corte simples madeira – madeira, com vista à quantificação da rigidez ao corte da ligação tendo em conta duas técnicas: varões WB e varões WB com cola. Os resultados desta campanha experimental serão utilizados nas análises, a apresentar posteriormente, ao nível da secção transversal das vigas de madeira alvo deste trabalho (capítulo 5).

Assim, realizaram-se ensaios para a determinação da rigidez ao corte de ligações de madeira – madeira utilizando provetes de madeira representativos das vigas analisadas nos ensaios de flexão já apresentado no capítulo 3. Mais concretamente, foram considerados provetes com as seguintes características:

- Provetes cuja ligação seja assegurada apenas pela introdução de varões WB similares aos utilizados numa das técnicas de reparação adotada na campanha experimental apresentada no capítulo anterior;
- Provetes cuja ligação seja constituída pelos já referidos varões WB, complementada pela introdução de cola epoxídica nas faces a ligar.

Desta forma será possível estimar o já esperado aumento da rigidez quando se complementam as ligações com varões WB adicionando cola epoxídica às faces dos elementos a ligar. É de referir que, também a cola epoxídica, é a mesma que a utilizada na campanha experimental da avaliação das técnicas de reparação das vigas de madeira

4.1. Procedimentos e esquema de ensaio

O programa experimental definido para os ensaios de corte simples, bem como o cálculo do coeficiente de deslizamento, têm por base o estipulado pela EN 26891:1991. Segundo esta norma, o procedimento de ensaio consiste em seguir um procedimento de carga (figura 4.1a)

de forma a obter uma curva carga – deslocamento de acordo com o apresentado na figura 4.1b.

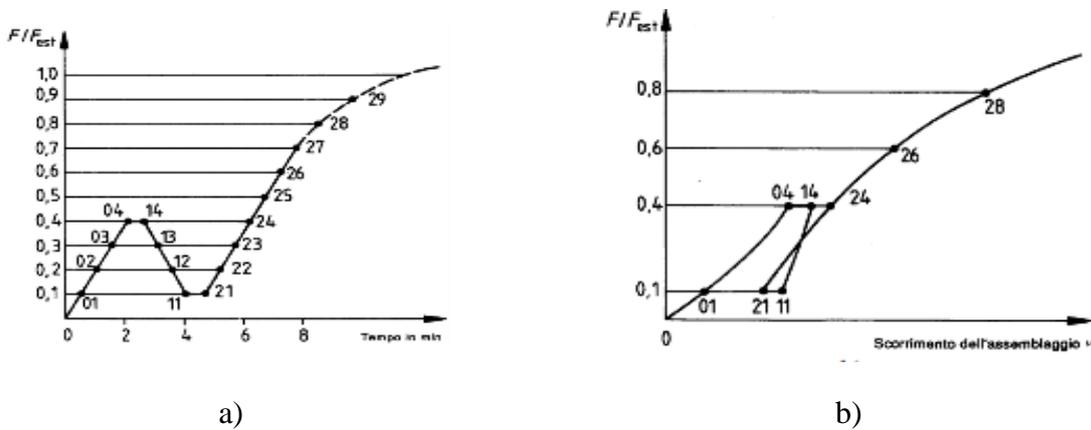


Figura 4.1 – Recomendações de EN 26891:1991. a) Procedimento de carga;

b) Curva força – deslocamento esperada (CEN, 1991)

A partir dos ensaios de corte pretende-se obter o valor do módulo de deslizamento, k_{ser} , determinado a partir dos valores da força e deslocamento compreendidos entre $0,1F_{max}$ e $0,4F_{max}$. Para a sua obtenção serão tidos em conta os aspetos normativos existentes na norma EN 26891:1991. Assim, para a obtenção do módulo de deslizamento aplicam-se as seguintes expressões:

$$k_{ser} = 0,4 \cdot F_{max}/v_{i,mod} \quad (4.1)$$

Sendo F_{max} a força máxima aplicada durante o ensaio e $v_{i,mod}$ obtido através da expressão (4.2).

$$v_{i,mod} = \frac{4}{3}(v_{0,4} - v_{0,1}) \quad (4.2)$$

Onde $v_{0,4}$ e $v_{0,1}$ representam o valor dos deslocamentos obtidos para $0,4F_{max}$ e $0,1F_{max}$, respetivamente.

A figura 4.2 apresenta o esquema de ensaio utilizado no programa experimental assim como a instrumentação utilizada.

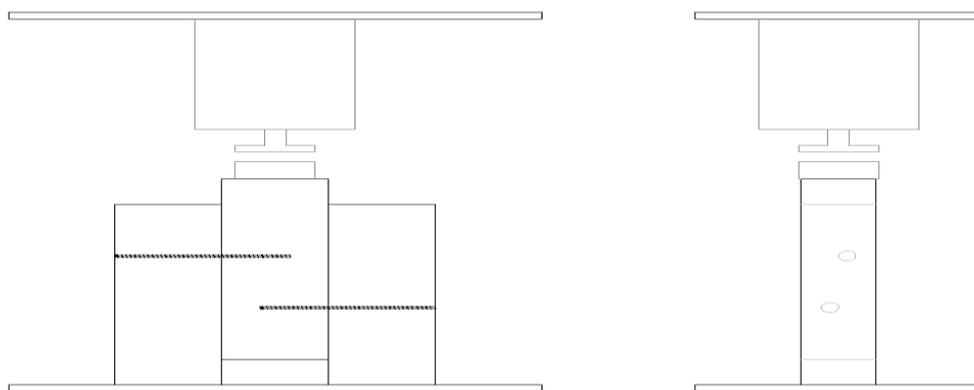


Figura 4.2 – Esquema de ensaio e instrumentação

No decorrer dos ensaios foi registada a força aplicada pelo atuador hidráulico através da célula ligada ao mesmo, e o valor do deslizamento entre blocos com recurso a dois LVDT's (± 50 mm) situados na zona de ligação por forma a acompanhar todo o deslizamento ao longo do ensaio. De salientar que o esquema de ensaio é igual para os provetes colados e não colados.

Quanto ao procedimento de carga, os ensaios foram efetuados sob controlo de deslocamentos a uma velocidade de 0,014 mm/s e de 0,028 mm/s para os provetes colados e não colados, respetivamente. O aumento da velocidade para os provetes não colados deve-se ao facto de existir um grande deslizamento entre os blocos ao longo do ensaio, o que tornaria o mesmo muito demorado. Ao contrário do que é apresentado acima, o procedimento de carga não contempla o ciclo inicial de carga e descarga preconizado pela EN 26891:1991.

4.2. Preparação dos provetes de ensaio

No total foram ensaiados 10 provetes, cada um constituído por 3 elementos de madeira lamelada colada GL24h, sendo que 5 dos referidos provetes apenas apresentam como material de ligação, os varões WB 16 da Rothoblaas. Os restantes 5 provetes, além dos varões WB 16, contemplam a introdução de cola epoxídica MAPEWOOD GEL 120 nas faces a ligar. Na figura 4.3 é apresentado o esquema representativo dos provetes a ensaiar com as referidas dimensões.

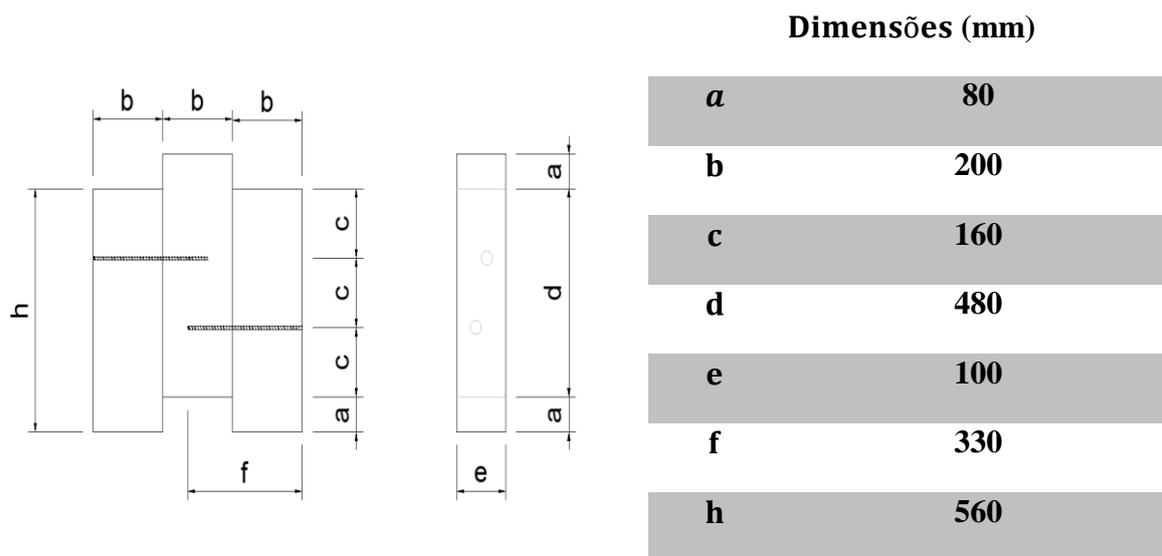


Figura 4.3 – Esquema representativo e dimensões dos provetes de ensaio

Tal como nos ensaios de flexão, o esquema adotado na construção dos provetes de corte seguem o know-how disponível na bibliografia de referência. Catálogos do distribuidor e a experiência dos técnicos que auxiliaram a construção dos provetes foram determinantes, procurando assim seguir o seguinte conjunto de regras:

- São seguidos valores para espaçamentos mínimos sugeridos pelo Eurocódigo 5;
- O comprimento de amarração necessário para mobilizar a resistência axial do material de ligação (varões e/ou parafusos) deve ser de pelo menos $8d$ – oito vezes o diâmetro do ligador;
- Adotar furação em quincôncio, evitando assim a fissuração dos elementos de madeira.

Relativamente à preparação dos provetes de ligações em corte simples, inicialmente procedeu-se à colagem de 5 provetes com cola MAPEWOOD GEL 120 de forma a ficarem com as dimensões desejadas (ver figura 4.4a). Após colagem das faces desligadas, foi exercida uma pressão residual nos provetes com recurso a serra-juntas até que a cola mobilizasse a resistência necessária para prosseguir com a preparação. Em seguida, tanto os provetes com cola (após cura da cola) como os restantes 5 provetes, são sujeitos a uma pré-furação com recurso a uma broca de 12 mm especificada pela Rothoblaas para a colocação dos varões WB 16 (ver figura 4.4b). O pré-furo deve ter uma profundidade de 300 mm, para que o varão roscado seja fixado a partir do centro do bloco central. Posteriormente, procedesse à fixação dos varões roscados WB 16 da Rothoblaas com recurso a um roquete e

uma ponteira especificada (figura 4.4c). O varão roscado a fixar em cada pré-furo deve apresentar um comprimento de 330 mm para que possa amarrar na ponteira. Por fim, todos os provetes ficam com a configuração apresentada na figura 4.4d.

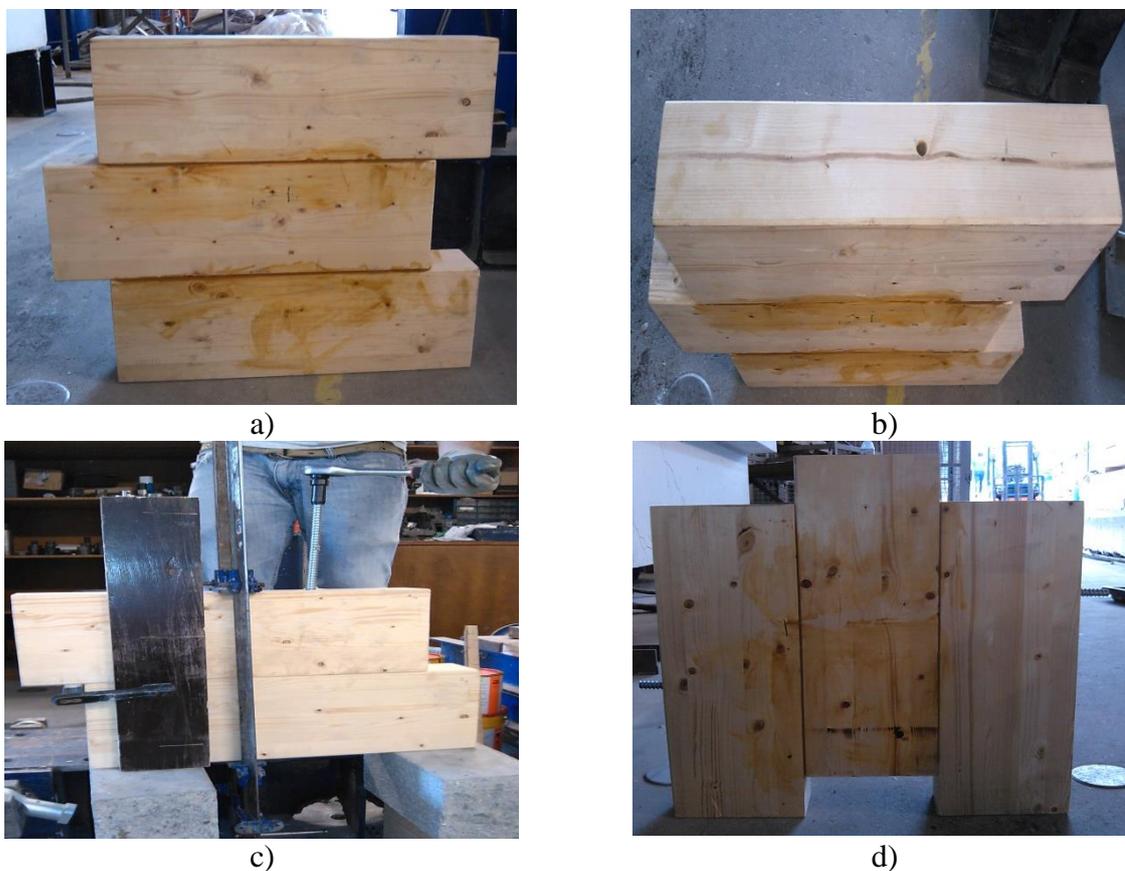
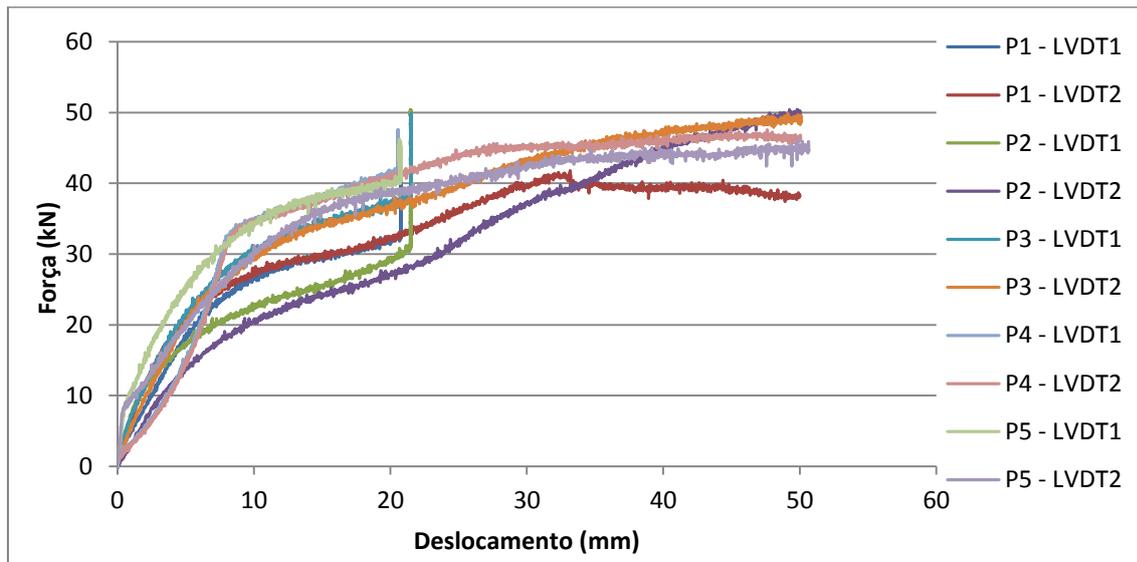


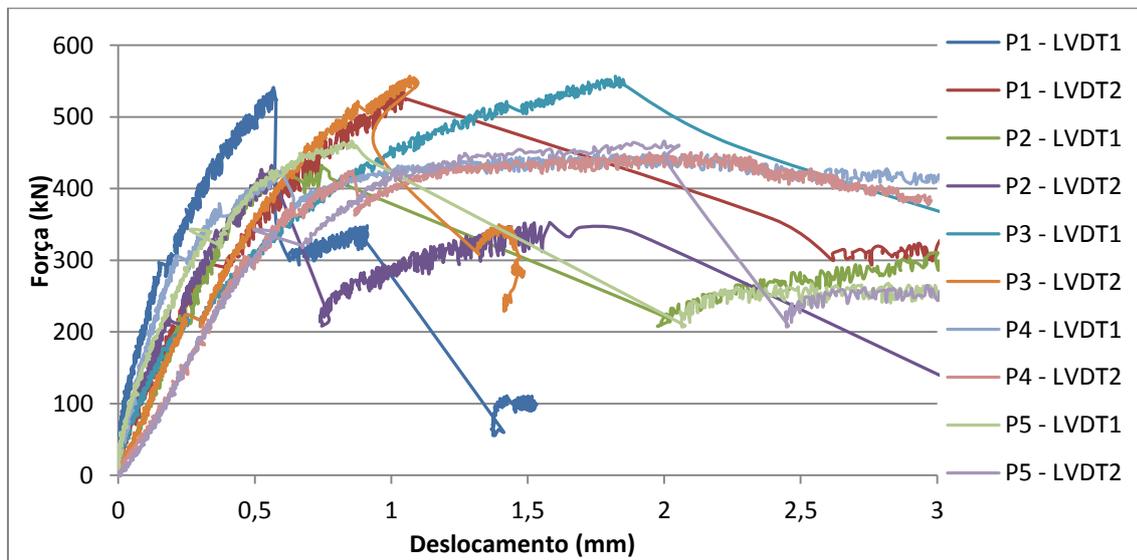
Figura 4.4 – Preparação dos provetes de corte simples

4.3. Apresentação e análise dos resultados dos ensaios

A figura 4.5 apresenta as curvas força – deslocamento obtidas a partir dos provetes sem cola (ver figura 4.5a) e com cola (ver figura 4.5b) provenientes da campanha experimental realizada neste capítulo.



a)



b)

Figura 4.5 – Curvas experimentais força – deslocamento. a) Provetes não colados; b) Provetes colados

Analisando as curvas experimentais, optou-se por retirar da análise o provete 2 dos ensaios sem cola, porque na zona entre 10 a 40% da força máxima obtida durante o ensaio, o seu declive apresenta um desfasamento importante quando comparado com os restantes provetes.

Para a quantificação do valor do módulo de deslizamento, k_{ser} , determinado a partir dos valores da força e deslocamento compreendidos entre $0,1F_{max}$ e $0,4F_{max}$, foram utilizados

dois métodos distintos. Sendo que um dos métodos consiste em utilizar as expressões 4.1 e 4.2 apresentadas no ponto 4.2, de acordo com a norma EN 26891:1991. O método alternativo, mas, nem por isso menos preciso, consiste na quantificação do declive das curvas força – deslocamento entre os valores da força e deslocamento compreendidos entre $0,1F_{\max}$ e $0,4F_{\max}$.

Em seguida são apresentados os resultados da quantificação do módulo de deslizamento, k_{ser} , de acordo com os dois métodos apresentados anteriormente para os provetes não colados (quadro 4.1).

Quadro 4.1 – Valores do módulo de deslizamento, k_{ser} , em N/mm, para os provetes não colados

		EN 26891:1991			Regressão linear		
Provete	F_{\max} (kN)	$k_{\text{ser},1}$	$k_{\text{ser},2}$	k_{ser} (médio)	$k_{\text{ser},1}$	$k_{\text{ser},2}$	k_{ser} (médio)
1	41,8	3157	4224	3690	3421	4487	3954
2	50,4	-	-	-	-	-	-
3	49,7	3862	3726	3794	3829	3707	3768
4	47,6	3269	3249	3259	3307	3300	3304
5	46,2	5508	3377	4442	4693	2757	3725
Média	47,2	3949	3644	3796	3813	3563	3687
COV	7,3%	27,5%	12,0%	12,9%	16,5%	20,5%	7,4%
Nota: $k_{\text{ser},1}$ e $k_{\text{ser},2}$ são os valores do módulo de deslizamento obtidos a partir do deslocamento relativo registado por LVDT 1 e LVDT 2, respetivamente.							

Para facilitar a análise dos resultados obtidos, foi acrescentado o valor do coeficiente de variação (COV), sendo este a razão entre o desvio padrão e a média dos resultados. Este parâmetro é um bom indicador da dispersão dos resultados, tornando mais fácil analisar a coerência dos mesmos.

Relativamente aos valores de F_{\max} , existe grande coerência entre os provetes ensaiados, o que leva a valores de COV baixos (7,3%). Quanto aos valores de k_{ser} , já seria de esperar um

aumento da dispersão dos resultados, levando a um aumento significativo de COV. Salienta-se ainda o facto de o valor de COV tender a baixar quando se trata de valores médios.

Note-se ainda que os valores finais apresentados por ambos os métodos encontram-se muito próximos um do outro, havendo no caso uma redução de 3% do valor de k_{ser} (EN 26891:1991) para o k_{ser} (regressão linear).

Quanto à configuração final dos provetes, não se verificou qualquer rotura dos mesmos, ao longo do ensaio apenas se verificou um deslizamento constante do bloco central em relação aos laterais, por distorção dos varões metálicos.

De igual forma, são apresentados os resultados da quantificação do módulo de deslizamento, k_{ser} , de acordo com os dois métodos apresentados anteriormente para os provetes colados (quadro 4.2).

Quadro 4.2 – Valores do módulo de deslizamento, k_{ser} , em N/mm, para os provetes colados

		EN 26891:1991			Regressão linear		
Prov.	F_{max} (kN)	$k_{ser,1}$	$k_{ser,2}$	k_{ser} (médio)	$k_{ser,1}$	$k_{ser,2}$	k_{ser} (médio)
1	541,0	1708421	849738	1279080	1575600	817370	1196485
2	431,9	974211	1088824	1031517	948010	1083600	1015805
3	556,8	584056	655059	619557	612280	731650	671965
4	450,1	1406563	542289	974425	1536100	617390	1076745
5	466,3	1165750	679078	922413	1143000	695230	919115
Média	489,2	1167800	762998	965399	1162998	789048	976023
COV	11,5%	-36,5%	-27,9%	-24,5%	34,9%	22,8%	20,2%
Nota: $k_{ser,1}$ e $k_{ser,2}$ são os valores do módulo de deslizamento obtidos a partir do deslocamento relativo registado por LVDT 1 e LVDT 2 respetivamente.							

Relativamente aos valores de F_{max} , estes apresentam uma maior dispersão do que a verificada nos provetes sem cola, levando a valores de COV relativamente baixos (11,5%). Quanto aos

valores de k_{ser} , existe um natural aumento da dispersão dos resultados, levando a um aumento ainda mais significativo de COV nestes provetes. De igual forma, salienta-se o facto de o valor de COV baixar quando se trata de valores médios.

De notar ainda que os valores finais apresentados por ambos os métodos são praticamente coincidentes um com o outro, havendo no caso uma redução de 1% do valor de k_{ser} (regressão linear) para o k_{ser} (EN 26891:1991).

No que diz respeito à configuração final dos provetes, verificou-se sempre rotura dos mesmos. A rotura ocorreu sempre pela madeira dos blocos nas imediações da ligação (figura 4.8), condicionando o valor da força máxima aplicada no ensaio. O valor do deslizamento foi sempre praticamente nulo até os provetes começarem a fissurar. Após rotura dos blocos, verificou-se um natural deslizamento entre as faces de rotura por distorção dos varões metálicos.



Figura 4.6 – Proвете com cola após ensaio de corte simples

Refere-se ainda que no que diz respeito aos provetes sem cola, quando foi atingido F_{max} , foi registado um deslizamento de aproximadamente 50 mm para os provetes ensaiados (com exceção do provete 1 – ≈ 35 mm). Quanto aos provetes colados, para F_{max} , foi registado um deslizamento que varia ente 0,5 e 2 mm. Pode-se assim concluir que a colocação da cola altera o comportamento da ligação dúctil, com grande deformação no caso dos provetes sem cola e com reduzida deformação para uma ligação rígida, quando se coloca cola.

O Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004) também sugere uma expressão para cálculo simplificado do valor de K_{ser} tal como apresentado na expressão 2.4 no ponto 2.9.3.1 em função das

características da classe da madeira (massa volúmica, $\rho_k=380 \text{ kg/m}^3$ – ver anexo B) e do próprio varão WB (diâmetro interno da rosca, $d=12\text{mm}$).

Assim, substituindo na expressão obtém-se $K_{ser}= 4444,54 \text{ N/mm}$.

Fazendo a comparação deste valor com o valor de K_{ser} quantificado através da regressão linear dos ensaios de corte simples para os provetes sem cola (3687 N/mm), obtém-se uma redução de aproximadamente 17%.

4.4. Conclusões

O valor do módulo de deslizamento obtido através da expressão sugerida pela EN 1995-1-1:2004, tratando-se de uma expressão simplificada de fácil utilização e sem grande detalhe da ligação utilizada, apresenta um valor razoável quando comparado ao obtido nos ensaios experimentais dos provetes sem cola, no entanto verifica-se que a mesma apresenta um valor de K_{ser} sobrestimado comparado com o valor obtido através dos ensaios experimentais. Por outro lado, é de salientar a concordância entre os valores de K_{ser} resultantes da aplicação da EN 26891:1991 e os calculados a partir da regressão linear tanto nos ensaios dos provetes com cola como nos provetes sem cola.

Como o módulo de deslizamento obtido para os provetes colados é exorbitante quando comparado com os provetes não colados, a ligação pode ser classificada como ligação rígida. Esta diferença (redução de 99,7 % do K_{ser} dos provetes colados em relação aos não colados) nos valores do módulo de deslizamento, resulta da grande área de colagem utilizada nos provetes das ligações com cola.

Observando as curvas experimentais força – deslocamento, é notória a diferença entre o comportamento das ligações com e sem cola. As segundas apresentam grandes valores de deformação, deslizamento ronda os 50 mm, indicando que são dúcteis. Já as primeiras, devido à presença da cola, são rígidas, admitindo pequenas deformações, deslizamentos inferiores a 2 mm.

Por fim, refere-se que os valores de K_{ser} a serem utilizados para a análise interna da secção transversal no próximo capítulo são 976023 N/mm (provetes colados) e 3687 N/mm (provetes

não colados) que correspondem aos resultados provenientes da aplicação da regressão linear às curvas experimentais força – deslizamento.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISE INTERNA

Para melhor análise do comportamento apresentado pelas vigas reparadas durante os ensaios de flexão, procedeu-se ao estudo da distribuição de tensões ao nível da secção transversal, quantificando assim o momento resistente, M_{rd} , e o nível de tensões instaladas.

5.1. Considerações e pressupostos

Sendo a madeira um material estrutural natural cujo comportamento mecânico é influenciado pela presença de defeitos, em particular, nós, que afetam e condicionam a capacidade resistente do elemento, torna-se necessário tecer algumas considerações:

- Comportamento elástico – retirando a hipótese da secção plastificar, essencialmente devido aos defeitos da madeira;
- Rotura por tração – como a tensão de cedência de tração é menor do que a de compressão, assim que for atingida a mesma, é igualmente atingida a rotura da secção transversal.

Tendo por base a resposta das vigas durante os ensaios, é ainda possível assumir os seguintes pressupostos:

- Considerar secção transversal contínua para os provetes colados com cola epoxídica – R4, RR4, VR1 e VR2;
- Considerar secção transversal descontínua para os provetes não colados – R1 e R2.

De referir que as características referentes à classe da madeira, necessárias para efetuar a análise, encontram-se no anexo B.

5.2. Análise da capacidade resistente da secção

Numa primeira fase, quantificou-se o momento resistente à flexão para a secção transversal intacta (140x400 mm²), assumindo os valores sugeridos pela EN 1194:1999 para a tensão resistente e módulo de elasticidade à flexão, f_m (24 MPa) e $E_{m,g}$ (11600 MPa), respetivamente, considerando a classe de resistência GL24h para as vigas de madeira lamelada colada. Para tal recorre-se à seguinte expressão para a quantificação das tensões instaladas em regime elástico:

$$Mrd = \frac{\sigma \cdot I}{y} = 89,6 \text{ kN.m} \quad (5.1)$$

Onde σ (igual a f_m) é a resistência à flexão, I é a inércia da secção transversal, y é a distância do eixo neutro à fibra mais afastada da secção transversal e Mrd é o momento fletor resistente.

Considerando ainda que a extensão de rotura, ε_t , é igual à extensão de cedência, ε_c , por utilização da lei de Hooke:

$$\varepsilon_t = f_m / E_{m,g} = 0,207 \% \quad (5.2)$$

Após o cálculo do momento resistente, recorrendo ao diagrama de momentos (figura 5.1) dos ensaios de flexão de quatro pontos, efetuados no capítulo 3, é possível retirar o respetivo valor do esforço transversal, Vrd (60,9 kN), servindo para posterior cálculo da tensão tangencial máxima, τ_{max} , instalada na secção transversal, onde as tensões normais são nulas:

$$\tau_{max} = \frac{Vrd \cdot S}{I \cdot b} = 1,6 \text{ MPa} \quad (5.3)$$

Onde S é o momento estático e b a base da secção transversal.

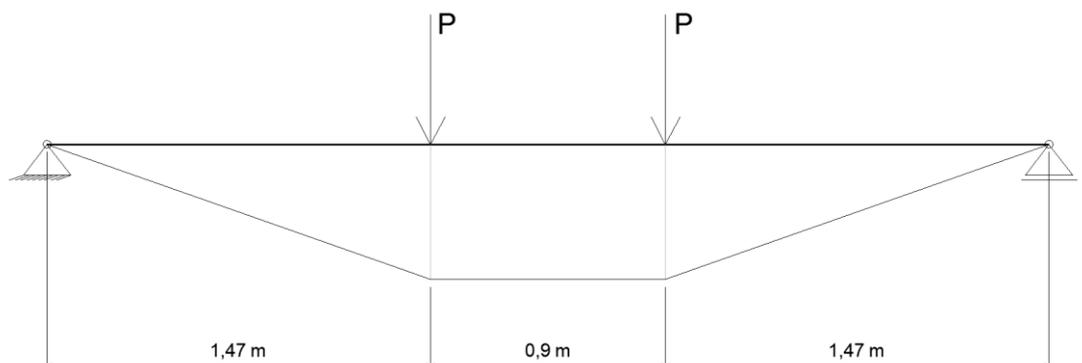


Figura 5.1 – Diagrama de momentos para um nível de carregamento genérico (desprezando a massa da viga por simplicidade)

Apresenta-se de seguida um quadro resumo dos valores calculados tendo em consideração o estipulado pela EN 1194:1999:

Quadro 5.1 – Valores da capacidade resistente da secção transversal segundo EN 1194:1999 para as vigas V1 e V2

	Mrd (kN.m)	Vrd (kN)	f_m (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	ε_t (%)	τ_{max} (MPa)
Vigas V1 e V2	89,6	60,9	24,0	11600	0,207	1,631

Da mesma forma, no quadro 5.2 apresentam-se, para as vigas de secção transversal contínua (V1, V2, R4, R4R, V1R e V2R) e descontínua (R1 e R2) os valores calculados para o momento resistente, Mrd , esforço transversal, Vrd , tensão resistente à flexão, f_m , módulo de elasticidade, $E_{m,g}$, extensão na rotura, ε_t , e tensão tangencial máxima, τ_{max} , tendo por base a força máxima, F_{max} , mobilizada nos ensaios de flexão realizados para cada viga.

Quadro 5.2 – Valores da capacidade resistente da secção transversal das vigas ensaiadas e respetivas tensões instaladas

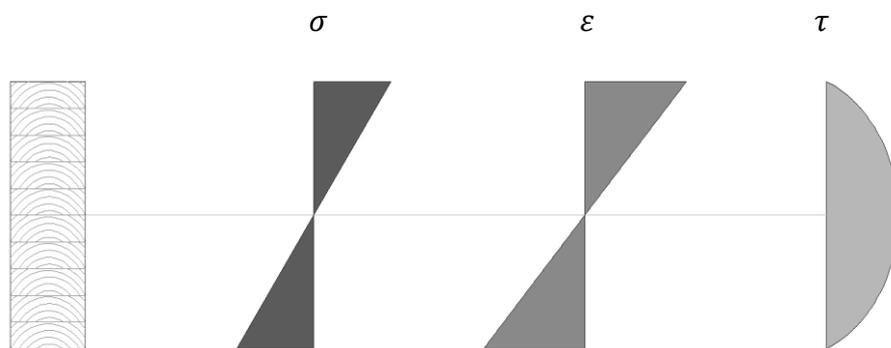
Viga	F_{max} (kN)	Vrd (kN)	Mrd (kN.m)	f_m $\sigma_m + \sigma_{m,i}$ (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	ε_t (%) ⁽¹⁾	τ_{max} (MPa)
V1	229,2	109,7	161,3	43,2 ⁽²⁾	12159	0,331	3,0 ⁽²⁾
V2	245,3	117,3	172,5	46,2 ⁽²⁾	13984	0,353	3,2 ⁽²⁾
R1	94,2	47,1	69,6	30,1 ⁽³⁾	-	0,230	3,6 ⁽³⁾
R2	142,6	71,3	104,8	45,6 ⁽³⁾		0,349	5,5 ⁽³⁾
R4	169,2	84,5	124,3	31,9 ⁽²⁾		0,244	2,3 ⁽²⁾
R4R	111,7	55,8	82,1	21,0 ⁽²⁾		0,161	1,5 ⁽²⁾
V1R	83,9	41,9	61,7	15,8 ⁽²⁾		0,121	1,1 ⁽²⁾
V2R	115,9	57,9	85,2	21,8 ⁽²⁾		0,167	1,6 ⁽²⁾

Nota 1: os valores de ε_t foram obtidos utilizando o valor médio de $E_{m,g}$ das vigas V1 e V2;

Nota 2: f_m e τ_{max} (V1, V2, R4, V1R, V2R e R4R) foram obtidos utilizando as expressões 5.1 e 5.2, respetivamente;

Nota 3: $\sigma_m + \sigma_{m,i}$ e τ_{max} (R1 e R2) foram obtidos utilizando as expressões 2.13, 2.14 e 2.15 apresentadas nos pontos 2.9.3.3 e 2.9.3.4, respetivamente, como apresentado no anexo F ($k_{ser}=3687$ N/mm).

São apresentados em seguida esquemas representativos da distribuição das tensões e respetiva extensão para as vigas de secção contínua (figura 5.2a) e descontínua (ver figura 5.2b).



a)

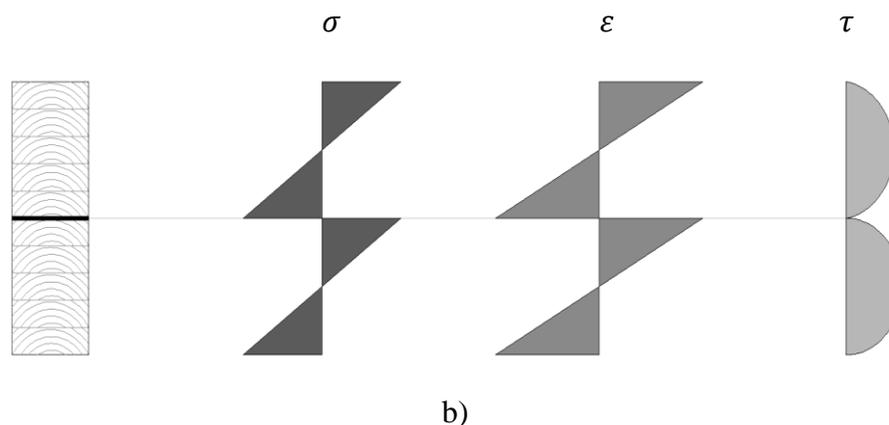


Figura 5.2 – Distribuição de tensões e extensões. a) Secção contínua (V1, V2, R4, R4R, V1R e V2R); b) Secção descontínua (R1 e R2)

É então apresentado no quadro 5.3 a comparação dos valores apresentados pela EN 1194:1999 e os valores obtidos após ensaios de flexão das vigas V1 e V2 relativamente à resistência à flexão, f_m , módulo de elasticidade, $E_{m,g}$ e tensão tangencial máxima, τ_{max} .

Quadro 5.3 – Acréscimo (%) dos valores experimentais médios obtidos nos ensaios das vigas de referência V1 e V2 comparativamente com o sugerido pela EN 1194:1999

Vigas	f_m	$E_{m,g}$	τ_{max}	ϵ_t
Média (V1 e V2)	86,3	12,3	86,3	65,2

O valor da resistência à flexão apresentado pela norma é bastante conservativo relativamente ao que foi obtido nos ensaios de flexão efetuados, sendo o valor experimental obtido para a resistência à flexão 86,3% superior ao valor sugerido pela norma EN 1194:1999 para a madeira GL24h. Consequentemente, também o valor da tensão tangencial registado em ensaio é bastante mais elevado que o apresentado pela mesma norma (86,3% superior). Tendo por base a resistência à flexão sugerida pela norma, também a extensão de rotura revelou ser bastante mais elevada nos ensaios de flexão (65,2% superior). Apenas o módulo de elasticidade apresenta coerência com os valores apresentados, sendo este 12,3% superior ao apresentado pela EN 1194:1999.

Apresentam-se igualmente a comparação dos valores das vigas R1, R2, R4, V1R, V2R e R4R relativamente aos valores médios das vigas de referência V1 e V2 (quadro 5.4):

Quadro 5.4 – Variação (%) dos valores calculados das principais propriedades resistentes para as vigas R1, R2, R4, V1R, V2R e R4R relativamente aos valores médios obtidos nos ensaios de V1 e V2

Viga	M_{rd}	V_{rd}	f_m $\sigma_m + \sigma_{m,i}$	ε_t	τ_{max}
R1	-58,4		-32,6		+14,3
R2	-37,2		+2,0		+72,6
R4			-28,0		
R4R			-52,1		
V1R			-64,3		
V2R			-50,3		
Nota: os valores negativos representam redução e os positivos acréscimo					

No caso das vigas R4, R4R, V1R e V2R, a redução dos valores é proporcional à redução do valor de F_{max} atingido nos ensaios de flexão (situação já analisada no ponto 3.4.2, pelo que será efectuada uma análise mais cuidada das vigas R1 e R2. É notório que ambas as vigas (R1 e R2) apresentam valores de f_m muito elevados quando comparados com os valores sugeridos pela EN 1194:1999, tendo em conta os momentos resistentes apresentados. Tal facto se deve ao reduzido valor da rigidez da ligação (3687 N/mm), k_{ser} , quantificada no ponto 4.3 para os provetes não colados.

Analisando os resultados obtidos para a viga R2, esta apresenta uma redução no valor de M_{rd} de 37,2% em relação ao valor médio de V1 e V2 justificada pela baixa rigidez da ligação, provocando um deslizamento entre os elementos constituintes da secção transversal da viga. Pelo contrário, é verificado um valor muito similar (um acréscimo de apenas 2%) para o valor da tensão resistente de flexão comparativamente ao valor médio apresentado pelas vigas V1 e V2.

Substituindo nas expressões o valor de k_{ser} dos provetes não colados pelo valor de k_{ser} sugerido pelo Eurocódigo 5 (4444,54 N/mm), f_m (R2) toma o valor de 44,3 MPa, o que

significa uma redução de 2,85 % em relação à tensão resistente obtida através dos ensaios efetuados para a viga R2.

Quanto ao valor de τ_{\max} , R2 apresenta um acréscimo de 72,6% relativamente à média de V1 e V2. De igual forma, se substituir o valor de k_{ser} dos provetes não colados pelo k_{ser} sugerido pelo Eurocódigo 5, o valor de $\tau_{\max}(\text{R2})$ desce para 5,2 MPa, o que significa uma redução de 5,45 % da tensão tangencial máxima obtida através dos ensaios efetuados para a viga R2.

Relativamente a R1, a redução no valor de M_{rd} de aproximadamente 60% em relação ao valor médio das vigas de referência (redução de 33,2% em relação a R2) é justificada pela má execução na preparação da viga levando a um reduzido valor da rigidez da ligação (valor inferior ao k_{ser} quantificado nos ensaios de corte simples) e conseqüente elevado deslizamento dos elementos constituintes da secção transversal. Apresenta ainda uma redução no valor de f_m de 32,6% comparado com as vigas de referência (redução de 34% em relação a R2) devido ao seu reduzido M_{rd} , salientando que para o valor do momento resistente apresentado por R1, o valor da tensão resistente de flexão estaria próxima da apresentada pela viga R2 se o valor da rigidez menor que o k_{ser} (3687 N/mm).

Substituindo o valor de k_{ser} dos provetes não colados pelo valor sugerido pelo Eurocódigo 5, f_m (R1) toma o valor de 29,3 MPa, significando uma redução de 2,66 % em relação à tensão resistente obtida através dos ensaios efetuados para a viga R1.

Quanto ao valor de τ_{\max} , este apresenta um acréscimo de 14,3% em relação aos valores médios das vigas V1 e V2. De igual forma, se substituir o valor de k_{ser} dos provetes não colados pelo correspondente valor sugerido pelo Eurocódigo 5, o valor de $\tau_{\max}(\text{R1})$ desce para 3,5 MPa, o que significa uma redução de 2,80% da tensão tangencial máxima obtida através dos ensaios efetuados para a viga R1.

É ainda apresentada no quadro 5.5 a redução dos valores da capacidade resistente das vigas ensaiadas na segunda campanha de ensaios de flexão (V1R, V2R e R4R) em relação as vigas que lhes deram origem (V1, V2 e R4).

Quadro 5.5 – Redução (%) dos valores calculados das principais propriedades resistentes para as vigas V1R, V2R e R4R comparativamente aos valores obtidos nos ensaios de V1, V2 e R4, respetivamente

Viga	Mrd	Vrd	f_m	ε_t	τ_{max}
R4R	34,0				
V1R	63,4				
V2R	52,8				

Analisando os valores expostos no quadro acima, verifica-se que a maior redução das capacidades resistentes ocorreu na viga V1R (63,4%). Tal como inumerado no ponto 3.4.2, a redução será proveniente de um menor cuidado aquando da reparação, especialmente no que diz respeito à colagem e celagem das fendas mais fechadas em relação as restantes vigas reparadas. A menor redução das capacidades resistentes verifica-se na viga R4R (34,0%), muito pelo facto de a mesma apresentar um grau de fissuração menor que as restantes. Neste caso, a necessidade de trabalhos de reparação foi menor, levando a resultados mais satisfatórios. Analisando os resultados em termos médios, a redução da capacidade resistente situa-se nos 50% e fica muito condicionada pela qualidade dos trabalhos de reparação (especialmente a colagem e celagem de fendas) e pelo grau de fissuração apresentado pela viga a reparar.

5.3. Análise da capacidade resistente da ligação

Com a análise ao nível da secção transversal efetuada, surge ainda a necessidade de comprovar a segurança ao nível dos elementos de ligação (varões autoperfurantes WB 16) utilizados na técnica de reparação adotada nos ensaios de flexão. Recorde-se que para o pré-dimensionamento do espaçamento dos varões, $S(x)$, apresentado no anexo C, foi utilizado o k_{ser} sugerido pelo Eurocódigo 5 para o efeito, apresentado na expressão 2.4 do ponto 2.9.3.1 e quantificado no ponto 4.3, bem como o $E_{m,g}$ apresentado pela EN 1194:1999 para a classe de madeira GL24h. Para confirmação de que o espaçamento de 200 mm proveniente do pré-dimensionamento cumpre os requisitos de segurança, foi feito o cálculo com o valor do k_{ser} obtido através dos ensaios de corte simples para os provetes não colados

(3687 N/mm) e $E_{m,g}$ quantificado em valor médio nos ensaios de flexão das vigas de referência (13071 MPa).

Para o cálculo da força transmitida a cada varão, F_i , foi utilizada a expressão 2.16 apresentada no ponto 2.9.3.5. Os respetivos valores de V_{rd} utilizados são os apresentados no quadro 5.1.

O cálculo da capacidade resistente ao corte, $F_{r,Rd}$, de cada varão foi efectuado de acordo com a seguinte expressão, sugerida pelo Eurocódigo 3 (CEN, 2010b):

$$F_{r,Rd} = 0,6 \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_b}{\gamma_{M_2}} \quad (5.4)$$

Onde f_{ub} é o valor nominal da tensão de rotura à tração (800 MPa – classe 8.8); A_b é a área do plano de corte que atravessa o varão ($\varnothing=12$ mm); e γ_{M_2} é o coeficiente parcial de segurança ($\gamma_{M_2} = 1,25$ – Valor recomendado).

O quadro 5.6 apresenta os valores de F_i quantificados aquando do pré-dimensionamento de $S(x)$ e após análise das tensões da viga R2 (valor de V_{rd} mais elevado que R1).

Quadro 5.6 – Valores de F_i e $F_{r,Rd}$ do varão autoperfurante WB 16

	$E_{m,g}$ (MPa)	k_{ser} (N/mm)	V_{rd} (kN)	F_i (kN)	$F_{r,Rd}$ (kN)
Pré-dimensionamento	11600	4444,5	60,9	20,6	43,4
Viga R2	13071	3687,6	71,3	20,1	

Foi igualmente verificada a capacidade resistente do elemento de ligação para um espaçamento de 200 mm, tal como no pré-dimensionamento onde foi foram utilizados valores normativos. O valor de F_i quantificado para a viga R2 apresenta uma redução muito pouco significativa em relação ao inicialmente (2,19%) e apenas 46,3% da capacidade resistente do elemento de ligação.

5.4. Conclusão

Verificou-se que a norma EN 1194:1999 apresenta um valor da resistência à flexão muito conservativo em relação aos valores alcançados através ensaios de flexão para as vigas de referência (V1 e V2). Contudo, é de notar que apenas duas vigas foram consideradas nesta comparação, apresentando um coeficiente de variação reduzido (COV de 5%) podendo no entanto reduzir as diferenças com o aumento da amostra.

O cálculo das tensões normais ao nível da secção transversal das vigas compostas (R1 e R2) é fortemente condicionado pela rigidez do elemento de ligação (k_{ser}). Sendo $\sigma_m + \sigma_{m,i}$ da secção transversal composta inversamente proporcional à rigidez da ligação (k_{ser}).

Verificou-se ainda uma redução de aproximadamente 50% (em média) da capacidade resistente das vigas reparadas (V1R, V2R e R4R) em relação as vigas que lhes deram origem (V1, V2 e R4, respetivamente). Percentagem bastante satisfatória, tratando-se da reparação de vigas que atingiram a sua capacidade resistente e conseqüente rotura (padrões de rotura bastante significativos).

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES

6.1. Conclusões gerais

Na reparação de vigas, deverá ter-se em conta que por mais eficiente que seja a intervenção, não é possível a reconstituição total da capacidade resistente do elemento, pelo que devem ser aliviadas as cargas atuantes sobre o mesmo. A eficácia da técnica de reparação adotada será tanto maior quanto a qualidade dos trabalhos realizados na intervenção. Questões de ordem estética e económica também são fatores preponderantes na escolha da técnica adotada.

A utilização de varões autoperfurantes como técnica de reparação adveio de um estudo bibliográfico apresentado no capítulo 2, onde constam em detalhe as técnicas mais utilizadas na reparação de vigas de madeira. A decisão da técnica de reparação teve por base alguns pressupostos que condicionam claramente a escolha da mesma. Dentro dos quais, foi pressuposto que qualquer reparação deve ser efetuada a partir da face inferior da viga, visto que esta serve normalmente de apoio a uma laje. Foi ainda considerado que as vigas a reparar apenas apresentam, numa primeira fase, fendas longitudinais localizadas sensivelmente a metade da altura da secção transversal, sem sinal de degradação provocada por agentes biológicos ou atmosféricos. Com base nestes pressupostos e tendo a preocupação em controlar os custos, resultou a escolha das duas técnicas de reparação recorrendo a varões autoperfurantes de rosca completa VGZ 7 e WB 16.

Das duas técnicas avaliadas no comportamento das vigas compostas (R1,R2,R3 e R4), a técnica que tem por base os varões WB 16 (viga R2) revelou ser mais eficaz que os varões autoperfurantes VGZ 7 (viga R3), uma vez que a viga R2 apresentou uma capacidade resistente de aproximadamente 25% superior a R3, embora tivesse apresentado uma rigidez de aproximadamente 40% inferior a R3. Contudo, a injeção de cola epoxídica juntamente com a colocação dos varões WB na viga R4 veio não só aumentar ainda mais a capacidade resistente em relação a R2 ($\approx 19\%$ superior) como também aumentou significativamente o valor da rigidez para valores próximos das vigas de referência ($\approx 69\%$ superior a R3). Considerando ainda que, a técnica que incorpora a colocação dos varões autoperfurantes VGZ, quando

aplicada in-situ requer cuidados redobrados, uma vez que a colocação dos varões é efetuada com um ângulo de 45° , a escolha dos varões WB fica assim ainda mais evidente.

Quanto à avaliação das vigas V1R, V2R e R4R, reparadas com os varões WB 16 complementada com injeção de cola epoxídica para selagem de fendas e varões de 8 mm (reparação dos finger joints), apresentaram resultados bastante satisfatórios, especialmente tratando-se de vigas que atingiram a rotura aquando da primeira campanha de ensaios e que como tal, apresentam padrões de rotura bastante significativos. Em termos médios, verificou-se uma redução de 50% e 20% no valor de F_{max} e rigidez, respetivamente das vigas reparadas em relação às vigas de referência.

Extrapolando para situações reais, foi ainda possível verificar que a redução da rigidez, em termos médios, de uma viga reparada com uma fenda longitudinal ao longo do vão (grau de fissuração médio), para uma viga reparada depois de ter atingido a rotura (grau de fissuração muito elevada) é de apenas 5%.

Quanto à reparação dos finger joints, não foi conseguida total eficácia, pelo que se deveria ter optado por outro método que evitasse o escorregamento dos varões de 8 mm sobre os próprios roços quando a viga está sujeita a um nível de carregamento elevado.

O comportamento das vigas reparadas, bem como a eficácia da reparação, estão assim muito dependentes do nível de fissuração apresentado aquando da intervenção. Assim, quanto maior o nível de fissuração, maior e mais difícil será a intervenção necessária, levando a uma menor eficácia da mesma.

Quanto à ligação madeira – madeira, verificou-se que o valor do módulo de deslizamento obtido através da expressão sugerida pela EN 1995-1-1:2004 está sobrestimado quando comparado com os valores resultantes dos ensaios de corte simples. Como o módulo de deslizamento obtido para os provetes colados é exorbitante quando comparado com os provetes não colados (ligação dúctil), considera-se que a ligação é rígida. A grande diferença entre os valores do módulo de deslizamento, resulta da grande área de colagem utilizada nos provetes das ligações com cola.

Da análise ao nível da secção transversal, verificou-se que a norma EN 1194:1999 apresenta um valor da resistência à flexão muito conservativo em relação aos valores alcançados através ensaios de flexão para as vigas de referência (V1 e V2).

Quanto ao cálculo das tensões normais ao nível da secção transversal das vigas compostas (R1 e R2), este é fortemente condicionado pela rigidez do elemento de ligação (k_{ser}).

Por último, verificou-se ainda uma redução de aproximadamente 50% (em média) da capacidade resistente das vigas reparadas (V1R, V2R e R4R) em relação as vigas que lhes deram origem (V1, V2 e R4, respetivamente).

Salienta-se o facto de que a técnica adotada não requer mão-de-obra especializada, apresenta cuidados estéticos e é economicamente viável.

6.2. Trabalhos futuros

Após terminada esta dissertação, e tendo recolhido inúmeros dados experimentais sobre a reparação de vigas à flexão, ficam aqui algumas sugestões para trabalhos futuros:

1. Calibrar as expressões propostas pelo Eurocódigo 5 para cálculo da capacidade resistente à flexão da secção transversal para a técnica de reparação em questão, em função do nível de fissuração apresentado pela viga. Inicialmente, ter-se-ia que recorrer a um software de elementos finitos onde se testariam diversos níveis de fissuração e assim retirar o coeficiente redutor correspondente a cada nível de fissuração. O coeficiente deve estar teoricamente compreendido entre 0 (viga irreparável) e 1 (viga em perfeito estado), mas tal como verificado na segunda campanha de ensaios de flexão, teoricamente para vigas consideradas inaptas, foi ainda possível recuperar cerca de 50% da sua capacidade resistente inicial, o que corresponderia a um coeficiente de aproximadamente 0,5. Em seguida, tendo definido a relação entre os diversos níveis de fissuração e o respetivo coeficiente, seria possível definir os valores do coeficiente em função do tipo de carregamento e do tempo.
2. Repetir o processo descrito no ponto 1 para outras técnicas de reparação, seguindo novamente os procedimentos de ensaio de corte (se justificado) e flexão apresentados nesta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, R.A., Martitegui, F.A., Calleja, J.J.M. (2000). *Estructuras de Madera: Diseño y Cálculo*.
- ALVIM, R.C. (2002). *A Resistência dos Pilares de Madeira Composta*, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- André, A. (2006). *Fibres for Strengthening of Timber Structures*, Technical Report, Luleå University of Technology, Luleå.
- Arriaga, F., Peraza, F., Esteban, M., Bobadilla, I., García, F. (2002). Intervencion en estructuras de madera, *AITIM*.
- Banema *Madeiras e Derivados*; www.banema.pt; Acedido em 07-02-21013.
- BARBISAN, V., LANNER, F. (2000). Capriate e tetti in legno, *Progetto e Recupero Franco Angeli, Milano*.
- Barreal, J.A.R. (1998). Coedición Fundación Conde del Valle de Salazar Ediciones Mundi-Prensa, *Patología de la Madera*.
- Berry, R.W. (1994). *Remedial tratment of wood rot and insect attack in buildings*, Building Research Establishment, GarstonWatford.
- CECCOTI, A., RUFFINO, M., BONAMINI, G., UZIELLI, L. (1998). *Restauro conservativo di capriate lignee Edizione Clut, Torino*.
- CEN (1991). *UNI EN 26891:1991: Strutture di legno. Assemblaggi realizzati tramite elementi meccanici di collegamento. Principi generali per la determinazione delle caratteristiche di resistenza e Deformabilita*, Italia.
- CEN (2004). *EN 1995-1-1:2004. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*, Brussels.
- CEN (2010a). *EN 408:2010: Timber structures - Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties*, Brussels.
- CEN (2010b). *NP EN 1993-1-8:2010. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: General - Design of joints*, Brussels.
- CÓIAS, V. (2007). *Reabilitação estrutural de edifícios antigos*, Argumentum/GECORPA, Lisboa.
- Coutinho, J.d. (1999). *Apontamentos das aulas teóricas de Materiais de Construção I*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- DCTA-UPM (1998). *Patología y Técnicas de Intervención Elementos Estructurales*.
- EHLBECK, J., LARSEN, H.J. (1991). *Eurocode 5, Design of Timber Structures, Joints*.
- Franco, E.S. *A defesa das madeiras serradas contra ataques de insectos xilófagos. Conservação de Madeiras em Edifício*, LNEC.

- Gray, G.W., Gilham, P.C. (2006). *Repair and Reinforcement of Glulam Beams for Tinora High School*, Structure Magazine.
- Henriques, M.D.F. *Sistemas estruturais em madeira lamelada colada*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa; Acedido em 07-02-2013.
- KREUZINGER, H. (1995). *Mechanically jointed beams e columns*, TimberEngineering STEP 1, Lecture B11, Centrum Hout, The Netherlands.
- Martins, T.F.R.M. (2010). *Dimensionamento de Estruturas em Madeira*, Universidade Técnica De Lisboa.
- Mateus, T.J. (1961). *Bases para o Dimensionamento de Estruturas de Madeira*, Bertrand (Irmãos), Lda.
- Melo, R.d., Menezzi, C.H. (2010). Comportamento reológico da madeira e derivados.
- Negrão, J.H. (2005). *Durabilidade e Preservação*. Coimbra, Universidade de Coimbra.
- Pfeil, W., Pfeil, M. (2003). Estruturas de Madeira, *Livros Técnicos e Científicos SA*.
- ROTAFIX (2007). *Documentação técnica divers*.
- Szücs, C.A., Terezo, R.F., Valle, Â.d., Moraes, P.D. (2005). *Sebenta de Estruturas de Madeira*, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Tsoumis, G. (1991). *Mechanical Properties*, Science of Techonology of Wood, Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold.

ANEXOS

ANEXO A

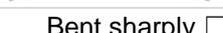
Contact person

Name: Fill here	Institution: Fill here
Title: Fill here.	
Phone: Fill here .	E-Mail: Fill here

Building

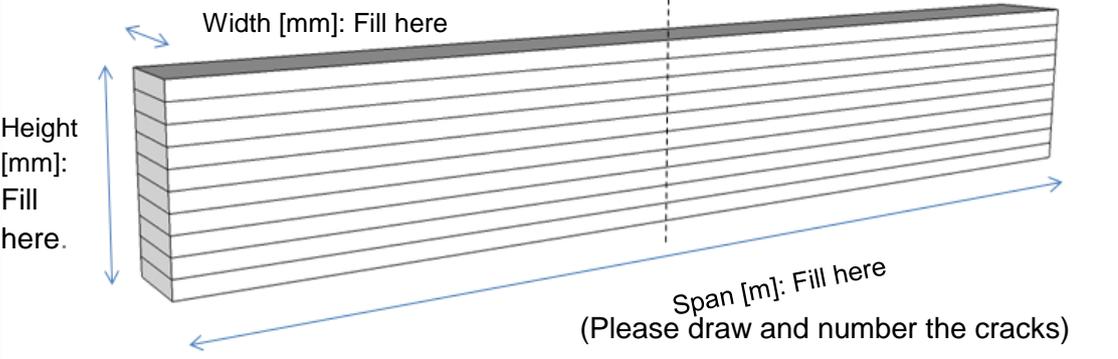
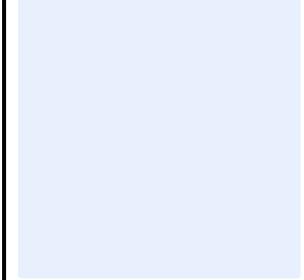
Building name: Fill here	Location (country/city): Fill here
Construction date: Fill here	Damage date: Fill here
Interior climate/service class: Fill here	

Timber element

System	Shape	Material	Connections (if applicable)
1-span beam <input type="checkbox"/>	Straight <input type="checkbox"/>	Glulam <input type="checkbox"/>	Connection including a steel plate: Inner plate <input type="checkbox"/> Side plates <input type="checkbox"/> Shoe <input type="checkbox"/>
Multi-span beam <input type="checkbox"/>		Solid timber <input type="checkbox"/>	
Structure with hinges <input type="checkbox"/>	Curved <input type="checkbox"/>	Other: Fill here	Connection order of dimension Height [mm]: Fill Width [mm]: Fill
Cantilever <input type="checkbox"/>		Strength class: Fill	
Truss <input type="checkbox"/>	Tapered straight <input type="checkbox"/>	Connections (if applicable)	Stress direction at the connection: Parallel <input type="checkbox"/> Perpendicular <input type="checkbox"/> Angle of (°) Fill
Other: Fill here.			
Loading situation	Tapered curved <input type="checkbox"/>	Fasteners:	to the grain direction
Bending <input type="checkbox"/>		Dowels <input type="checkbox"/> Screws <input type="checkbox"/> Nails <input type="checkbox"/>	
Compression <input type="checkbox"/>	Bent sharply <input type="checkbox"/>	diameter [mm]: Fill	Other: Fill here.
Tension <input type="checkbox"/>		Other: Fill here.	
Shear <input type="checkbox"/>	Other: Fill here.	Other: Fill here.	
Composed* <input type="checkbox"/>			
Other: Fill here.			

*Please tick several boxes and if possible specify main and secondary effort in the "Other" cell

Element sketch

	<p>Connection detail</p>  <p>(If possible, insert a picture of the connection)</p>
Lamella height [mm]: Fill here	Moisture content [%]: Fill here

Cracks characteristics

Estimated cause

Number	Length [mm]	Depth [mm]	Estimated cause
1	Fill here	Fill here	Poor construction details of the element (holes, notches, connection preventing shrinkage...) <input type="checkbox"/>
2	Fill here	Fill here	Repeated alternating climate <input type="checkbox"/>
3	Fill here	Fill here	Shrinkage or swelling <input type="checkbox"/>
4	Fill here	Fill here	Overloading <input type="checkbox"/>
5	Fill here	Fill here	Poor design (disregard of design rules, mistakes in the loads repartition, too small cross sections...) <input type="checkbox"/>
6	Fill here	Fill here	Carelessness during the assembly, non-following of the plans provided <input type="checkbox"/>
7	Fill here	Fill here	Other: Fill here
8	Fill here	Fill here	
9	Fill here	Fill here	
10	Fill here	Fill here	

Further information: Fill here

Noëlie Magnière Assistant Timber and Composite Construction +41 32 344 02 72	Bern University of Applied Sciences Architecture, Wood and Civil Engineering noelie.magniere@bfh.ch
--	---

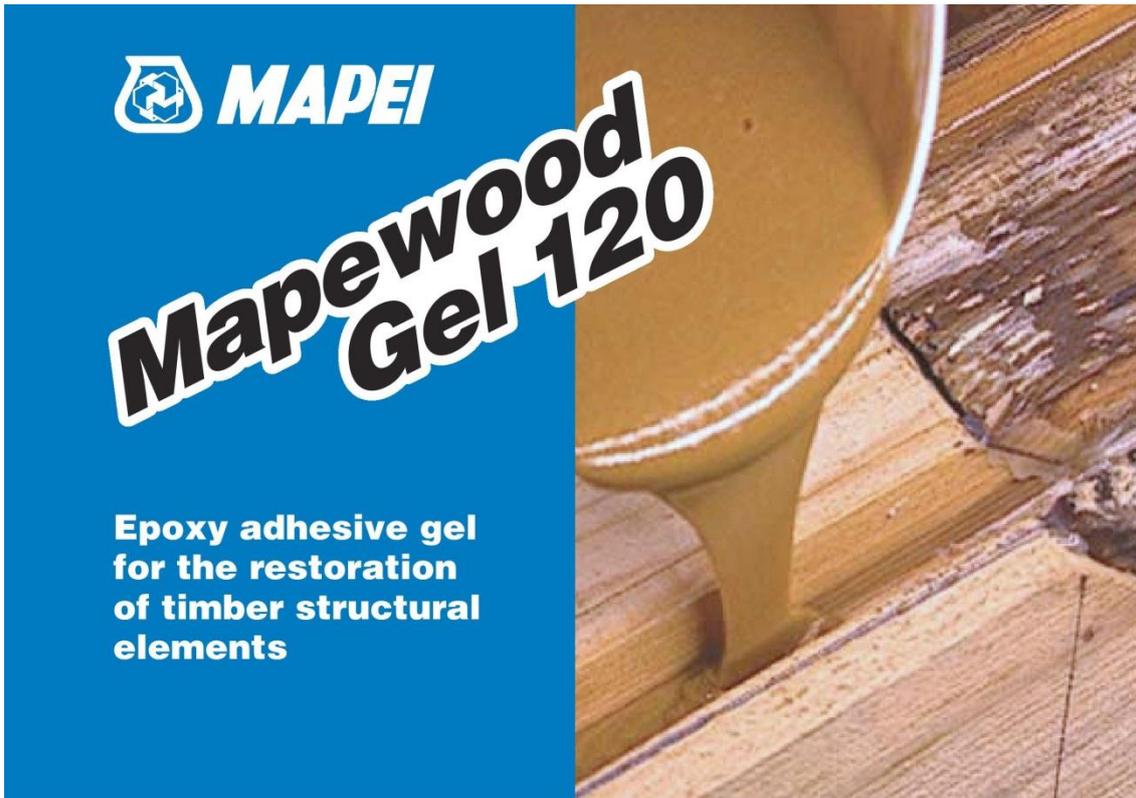
ANEXO B

Madeira Lamelada Colada GL24h:

Quadro B.1 – Valores característicos da resistência, da rigidez (N/mm²) e da massa volúmica (kg/m³) da madeira GL24h

Característica mecânica		GL24h
Resistência à flexão	$f_{m,g,k}$	24
Resistência à tração	$f_{t,0,g,k}$	16,5
	$f_{t,90,g,k}$	0,4
Resistência à compressão	$f_{c,0,g,k}$	24
	$f_{c,90,g,k}$	2,7
Resistência ao corte	$f_{v,g,k}$	2,7
Módulo de elasticidade	$E_{0,g,mean}$	11600
	$E_{0,g,05}$	9400
	$E_{90,g,mean}$	390
Módulo de distorção	$G_{g,mean}$	720
Massa volúmica	$\rho_{g,k}$	380

Mapewood Gel 120:



WHERE TO USE

Bonding new timber parts to existing timber structures after the decayed parts have been removed. Filling holes both in the existing timber structural element that needs to be repaired and in the new wood element in order to anchor connecting reinforcing rods and/or plates.

Some application examples

Repairing fir, pine, poplar, oak, chestnut and other types of timber beams, trusses and columns that need to be reconstructed by adding a new wood element which might need to be anchored to the original element with metal or composite material rods or plates.

TECHNICAL CHARACTERISTICS

Mapewood Gel 120 is a solvent free epoxy adhesive of a gelatine consistency composed of two pre-measured parts that must be mixed before use (Part A = resin and Part B = hardener), prepared according to a formula developed in the Mapei research laboratories.

Once mixed, **Mapewood Gel 120** is easily applied and hardens without shrinkage becoming a composite with excellent bonding strength, physico-mechanical compatibility with wood and mechanical strength.

RECOMMENDATIONS

- When wood is damaged by decay, insects or high density (oak and chestnut) apply **Mapewood Gel 120** on the wood surface only after having treated them with **Mapewood Primer 100**.
- Do not apply **Mapewood Gel 120** at temperatures below +10°C.
- Do not apply **Mapewood Gel 120** on wet surfaces.

APPLICATION PROCEDURE

Preparing the substrate

Secure the structure and remove the decayed part of the beam, column or truss with a clean cut.

Prepare the new wood element choosing a wood similar to the existing one or with improved durability and mechanical strength.

Prepare the slots for the connecting elements by creating suitably sized hollows or holes both in the element that needs consolidation and in the new wood piece. Suitable elements are: threaded rods or iron reinforcing rod, steel plates, other products in composite material which have been checked for good surface bonding. If the hollows are cylindrical cavities, two transversal holes with 6-7 mm diameter (a depth that can intercept the cavity where the reinforcement rod will be inserted) must be created through which **Mapewood Gel 120** is injected.

See Figure 1.



Figure 1



Mapewood Gel 120



Injecting Mapewood Gel 120



Injecting Mapewood Gel 120



Reprofiling the beam

When sawing and drilling try to avoid the formation of splinters, superficial burns and the creation of areas with broken or flattened fibres.

In order to avoid the above mentioned, it is recommended to adopt the following measures:

- always use sharpened sawing tools of the correct size and form (never use steel cement blades, noses or cutters);
- use suitable supports and guides so the tools do not deviate when the blade hits knots or cross grains;
- remove shavings frequently in order to avoid them from pressing onto the surfaces and provoking friction and overheating;
- after the sawing stage, clean the surfaces from dust, shavings and splinters;
- preferably prepare the wooden surfaces within 24 hours prior to applying **Mapewood Gel 120**. This is to avoid superficial oxidation, contact with pollutants and dust deposits.

If necessary apply one or two coats (depending on the type of wood) of **Mapewood Primer 100** on the sides of the holes and on the cut surfaces of the timber structural element that needs to be repaired and on the new wood element in order to fix loose fibres and improve the bonding of **Mapewood Gel 120**. It is recommended to read the instructions of the product on the technical data sheet before its use. Wait approximately 5 hours at +20°C before repairing the damaged element by anchoring the new reinforcing rod with **Mapewood Gel 120**.

Note: *The new wood element must be acclimatised before bonding them with Mapewood Gel 120 or treating them with Mapewood Primer 100. It is absolutely necessary that the moisture content of the existing structural element and the new wood element be $\pm 3\%$ with respect to that of equilibrium in the service condition in order to minimise the dimensional variations and consequent tension development between the parts that need to be bonded.*

Preparing the product

The two parts of **Mapewood Gel 120** must be mixed together. Pour Part B into Part A and mix with a drill fitted with a whip until the resin is completely smooth.

Mixing ratio: 4 part by weight Part A and 1 part by weight Part B.

In order to avoid accidental measuring errors, use the whole package of the product. If partial quantities are necessary, use an electronic precision scale.

Applying the product

Place the reinforcing rods into the holes. Near the new wood piece to the element that needs repair making sure the surfaces fit perfectly. 24-48 hours before injecting **Mapewood Gel 120**, seal the perimeter of the cut and any other possible passages for the leakage of **Mapewood Gel 120** (cracks,

flaws and holes) with **Mapewood Paste 140**. Inject **Mapewood Gel 120** directly into the lateral openings via extrusion as shown in Figure 2:

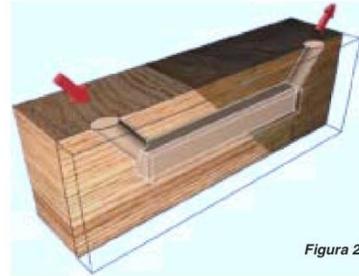


Figura 2

SAFETY INSTRUCTIONS FOR THE PREPARATION AND APPLICATION

Mapewood Gel 120 in repeated or prolonged contact with the skin could cause sensitivity.

Always wear protective gloves and goggles while using the product. In case of contact with the skin, wash with plenty of water and soap. If any symptoms of sensitivity should arise, consult a doctor.

In case of contact with the eyes wash with running water and consult a doctor. Use in ventilated areas.

Cleaning

Due to **Mapewood Gel 120**'s high adhesive strength also onto metal, it is recommended to wash working tools with solvents (ethyl alcohol, toluol, etc.) before the product hardens.

CONSUMPTION

1.01 kg/l of cavity to be filled.

PACKAGING

2.5 kg units
(Part A = 2 kg and Part B = 0.5 kg).

STORAGE

The product must be stored in its original packing at a temperature not below +10°C.

FOR PROFESSIONALS.

WARNING

Although the technical details and recommendations contained in this product report correspond to the best of our knowledge and experience, all the above information must, in every case, be taken as merely indicative and subject to confirmation after long-term practical applications: for this reason, anyone who intends to use the product must ensure beforehand that it is suitable for the envisaged application: in every case, the user alone is fully responsible for any consequences deriving from the use of the product.

**All relevant references
of the product are available
upon request**

TECHNICAL DATA (typical values)		
PRODUCT IDENTITY		
Customs class:	3907 30 00	
	Part A	Part B
Consistency:	paste	paste
Colour:	light brown	yellow
Specific gravity (g/cm ³):	1.02	1.00
Brookfield viscosity (mPa·s):	13 000 (shaft 3 - rev. 5)	11 000 (shaft 2 - rev. 5)
Storage:	24 months in original unopened packing at a temperature between +5°C and +30°C	
Hazard classification according to EC 99/45:	irritant harmful Before use consult the "Safety instructions" paragraph and the information on the packaging and safety data sheet	
Mixing ratio:	Part A : Part B = 4 : 1	
Consistency of the mix:	gelatine paste	
Colour of the mix:	light brown	
Specific gravity of the mix (g/cm ³):	1.01	
Brookfield viscosity (mPa·s):	11 400 (shaft 3 - rev. 5)	
Workability:		
- at +10°C:	60'	
- at +23°C:	40'	
- at +30°C:	20'	
Setting time:		
- at +10°C:	90'	
- at +23°C:	50'	
- at +30°C:	30'	
Application temperature range:	from +10°C to +30°C	
Complete hardening:	7 days	
Bonding (shear compression) wood/wood (fir): - after 7 days at +23°C:	9 N/mm ²	
Tensile strength (ASTM D 638):	30 N/mm ²	
Yield traction (ASTM D 638):	1.2%	
Flexural strength (ISO 178):	60 N/mm ²	
Flexural modulus of elasticity (ISO 178):	2 000 N/mm ²	
Compressive strength (ASTM D 695):	65 N/mm ²	
Compressive modulus of elasticity (ASTM D 695):	5 000 N/mm ²	



Repaired beam

Mapewood Gel-120



MAPEI GROUP CERTIFIED MANAGEMENT SYSTEMS (Quality, Environment and Safety)



CERTQUALITY
No. 250/2



The Mapei
Environmental
Management System
ISO 14001
Mediglia, Italy plant
CERTQUALITY No. 1230/1



OCCUPATIONAL HEALTH
MANAGEMENT SYSTEM
OHSAS 18001
CERTIFIED BY
CERTQUALITY
MEDIGLIA PLANT IN
COMPLEX OF MEDIGLIA 010
Certificate No. 3056
© MAPEI

MAPEI S.p.A. - ITALY



CERTQUALITY
No. 1517/1

MAPEI FRANCE



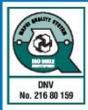
DIN
No. 004157

MAPEI INC - CANADA



DIN
No. 94-031-AQ-0236

RESCON MAPEI AS - NORWAY



DIN
No. 216 80 159

MAPEI KFT - HUNGARY



CERTQUALITY
No. 3303

MAPEI FAR EAST Pte Ltd



IFC
No. 01 0083 SJ

MAPEI Sro - CZECH REP.

(GB) A.G. BETA

Any reproduction of texts, photos and illustrations published here is prohibited and subject to prosecution.

1502-7-2002

Mapewood Paste 140:



Mapewood Paste 140

Adesivo epossidico a consistenza tissotropica, per il restauro di elementi strutturali in legno



CAMPI DI APPLICAZIONE

Incollaggio di parti nuove in legno alle strutture lignee esistenti, previa asportazione delle parti degradate. Riempimento dei fori realizzati sia nell'elemento strutturale in legno da ripristinare che nella protesi, allo scopo di ancorare barre e/o piastre di collegamento.

Alcuni esempi di applicazione

Ripristino di travi, capriate e pilastri in legno di abete, pino, pioppo, quercia e castagno che necessitano di essere ricostruite mediante aggiunta di protesi in legno, eventualmente da ancorare all'elemento originale con barre o piastre metalliche o in materiale composito.

CARATTERISTICHE TECNICHE

Mapewood Paste 140 è un adesivo epossidico a consistenza tissotropica, costituito da due componenti predosati (componente A = resina e componente B = indurente), prodotto secondo una formula sviluppata nei laboratori di ricerca Mapei.

Mapewood Paste 140 è disponibile in due confezioni: la prima, quella tradizionale, è costituita da due fustini di plastica contenenti le due parti di cui si compone il prodotto. Dopo la miscelazione dei due componenti il materiale può essere applicato manualmente con una spatola piana. La seconda confezione di vendita consente di applicare il prodotto, previa miscelazione manuale dei due componenti, mediante estrusione dello stesso da una cartuccia (leggere il paragrafo riguardante la preparazione del prodotto).

Mapewood Paste 140 si applica facilmente sia su superfici verticali sia orizzontali ed indurisce senza ritiro trasformandosi in un composto di eccezionale adesione, compatibilità con il legno e resistenza meccanica.

AVVISI IMPORTANTI

- Nel caso di legni degradati da carie, insetti, oppure di elevata densità (quercia e castagno), applicare **Mapewood Paste 140** sulle superfici in legno solo dopo averle trattate con **Mapewood Primer 100**.
- Non impiegare **Mapewood Paste 140** con temperature inferiori a +10°C.
- Non applicare **Mapewood Paste 140** su superfici bagnate.

MODALITÀ DI APPLICAZIONE

Preparazione delle superfici

Asportare, dopo aver messo in sicurezza la struttura, la porzione di trave, pilastro o capriata degradata praticando un taglio netto. Preparare la protesi, scegliendo un legname di natura corrispondente a quello esistente oppure con durabilità e caratteristiche meccaniche migliori.

Predisporre gli alloggiamenti per gli elementi di collegamento realizzando incavi o fori di dimensioni appropriate sia nell'elemento da consolidare che nella protesi. Elementi idonei sono: barre filettate o tondini di ferro, piastre in acciaio, altri prodotti in materiale composito di cui sia stata verificata la buona adesione superficiale.

Cercare di evitare, durante le operazioni di taglio e foratura, la formazione di scheggiature e di bruciature superficiali o la creazione di zone con fibratura strappata o schiacciata.

A tal fine si consiglia di adottare i seguenti accorgimenti:

- impiegare utensili taglienti di forma e dimensioni appropriate, mantenuti sempre ben affilati (non utilizzare assolutamente lame, punte o frese da ferro o da cemento);
- prevedere idonei supporti e guide per non far deviare gli utensili quando la lama incontra nodi o controfilo;



Mapewood Paste 140



Trave degradata sull'appoggio



Taglio della trave



Preparazione della protesi

- rimuovere spesso i trucioli per evitare che si schiaccino sulle superfici provocando frizione e riscaldamento;
- ripulire bene la superficie, dopo il taglio, da polvere, trucioli e schegge;
- eseguire la preparazione delle superfici in legno preferibilmente entro le 24 ore precedenti l'applicazione di **Mapewood Paste 140**, in modo da evitare fenomeni di ossidazione superficiale, il contatto con agenti inquinanti e il deposito di polvere. Se necessario applicare, sulle pareti dei fori e sulle superfici di taglio, dell'elemento da ripristinare e della protesi, **Mapewood Primer 100** (si raccomanda, prima dell'utilizzo, di leggere attentamente la relativa scheda tecnica) in una o due mani, a seconda della natura del legno impiegato, allo scopo di fissare eventuali fibre libere e migliorare l'adesione di **Mapewood Paste 140**. Attendere circa 5 ore alla temperatura di +20°C prima di procedere alla riparazione dell'elemento danneggiato mediante l'ancoraggio della nuova protesi con **Mapewood Paste 140**.

Nota: Gli elementi in legno di nuovo apporto, prima di essere incollati con **Mapewood Paste 140** o trattati con **Mapewood Primer 100**, devono essere lasciati climatizzare nella zona oggetto dell'intervento. È indispensabile, infatti, che l'umidità contenuta nell'elemento da ripristinare e nella protesi sia $\pm 3\%$ rispetto a quella di equilibrio nelle condizioni di servizio previste, per minimizzare le variazioni dimensionali ed il conseguente sviluppo di tensioni tra le parti incollate.

Preparazione del prodotto

I due componenti di cui è composto **Mapewood Paste 140**, nel caso si utilizzi la confezione costituita dai due fustini di plastica, vanno miscelati fra loro. Versare il componente B (bianco) nel componente A (marrone) e mescolare con trapano munito di agitatore a bassa velocità fino a completa omogeneizzazione dell'impasto (colore marrone chiaro uniforme). Le confezioni sono già predosate. Evitare, quindi, di prelevare quantitativi parziali dalle confezioni per non incorrere in accidentali errori di rapporto che porterebbero al mancato o incompleto indurimento di **Mapewood Paste 140**. Nel caso le confezioni debbano essere impiegate parzialmente utilizzare una bilancia elettronica di precisione. Nel caso invece si impieghi la confezione costituita dai due barattoli di plastica e dalla cartuccia, procedere nel seguente modo: versare il componente B (bianco) nel barattolo contenente il componente A (marrone) e mescolare con un piccolo utensile munito di agitatore fino a completa omogeneizzazione del prodotto (colore marrone chiaro uniforme). Inserire il dischetto estrusore sul barattolo contenente il prodotto miscelato, facendo attenzione di far appoggiare bene il disco sul materiale. Tagliare la cartuccia vuota in testa al filetto ed appoggiarla sul dischetto estrusore. Esercitare una leggera pressione verso il fondo del barattolo in modo da far penetrare **Mapewood Paste 140** all'interno della cartuccia. Posizionare il fondello di chiusura della cartuccia ed avvitare l'ugello in testa alla stessa, dopo averlo tagliato a 45°, in modo da creare un'apertura secondo la larghezza desiderata. Inserire la cartuccia nella pistola per estrarre **Mapewood Paste 140**.

Applicazione dell'impasto

Rispettando i tempi di lavorabilità in funzione della temperatura, riempire il foro oppure l'incavo realizzato su un lato del manufatto in legno (trave, pilastro, capriata) con

Mapewood Paste 140, posizionando la barra o la piastra di collegamento ed accostare la protesi all'elemento da ripristinare assicurandosi che le superfici di taglio combacino perfettamente.

Nel caso in cui per alloggiare gli elementi di collegamento siano stati realizzati degli incavi (ad esempio per posizionare delle piastre o in situazioni di accessibilità solo laterale), si consiglia di:

- posizionare e fissare la protesi nella configurazione prevista, assicurandosi che il contatto tra la protesi e l'elemento da consolidare sia il più ampio possibile;
- applicare, con una spatola, la giusta quantità di **Mapewood Paste 140** nello spazio destinato ad ospitare l'elemento di collegamento;
- inserire l'elemento di collegamento;
- chiudere l'alloggiamento che ospita l'elemento di collegamento con un listello di legno di opportune dimensioni;
- rimuovere l'eventuale eccesso di **Mapewood Paste 140**, con una spatola.

Nel caso in cui gli alloggiamenti per gli elementi di collegamento siano stati realizzati con fori (ad esempio per posizionare delle barre o in situazioni di accessibilità solo dalle testate), si consiglia di:

- sistemare gli elementi di collegamento negli alloggiamenti previsti all'interno della sezione da consolidare ed iniettare **Mapewood Paste 140** attraverso il piccolo foro trasversale realizzato a tale scopo;
- posizionare e fissare la protesi nella configurazione prevista, assicurandosi che il contatto tra la protesi e l'elemento da consolidare sia il più ampio possibile;
- iniettare **Mapewood Paste 140** nella parte di alloggiamento per gli elementi di collegamento all'interno della protesi.

Nota: ove possibile, è sempre consigliabile applicare **Mapewood Paste 140** su entrambe le superfici da incollare. Rimuovere l'eventuale **Mapewood Paste 140** in eccesso con una spatola.

ISTRUZIONI DI SICUREZZA PER LA PREPARAZIONE E LA MESSA IN OPERA

Mapewood Paste 140 a seguito di contatto ripetuto o prolungato con la pelle può causare dei fenomeni di sensibilizzazione. Indossare sempre guanti ed occhiali protettivi durante l'impiego del prodotto. In caso di contatto con la pelle lavare con abbondante acqua e sapone e qualora si manifestassero sintomi di sensibilizzazione consultare un medico. Nel caso di contatto con gli occhi lavare con acqua corrente e consultare un medico. Utilizzare in ambiente aerato.

Pulizia

A causa dell'elevata adesione di **Mapewood Paste 140** anche su metallo si consiglia di lavare gli attrezzi da lavoro con solventi (alcol etilico, toluolo, ecc.) prima dell'indurimento del prodotto.

CONSUMI

1,59 kg/l di vuoto da riempire

CONFEZIONI

Fustini di plastica da 3 kg (A + B) e kit

DATI TECNICI (valori tipici)		
DATI IDENTIFICATIVI DEL PRODOTTO		
Voce doganale:	3907 30 00	
	Componente A	Componente B
Consistenza:	pasta densa	pasta densa
Colore:	marrone	bianco
Peso specifico (g/cm³):	1,6	1,6
Viscosità Brookfield (mPa-s):	550.000 (Helipath F - giri 5)	220.000 (Helipath F - giri 5)
Conservazione:	24 mesi negli imballi originali non aperti a temperatura compresa tra +5°C e +30°C	
Classificazione di pericolo secondo Direttiva 88/379 CEE:	irritante	nocivo
Rapporto di miscelazione:	Componente A : Componente B = 2 : 1	
Consistenza dell'impasto:	pasta tissotropica	
Colore dell'impasto:	marrone chiaro	
Peso specifico dell'impasto (g/cm³):	1,5	
Viscosità Brookfield (mPa-s):	490.000 (Helipath F - giri 5)	
Tempo di lavorabilità		
- a +10°C:	150'	
- a +23°C:	60'	
- a +30°C:	30'	
Tempo di presa		
- a +10°C:	14-16 h	
- a +23°C:	4-5 h	
- a +30°C:	2 h 30' - 3 h	
Temperatura di applicazione:	da +10°C a +35°C	
Indurimento completo:	7 giorni	
Adesione (shear a compressione) legno/legno (abete)		
- dopo 7 gg a +23°C:	10 N/mm²	
Resistenza a trazione (ASTM D 638):	18 N/mm²	
Allungamento a trazione (ASTM D 638):	1%	
Resistenza a flessione (ISO 178):	30 N/mm²	
Modulo elastico a flessione (ISO 178):	4.000 N/mm²	
Resistenza a compressione (ASTM D 695):	45 N/mm²	
Modulo elastico a compressione (ASTM D 695):	3.000 N/mm²	



Applicazione di
Mapewood Paste 140



Levigatura della trave

Mapewood Paste 140



Posizionamento del disco estrusore



Riempimento della cartuccia



composto da barattoli di plastica da 450 g (A + B), disco estrusore e cartuccia vuota formato standard.

IMMAGAZZINAGGIO

Il prodotto deve essere conservato negli imballi originali in ambienti con temperatura non inferiore a +10°C.

AVVERTENZA

Le indicazioni e le prescrizioni sopra riportate, pur corrispondendo alla nostra migliore esperienza, sono da ritenersi, in ogni caso, puramente indicative e dovranno essere

confermate da esaurienti applicazioni pratiche; pertanto, prima di adoperare il prodotto, chi intenda farne uso è tenuto a stabilire se esso sia o meno adatto all'impiego previsto e, comunque, si assume ogni responsabilità, che possa derivare dal suo uso.

Le referenze relative a questo prodotto sono disponibili su richiesta

VOCI DI CAPITOLATO

Ripristino di strutture in legno come travi, pilastri e capriate. L'intervento, che dovrà prevedere l'ancoraggio di barre metalliche ad aderenza migliorata in appositi fori, di diametro e profondità appropriate, predisposti nell'elemento da ripristinare e nella protesi oppure in adeguate sedi ricavate negli elementi stessi (al fine di assicurare una giunzione strutturale tra i due materiali), dovrà essere effettuato impiegando un adesivo epossidico di consistenza tissotropica (tipo **Mapewood Paste 140** della MAPEI S.p.A.). Le superfici degradate da carie, insetti oppure di elevata densità (quercia e castagno), prima dell'incollaggio, dovranno essere trattate con un primer epossidico (tipo **Mapewood Primer 100** della MAPEI S.p.A.).

Le caratteristiche dell'adesivo dovranno essere le seguenti:

Rapporto di miscelazione:	Componente A : Componente B = 2 : 1
Consistenza dell'impasto:	pasta tissotropica
Colore dell'impasto:	marrone chiaro
Peso specifico dell'impasto:	1,5 g/cm ³
Viscosità Brookfield:	490.000 mPa·s (Helipath F - giri 5)
Tempo di lavorabilità a +23°C:	60'
Tempo di presa a +23°C:	4-5 h
Temperatura di applicazione:	da +10°C a +35°C
Indurimento completo:	7 giorni
Adesione shear a compressione legno/legno (abete):	10 N/mm ² (dopo 7 gg a +23°C)
Resistenza a trazione (ASTM D 638):	18 N/mm ²
Allungamento a trazione (ASTM D 638):	1%
Resistenza a flessione (ISO 178):	30 N/mm ²
Modulo elastico a flessione (ISO 178):	4.000 N/mm ²
Resistenza a compressione (ASTM D 695):	45 N/mm ²
Modulo elastico a compressione (ASTM D 695):	3.000 N/mm ²



IL PARTNER MONDIALE DEI COSTRUTTORI

SISTEMI DI GESTIONE CERTIFICATI (Qualità, Ambiente e Sicurezza) di MAPEI GROUP



MAPEI S.p.A. - ITALY



MAPEI FRANCE

MAPEI INC - CANADA

RESCON MAPEI AS - NORWAY

MAPEI KFT - HUNGARY

MAPEI FAR EAST Pte Ltd

MAPEI Sro - CZECH REP.

(I) A.G. BETA

La riproduzione di testi, foto e illustrazioni di questa pubblicazione è vietata e viene perseguita ai sensi di legge

1503-3-2002

Parafuso auto-perfurante VGZ 7:



VGZ PARAFUSOS TODO-ROSCA

cabeça cilíndrica, broca auto-perfurante, zincado a quente



Ø	código	Ø x comprimento	inserto	peças/embalagem
7	VGZ7100	7 x 100	TX 30	25
	VGZ7140	7 x 140	TX 30	25
	VGZ7180	7 x 180	TX 30	25
	VGZ7220	7 x 220	TX 30	25
	VGZ7260	7 x 260	TX 30	25
	VGZ7300	7 x 300	TX 30	25
9	VGZ7340	7 x 340	TX 30	25
	VGZ9160	9 x 160	TX 40	25
	VGZ9200	9 x 200	TX 40	25
	VGZ9240	9 x 240	TX 40	25
	VGZ9280	9 x 280	TX 40	25
	VGZ9320	9 x 320	TX 40	25
	VGZ9360	9 x 360	TX 40	25
	VGZ9400	9 x 400	TX 40	25
	VGZ9450	9 x 450	TX 40	25
	VGZ9500	9 x 500	TX 40	25

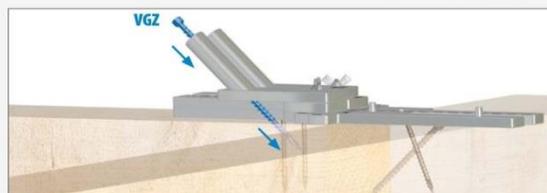


VGZ MAX

Calibrador para parafusos todo rosca VGZ



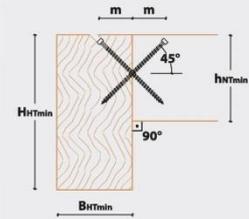
código	descrição	peças/embalagem
ATVGZMAXX		1
Conteúdo:		
ATVGZMAX01	1) calibrador VGZ KIT BASE	1
ATVGZMAX02	2) calibrador VGZ KIT CENTRAL	1
ATVGZMAX03	3) calibrador VGZ 7 mm	1
ATVGZMAX04	3) calibrador VGZ 9 mm	1
HBS680		100
ATINTX30200	inserto TX 30 200 mm	1
ATINTX40200	inserto TX 40 200 mm	1
MUT3156	4) porca com asas DIN315 M6	2
ATVGZVITE	parafuso para montagem KIT BASE	2



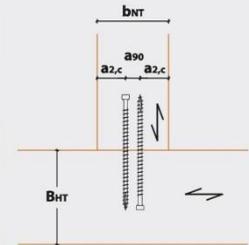
VALORES ESTÁTICOS - LIGAÇÃO COM CORTE PRINCIPAL - TRAVE SECUNDÁRIA

Junção com ângulo recto											
d ₁ [mm]	L [mm]	S _g [mm]	H _{HT min} [mm]	B _{HT min} [mm]	h _{NT min} [mm]	b _{NT min} [mm]		m [mm]	Nº pares	V _{zul} admissível [kN]	R _{v,k} característico [kN]
						Sem pré-furo	Com pré-furo				
7	100	28	95	60	95	70	60	45	1	1,39	2,74
						110	100			2,77	5,49
						150	130			4,16	8,23
	140	48	120	70	120	70	60	59	1	2,38	4,71
						110	100			4,75	9,41
						150	130			7,13	14,12
	180	68	150	85	150	70	60	74	1	3,37	6,67
						110	100			6,73	13,33
						150	130			10,10	20,00
	220	88	180	100	180	70	60	88	1	4,36	8,63
						110	100			8,71	17,25
						150	130			13,07	25,88
260	108	205	115	205	70	60	102	1	5,35	10,59	
					110	100			10,69	21,17	
					150	130			16,04	31,76	
300	128	235	130	235	70	60	116	1	6,34	12,55	
					110	100			12,67	25,09	
					150	130			19,01	37,64	
340	148	265	145	265	70	60	130	1	7,33	14,51	
					110	100			14,65	29,01	
					150	130			21,98	43,52	
9	160	58	135	80	135	90	70	67	1	3,69	7,31
						140	130			7,38	14,62
						190	170			11,07	21,93
	200	78	165	95	165	90	70	81	1	4,96	9,83
						140	130			9,93	19,66
						190	170			14,89	29,49
	240	98	190	105	190	90	70	95	1	6,24	12,35
						140	130			12,47	24,70
						190	170			18,71	37,05
	280	118	220	120	220	90	70	109	1	7,51	14,87
						140	130			15,02	29,74
						190	170			22,53	44,61
320	138	250	135	250	90	70	123	1	8,78	17,39	
					140	130			17,56	34,78	
					190	170			26,35	52,18	
360	158	275	150	275	90	70	137	1	10,06	19,91	
					140	130			20,11	39,82	
					190	170			30,17	59,74	
400	178	305	165	305	90	70	151	1	11,33	22,43	
					140	130			22,66	44,87	
					190	170			33,98	67,30	
450	203	340	180	340	90	70	169	1	12,92	25,58	
					140	130			25,84	51,17	
					190	170			38,76	76,75	
500	228	375	200	375	90	70	187	1	14,51	28,73	
					140	130			29,02	57,47	
					190	170			43,53	86,20	

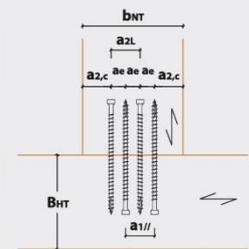
GEOMETRIA E MONTAGEM:



1 par:



2 ou mais pares:



Notas

- Os valores admissíveis (V_{zul}) são calculados conforme a norma DIN 1052:1988.
- Os valores característicos (R_{v,k}) são calculados segundo a norma DIN 1052:2004, p_k = 380 kg/m³.

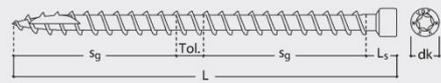
DISTÂNCIAS MÍNIMAS ACONSELHADAS

sem pré-furo	a _{1 //} [mm]	a _{2 l} [mm]	a _{2,c} [mm]	a ₉₀ [mm]	a _e [mm]
Ø 7	35	35	28	11	18
Ø 9	45	45	36	14	23

com pré-furo	a _{1 //} [mm]	a _{2 l} [mm]	a _{2,c} [mm]	a ₉₀ [mm]	a _e [mm]
Ø 7	35	35	21	11	18
Ø 9	45	45	27	14	23

GEOMETRIA PARAFUSO VGZ

d ₁ [mm]	7,00	9,00
dk [mm]	9,50	11,50
pré-furo [mm]	4,00	5,00



L_s = 25 mm
 Tol. = 20 mm
 S_g = (L - L_s - Tol.) / 2

Varão auto-perfurante WB16:

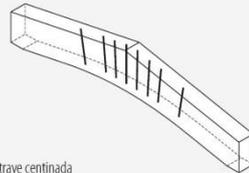


encaixes

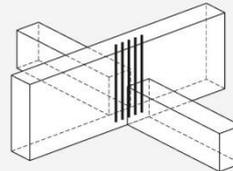
WB SISTEMA DE REFORÇO ESTRUTURAL em aço a carbono classe 8.8 ($f_{u,k}=800\text{N/mm}^2$)



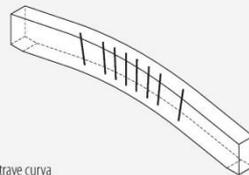
código	Ø	Ø furo	comprimento	peças/embalagem
CS220016	16	12	2200	1
CS220020	20	15	2200	1
ATCS007	encaixes Ø 16			1
ATCS008	encaixes Ø 20			1



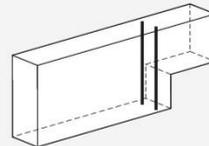
trave centinada



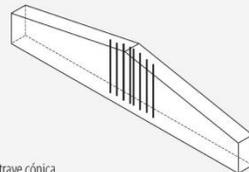
carga pendurada



trave curva



trave entalhada



trave cônica





BERBEQUIM ROTATÓRIO

código	peças/embalagem
DUD32II	1

dados técnicos

• potência	1700 W
• Ø capacidade de furar	aço Ø 10 - 32 mm madeira Ø 25 - 80 mm
• velocidade (rotações/min)	105/180/330/550
• engate ferramenta	engate borne 3 (MK 3)
• peso	8,3 kg
• marchas / rotações / binário	1+2 / 100 1/min / 58,4 Nm 1+4 / 170 1/min / 34,1 Nm 2+3 / 300 1/min / 18,8 Nm 3+4 / 510 1/min / 10,9 Nm

ACESSÓRIOS

código	descrição	peças/embalagem
ATRE2014	mandril 1,5 - 20	1
ATRE2019	adaptador mandril	1
F1410112	broca Ø 12 compr. 1 metro	1
F1410115	broca Ø 15 compr. 1 metro	1

• medidas até 3 m solicitando

ATCS009	set furação Ø 12	1
ATCS012	broca Ø 12 x 400 mm para ATCS009	1
ATCS010	set furação Ø 15	1
ATCS015	broca Ø 15 x 400 mm para ATCS010	1

• Os sets são compostos por 2 extensões de 1000 mm + 1 broca de 400 mm

VALORES ESTÁTICOS - RESISTÊNCIA COM EXTRACÇÃO

Hipoteses de cálculo: $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$ e $k_{mod} = 0,9$

Para diferentes massas de volume e diferentes k_{mod} :

$$R'_{ax,d} = R_{ax,d} \cdot k_f \cdot k_M$$

l_{ef}	Ø 16	Ø 20
	$R_{ax,d}$	$R_{ax,d}$
100 mm	11,2 kN	14,0 kN
200 mm	22,4 kN	28,0 kN
300 mm	33,6 kN	42,0 kN
400 mm	44,8 kN	56,0 kN
500 mm	56,0 kN	70,0 kN
600 mm	67,2 kN	84,0 kN
700 mm		98,0 kN
800 mm	$d_{e,ef} = 644 \text{ mm}$: $R_{ax,d,max} = 72,38 \text{ kN}$	$d_{e,ef} = 808 \text{ mm}$: $R_{ax,d,max} = 113,10 \text{ kN}$

Os valores intermédios podem ser interpolados linearmente. Os valores $R_{ax,d,max}$ correspondem a forças de ruptura para tracção e não devem ser ultrapassados! Estes não dependem da massa de volume, da classe de utilização e da classe de duração da carga.

Caso se obtenha um valor superior a $R_{ax,d,max}$, se deverá continuar o cálculo com $R_{ax,d} = 72,38 \text{ kN}$ para $d = 16 \text{ mm}$ ou seja $R_{ax,d} = 113,1 \text{ kN}$ para $d = 20 \text{ mm}$!

Os valores de projecto $R_{d,k}$ são calculados segundo a norma DIN 1052:2004.

tipo	Gama de sistemas de reforço		
	diâmetro d_1 [mm]	comprimento [mm]	pré-furo d_p [mm]
CS100850	16	3000	12
CS100855	20	3000	15

Antes da posa, as barras deverão ser cortadas com o comprimento exacto necessário com o auxílio de ferramentas tradicionais (ex. máquina de cortar barras).

QUO. CORRECTOR k_f PARA MASSAS DE VOLUMES DIFERENTES ρ_k :

GL	24c	24h 28c	28h 32c	32h 36c	36h
ρ_k em kg/m^3	350	380	410	430	450
k_f	0,848	1,000	1,164	1,280	1,402

QUO. CORRECTOR k_M PARA DIFERENTES k_{mod}

k_{mod}	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,80	0,90	1,10
k_M	0,555	0,611	0,667	0,722	0,778	0,889	1,000	1,222

ANEXO C

Pré-dimensionamento do espaçamento entre elementos de ligação, S (x):

Cálculo da capacidade resistente ao corte, $F_{r,Rd}$, de cada varão efectuado de acordo com a seguinte expressão, sugerida pelo Eurocódigo 3:

$$F_{r,Rd} = 0,6 \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_b}{\gamma_{M_2}} \quad (C.1)$$

Onde f_{ub} é o valor nominal da tensão de rotura à tracção (800 MPa – classe 8.8); A_b a área do plano de corte que atravessa o varão ($\varnothing=12$ mm); e γ_{M_2} o coeficiente parcial de segurança ($\gamma_{M_2} = 1,25$ – Valor recomendado).

$$F_{r,Rd} = 0,6 \cdot 800 \cdot \frac{\pi \cdot 12^2}{4 \cdot 1,25} = 43,4 \text{ kN}$$

Cálculo da força aplicada em cada elemento de ligação, F_i , é dado pela seguinte expressão:

$$F_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i \cdot s_i \cdot \frac{V}{(EI)_{ef}} \text{ para } i = 1 \text{ e } 3 \quad (C.2)$$

Onde EI_{ef} é a rigidez efetiva de flexão; V é o esforço de corte máximo aplicado (quantificado com base no valor da resistência à flexão sugerido pela EN 1194:1999 – 24 MPa); E_i é o módulo de elasticidade de cada elemento da secção transversal (11600 MPa – valor sugerido pela EN 1194:1999); A_i é a área de cada elemento da secção transversal (140x200 mm²); e s_i é o espaçamento entre elementos de ligação (considera-se 200 mm por questões técnicas).

Nota: foram efetuados cálculos intermédios à expressão apresentada acima, utilizando as expressões 2.5 a 2.11 do ponto 2.9.3.2.

Para o cálculo de F_i , foi ainda necessário quantificar o valor de k_{ser} (cálculo de γ_i), utilizando a expressão 2.4 do ponto 2.9.3.1 sugerida pelo Eurocódigo 5:

$$k_{ser} = \frac{\rho_k^{1,5} \cdot d}{20} = 4444,5 \text{ N/mm} \quad (C.3)$$

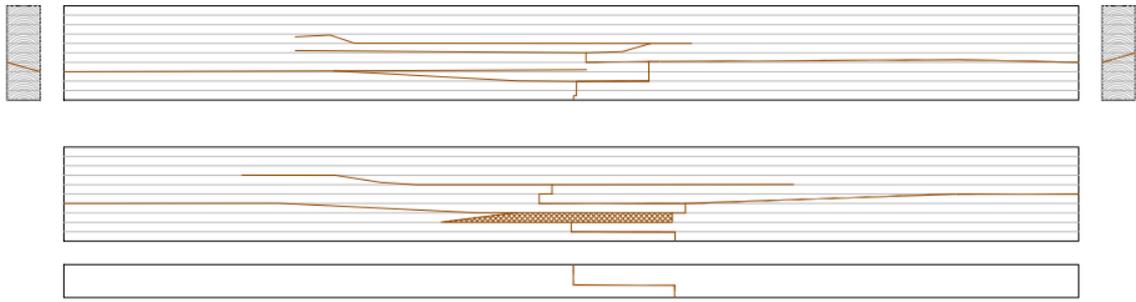
Onde $\rho_k=380 \text{ kg/m}^3$ é a massa volúmica e $d=12\text{mm}$ é o diâmetro interno da rosca do varão WB 16.

Assim, após cálculos intermédios, obtém-se o valor de $F_i = 20,6 \text{ kN}$.

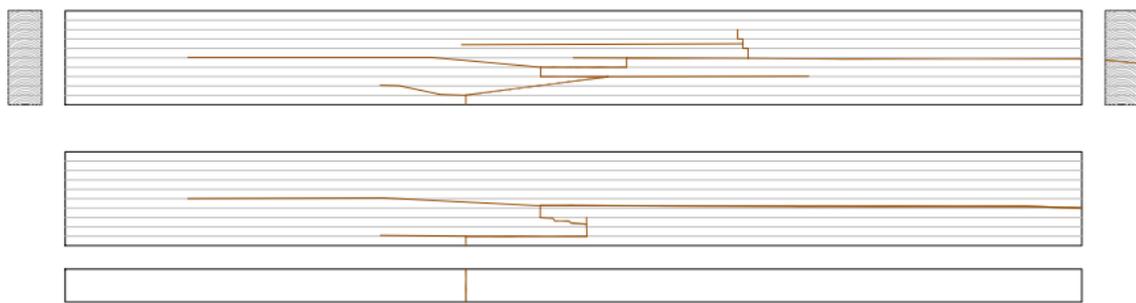
Como $F_{r,Rd} > F_i$, está verificada a segurança do varão WB 16 para um espaçamento de 200mm.

ANEXO D

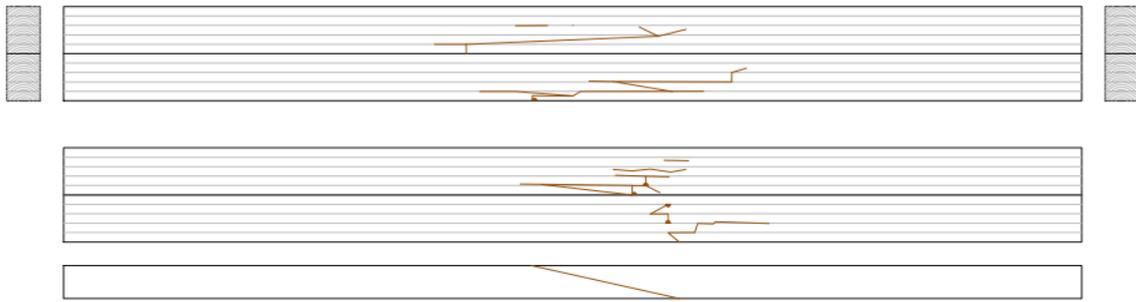
V1



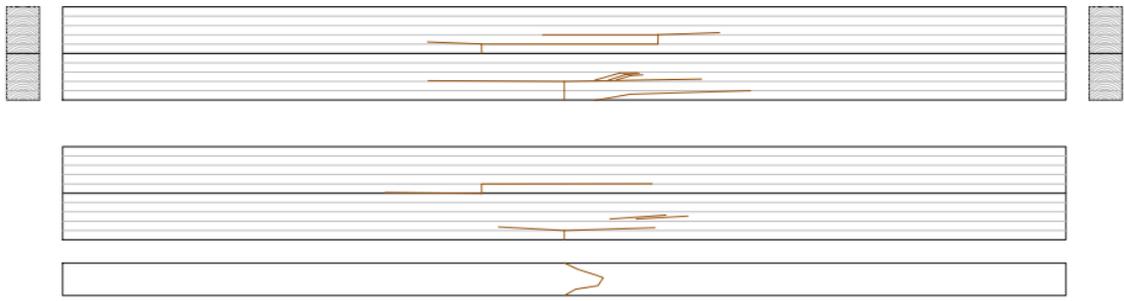
V2



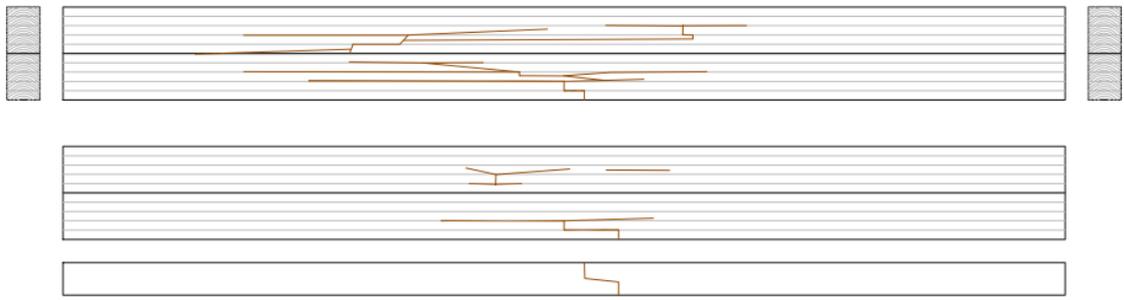
R1



R2



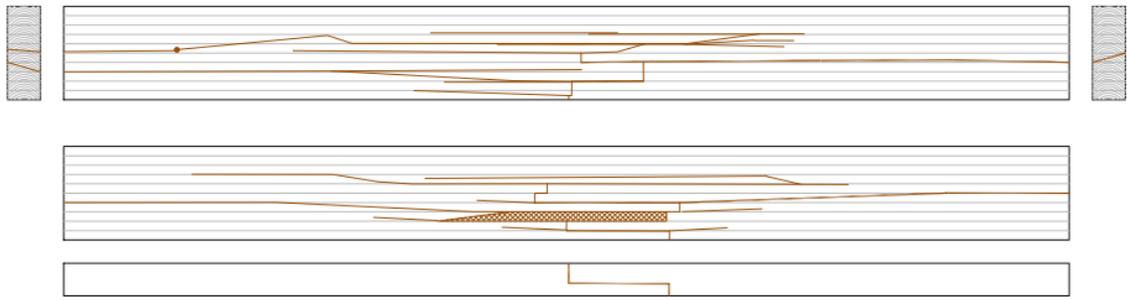
R3



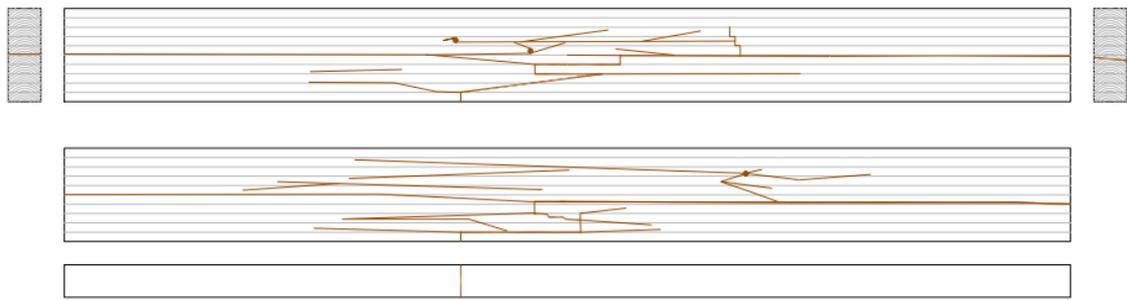
R4



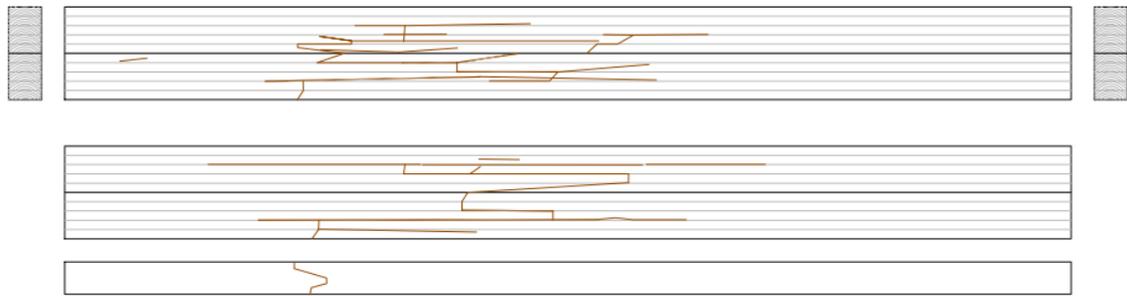
V1R



V2R



R4R



ANEXO E

Dimensionamento do diâmetro do varão roscado horizontal, \emptyset :

Igualando a força de tração de uma lamela de madeira lamelada colada (F_t^{GL24h}), onde se situa o finger joint rompido à força de tração do varão roscado (F_t^S):

$$F_t^{GL24h} = F_t^S \quad (\text{E.1})$$

Resulta:

$$\sigma_t^{GL24h} \cdot A^{GL24h} = f_{ub} \cdot 2A^S \Leftrightarrow 16,5 \cdot 140 \cdot 40 = 800 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \emptyset^2}{4} \right) \cdot 2 \Leftrightarrow \emptyset \approx 8\text{mm}$$

Onde f_{ub} é o valor nominal da tensão de rotura à tracção (800 MPa – classe 8.8); A^S a área da secção transversal do varão roscado (2 varões roscados); σ_t^{GL24h} a tensão resistente à tração da madeira lamelada colada (16,5 MPa); e A^{GL24h} a área da secção transversal de uma lamela (140x40 mm²).

ANEXO F

Cálculo das tensões resistentes das vigas R1 e R2:

O cálculo das tensões normais atuantes para qualquer secção ao longo de determinado elemento, bem como na sua zona de ligação das faces em contacto (condicionada pela deslização) é dada por:

$$\sigma_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot \frac{Mrd}{(EI)_{ef}} \quad (F.1)$$

$$\sigma_{m,i} = 0,5 \cdot E_i \cdot h_i \cdot \frac{Mrd}{(EI)_{ef}} \quad (F.2)$$

Onde Mrd é o momento flector resistente; σ_i é a tensão ao nível do centro geométrico de cada elemento da secção transversal (ver figura 2.27); e $\sigma_{m,i}$ é tensões nas extremidades dos elementos da secção transversal (ver figura 2.27).

Para o cálculo das tensões tangenciais máximas, onde as tensões normais são nulas (ver figura 2.30), é utilizada a seguinte expressão:

$$\tau_{2,max} = (\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0,5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h_2^2) \cdot \frac{Vrd}{b_2 \cdot EI_{ef}} \quad (F.3)$$

Onde Vrd é o esforço de corte máximo.

Nota: foram efetuados cálculos intermédios à expressão apresentada acima, utilizando as expressões 2.5 a 2.11 do ponto 2.9.3.2.

De acordo com o quadro 5.2 do ponto 5.2, a viga R1 apresenta um de Mrd de 69,6 kN.m e respetivo valor de Vrd de 47,1 kN e a viga R2 apresenta um Mrd de 104,8 kN.m e Vrd de 71,3 kN.

Para o cálculo das tensões (cálculo de γ_i), foi considerado o k_{ser} obtido através dos ensaios experimentais de corte simples (3687 N/mm) e k_{ser} sugerido pelo Eurocódigo 5 (4444,5 N/mm), ambos quantificados no ponto 4.3.

O quadro F.1 apresenta os valores das tensões resistentes para as vigas R1 e R2 para um espaçamento, S , de 200 mm:

Quadro F.1 – Valores das tensões resistentes das vigas R1 e R2

Viga	k_{ser} (regressão linear)		k_{ser} (EC5)	
	f_m (MPa)	$\tau_{2,max}$ (MPa)	f_m (MPa)	$\tau_{2,max}$ (MPa)
R1	30,1	3,6	29,3	3,5
R2	45,6	5,5	44,3	5,2
Nota: o valor de f_m é igual a $\sigma_i + \sigma_{m,i}$				