

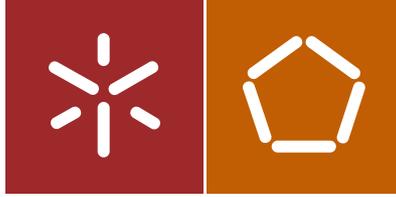


Luís António Veiga da Costa

Fendas de secagem em vigas de madeira.
Causas, efeitos na capacidade resistente e
métodos de reparação

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Luís António Veiga da Costa

Fendas de secagem em vigas de madeira.
Causas, efeitos na capacidade resistente e
métodos de reparação

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

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Branco

Dedicatória

À minha família

Agradecimentos

Em primeiro expresso o meu apreço ao Professor Doutor Jorge Branco, pela total disponibilidade e orientação, por me ter convidado a participar em inúmeros eventos, nos quais participei, que foram fundamentais para a minha motivação e formação, e por me ter proporcionado todas as condições necessárias à realização da presente dissertação de mestrado.

Apresento também o meu agradecimento aos técnicos do laboratório de estruturas da Universidade do Minho, especialmente ao Sr. Matos e ao Sr. Marcos, pela disponibilidade e atenção que demonstraram durante os trabalhos que decorreram no laboratório e também pela confiança que me depositaram, aquando o manuseamento dos aparelhos de laboratório, sendo esta uma vertente bastante importante para mim.

Apresento um agradecimento especial à minha família, em particular aos meus pais, pela forma que durante toda a minha vida, me encorajaram e apoiaram incondicionalmente.

Expresso o meu agradecimento a todos os meus colegas e amigos pelo apoio possível ao longo do período académico.

Resumo

A madeira é um material higroscópico, e por isso, está em constante troca com o ambiente circundante. Sob condições de humidade relativa e temperatura constantes, a madeira tende a atingir um teor em água de equilíbrio constante. Além de higroscópica, a madeira é heterogénea, anisotrópica e retrátil. No entanto, o comportamento retrátil da madeira só se verifica, quando esta varia de teor em água para patamares inferiores ao seu ponto de saturação das fibras, ponto a partir do qual a madeira começa a perder água higroscópica contida nas paredes celulares. A heterogeneidade e a anisotropia da madeira, fazem com que a retração da madeira seja distinta para as três direções fundamentais de crescimento. A retração tangencial é cerca de 1.5 a 2 vezes superior à radial. Este diferencial nas retrações transversais da madeira, são a principal causa da ocorrência de fendas longitudinais às fibras da madeira. Estas ocorrem normalmente devido a processos de secagem não controlados, que resultam em tensões de tração internas transversais às fibras superiores às resistentes, sendo esta uma das propriedades fracas do material lenhoso. Estas fendas desenvolvem-se segundo planos radiais. Uma madeira com um coeficiente de anisotropia (relação entre a retração tangencial e radial) próximo da unidade, considera-se como sendo estável dimensionalmente, e menos propensa ao surgimento de fendas e empenos. No entanto, as condições higrotérmicas do ambiente circundante de uma peça de madeira não são constantes, fazendo com que a madeira perca e ganhe humidade em função da variação do clima circundante, sempre em busca do teor em água de equilíbrio. Como o transporte de humidade no interior da madeira é lento, as camadas externas de uma dada secção atingem mais rapidamente o teor em água de equilíbrio que as camadas internas. Esta diferença entre teores em água entre camadas adjacentes, designado como gradiente de humidade, resulta num diferencial de extensões de retração, e por conseguinte em tensões internas, que quando ultrapassam a capacidade resistente à tração transversal às fibras se libertam em forma de fenda. São vários os fatores que estão na génese do aparecimento de fendas e do modo como estas afetam a resistência dos elementos estruturais de madeira. Contudo existem métodos e técnicas de reparação especialmente desenvolvidos, para minimizar ou anular o seu efeito negativo na capacidade portante dos elementos estruturais de madeira.

Palavras-chave: Tensões induzidas pela humidade, gradientes de humidade, retração, higroscopicidade, anisotropia, fendas, tensões internas, capacidade resistente.

Abstract

Wood is a hygroscopic material, and therefore, is in continuous exchange with the surrounding environment. Under conditions of relative humidity and constant temperature, the wood tends to reach a constant water content. In addition to the hygroscopic nature, wood is heterogeneous, and anisotropic retractable. However, the behavior of wood retractable only occurs, when their water content change in a range below fibers saturation point, from which the wood begins to lose hygroscopic water contained in cell walls. The heterogeneity and anisotropy of timber, make retraction of the timber be different for the three fundamental directions. The tangential shrinkage is about 1.5 to 2 times the radial direction. This difference in transverse retraction of the timber, are the primary cause of the occurrence of longitudinal cracks on wood fibers. Is typically occurs because of uncontrolled drying processes which result in transverse internal tensile stresses higher than the resistant fibers, this being a poor property of timber. These cracks develop radial planes. With a coefficient of anisotropy (the ratio between tangential and radial shrinkage) close to the unit, is considered to be dimensionally stable, and less likely to cracks and warp. However, the hygrothermal conditions of the surrounding environment of a piece of wood are not constant, causing losses and gains of wood moisture content in function of the variation in humidity of the surrounding atmosphere, always seeking the equilibrium water content. As the moisture transport within timber is slow, the outer layers of a given section quickly reach the equilibrium water content of the outer layers. This different between water contents between adjacent layers, referred to as moisture gradient, giving rise differential shrinkage extensions, and therefore in internal stresses, which when exceed the load bearing capacity transversal to the fibers are released in the form of cracks. There are several factors that are at the origin of cracks and how these affect the resistance of structural elements of wood. However there are methods and repair techniques specifically designed to minimize or cancel its negative effect on the bearing capacity of the structural elements of wood.

Keywords: Moisture induced stresses, moisture gradients, shrinkage, hygroscopicity, anisotropy, cracks, internal stresses, load-bearing capacity.

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	III
Abstract	V
Índice	VI
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tabelas	XIX
Lista de Símbolos, Siglas e Abreviaturas	XXI
1 Introdução	1
1.1 Motivação & Objetivos	1
1.2 Estrutura da Dissertação	3
2 Estruturas de madeira e tensões de secagem	5
2.1 Introdução Histórica	5
2.2 Teor em água	8
2.2.1 Transporte da humidade & Variações dimensionais	9
<i>Permeabilidade</i>	12
2.3 Produção, controlo de qualidade e requisitos - MLC	12
2.3.1 Adesivos e qualidade da junta colada	15
<i>Adesivos</i>	15
2.4 Defeitos da madeira e características naturais	16
2.4.1 Fendas/empenos e distorções no processo de produção da madeira serrada	16
<i>Abate</i>	17
<i>Falquejamento</i>	18

	<i>Serração</i>	18
	<i>Secagem</i>	19
2.5	Tipos de fendas em madeira maciça	25
2.5.1	Fendas na classificação de madeiras segundo classes de qualidade	26
2.5.2	Fendas em elementos de madeira	27
	<i>Fendas em elementos aplicados em obra</i>	27
	<i>Fendas em novos elementos de madeira</i>	29
	<i>Transporte e armazenamento em obra</i>	29
2.6	Avaliação dos efeitos das condições ambientais	30
2.6.1	Métodos de medição	32
	<i>Temperatura e da humidade relativa</i>	32
	<i>Teor em água da madeira</i>	32
2.6.2	Temperatura, humidade relativa e teor em água a longo prazo	35
	<i>Escolha do método de medição e verificação dos dados medidos</i>	35
	<i>Instalação do equipamento de medição, leitura e processamento dos dados</i>	36
	<i>Processamento e representação dos resultados</i>	37
2.6.3	Medições de curto e longo prazo	40
	<i>Resultados e observações de medições a curto prazo</i>	40
	<i>Resultados e observações de medições a longo prazo</i>	42
	<i>Diminuição dos gradientes de humidade</i>	46
2.7	Tensões e fendas induzidas pela humidade (MiS)	47
2.7.1	Medição das tensões induzidas pela humidade	48
	<i>Resultados experimentais e numéricos</i>	50
2.8	Efeito das variações do teor em água e gradientes em ligações	51
3	Falhas em Estruturas de Madeira Lamelada Colada	55
3.1	Falhas e colapsos de estruturas de madeira	55
3.1.1	Análise de casos	55
	<i>Colapso da estrutura de cobertura do Siemens Arena (Lituânia)</i>	56
	<i>Colapso da cobertura do Bad Reichenhall Ice-Arena (Alemanha)</i>	57
	<i>Edifício desportivo, colapso da estrutura de cobertura - caso 108</i>	59
	<i>Pavilhão desportivo</i>	60
3.1.2	Sistemas de classificação de falhas em estruturas	63
3.1.3	Armazenamento de dados de falhas em estruturas de madeira	64
3.1.4	Avaliação e análise de dados estatísticos de falhas e danos	65
3.2	Fendas em MLC	67

3.3	Avaliação da capacidade de carga residual de vigas com fendas	68
3.3.1	Largura efetiva e fator de modificação, EC5	68
3.3.2	Avaliação das consequências das fendas	72
3.3.3	Resistência ao corte de vigas de MLC com fendas	73
3.3.4	Investigações numéricas	77
4	Reparação de fendas de delaminação e de retração em vigas	81
4.1	Reparação de fendas	81
4.1.1	Métodos tradicionais	83
	<i>Por cintagem</i>	84
	<i>Com parafusos</i>	85
4.1.2	Reparação e colmatação de fendas por colagem	86
	<i>Injeção de fendas com cola</i>	87
	<i>Colmatação de fendas com cunha de madeira colada</i>	88
	<i>Reparação de fendas com cola epoxídica e varões de reforço</i>	89
4.1.3	Reparação da delaminação das juntas coladas em MLC e de fissuras	90
	<i>Técnicas de reparação de fendas de retração ou de delaminação</i>	92
4.1.4	Reforço ao corte de vigas de MLC com varões colados	93
4.2	Reparação de vigas com fendas	95
4.2.1	Sistema de armadura interna	95
	<i>Parafusos auto-perfurantes de dupla rosca inclinados</i>	95
	<i>Varões inclinados ou armadura triangular colados com resina epóxi</i>	98
4.2.2	Sistema misto (armadura interna & armadura de flexão)	100
	<i>Chapa metálica na face inferior ligada com parafusos de porca</i>	102
	<i>Chapa metálica na face inferior ligada com tirantes metálicos e esticadores de aço</i>	104
	<i>Reforço de vigas com chapa metálica e parafusos auto-perfurantes</i>	105
5	Trabalho Experimental	109
5.1	Materiais	110
5.1.1	Inspeção e diagnóstico dos provetes de madeira	110
	Medição das propriedades geométricas	111
	Massa Volúmica Aparente	112
5.1.2	Materiais de reforço	113
5.2	Configurações usadas nos provetes, sistema de numeração	113
5.3	Análise estatística da resistência à flexão	113

5.4	Instrumentos e medidores de dados	116
5.4.1	Detalhes do equipamento	116
5.4.2	Configuração de teste e localização dos equipamentos de medição	116
5.5	Expressões de resultados	118
5.5.1	Flexão	118
	<i>Intervalo de deformação elástica</i>	118
	<i>Módulo de Elasticidade Local</i>	119
	<i>Módulo de Elasticidade Global</i>	120
	<i>Resistência à flexão</i>	120
	<i>Esforços</i>	121
	<i>Coefficiente de Ductilidade Estática</i>	121
5.6	Estudo analítico/ pré avaliação dos resultados esperados	122
5.6.1	Vigas de Classe EE e E	122
	<i>Propriedades Geométricas e resistentes</i>	122
	<i>Esforços e deslocamentos máximos estimados - ULS</i>	122
	<i>Esforços e deslocamentos máximos estimados - ULS considerando γ_w</i>	123
	<i>Esforços e deslocamentos máximos estimados - SLS</i>	124
	<i>Velocidade do ensaio</i>	124
	<i>Cálculo de tensões e extensões</i>	125
5.6.2	Vigas de Classe R: C.4.1	127
	<i>Reforçada ao corte: C.4.1</i>	127
	<i>Reforçada ao corte e flexão: C.4.1</i>	127
5.7	Apresentação, discussão e análise dos resultados	127
5.7.1	Determinação do módulo de elasticidade local, global e resistência à flexão	128
5.7.2	Comentários dos ensaios	130
	<i>(MM) Viga Ref1</i>	130
	<i>(MM) Viga Ref2</i>	132
	<i>(MM) Viga FC</i>	134
	<i>(MM) Viga FT</i>	135
	<i>(MM) Viga FTRCF</i>	137
	<i>(MM) Viga FTRC</i>	138
	<i>(MLC) Viga FJs/p: C.5.1</i>	140
	<i>(MLC) Viga FJc/p: C.5.1</i>	140
	<i>(MLC) Viga JCc/p: C.5.1</i>	140
5.8	Análise comparativa e conclusões	140
5.8.1	Módulo de elasticidade local, global e resistência à flexão	140

5.8.2	Resultados obtidos e estimados para as classes E e EE	141
5.8.3	Classe de qualidade E & EE	143
5.8.4	Classe de qualidade E (posição das fendas)	143
5.8.5	Posição do cerne & borne (vigas não reforçadas de MM)	143
5.8.6	Classe R (vigas reforçadas) & Classe E e EE (não reforçadas): C.6.1	145
5.8.7	Vigas de MM & MLC (reforço ao corte): C.6.2	145
6	Conclusões	147
	Referências Bibliográficas	148
	ANEXOS	159
A	Fichas de classificação Visual	161
B	Mapeamento das Vigas de MM	175
C	Reforço das vigas de classe R	181
C.1	Materiais	181
	C.1.1 Parafusos auto-perfurantes	181
	C.1.2 Tiras metálicas perfuradas	181
C.2	Proposta de reforço das vigas de classe R	183
	C.2.1 Reforço ao corte	183
	C.2.2 Reforço à flexão e ao corte	183
C.3	Fabrico das vigas de MLC	185
C.4	Estudo analítico/ pré avaliação dos resultados esperados	187
	C.4.1 Vigas de Classe R	187
	<i>Reforçada ao corte</i>	187
	<i>Reforçada ao corte e flexão</i>	187
C.5	Apresentação, discussão e análise dos resultados	192
	C.5.1 Comentários dos ensaios	192
	<i>(MLC) Viga FJs/p</i>	192
	<i>(MLC) Viga FJc/p</i>	193
	<i>(MLC) Viga JCc/p</i>	194
C.6	Análise comparativa e conclusões	195
	C.6.1 Classe R (vigas reforçadas) & Classe E e EE (não reforçadas)	195
	C.6.2 Vigas de MM & MLC (reforço ao corte)	197

D	Tabelas	199
E	<i>Pinus pinaster Ait.</i> v <i>Picea abies</i>	203
E.1	Espécie	203
F	Dados e resultados dos ensaios	209
F.1	Propriedades Físicas e Geométricas	209
F.2	Regressão Linear	210
F.3	Módulo de elasticidade Local	211
F.4	Módulo de elasticidade global e resistência à flexão	213
G	Materiais de reforço	215
G.1	Pregos com aderência melhorada	215
G.2	Linha furada (Tira metálica furada)	216
G.3	Parafuso auto-perfurante (VGZ7100)	216

Lista de Figuras

2.1	Corte ampliado de uma madeira porosa, mostrando os vasos condutores, os feixes de fibras e a diferenciação entre anéis anuais, Wikipedia (2015)	9
2.2	Orientação das lamelas na secção transversal, EN 386	14
2.3	(a) Falquejamento do toro; (b) Corte tangencial e radial; (c) Padrões de corte mais comuns; (Porteous & Kermani, 2013a , Fig.1.3(a,b & c)).	17
2.4	Posição do núcleo (mltfh).	18
2.5	Madeira serrada seca ao ar livre	20
2.6	(a) Representação gráfica das condições de secagem artificial a que foi submetida uma determinada espécie; (b) Desenvolvimento do gradiente de humidade ao longo do período de secagem, adaptado de (Jankowsky & Silva, 1985 , Fig.2-3).	20
2.7	Secagem em fornos/estufas e ao ar livre da madeira serrada.	21
2.8	Tipos de defeitos causados ou agravados por uma deficiente operação de secagem (Santos et al., 2011 , Fig. 5).	21
2.9	Vista de topo de uma prancha mostrando o desenvolvimento de tensões de secagem (a) precoce e (b) posterior (Bergman, 2010 , Fig. 13-3).	24
2.10	Relação entre as tensões induzidas pela humidade e o teor em água durante seis estágios da secagem da madeira de “red oak” de 50 mm de espessura em fornos de secagem (Bergman, 2010 , Fig. 13-4).	24
2.11	Imagens de tipos de fendas em madeira maciça (http://www.timberzoo.com.au/timber-info/info3.htm).	25
2.12	Comprimento máximo das fendas num elemento de madeira (EN 14081-1, 2005 , Tab. 1).	27
2.13	Observação da superfície interna das fendas; (a) superfície clara indicando a presença de uma fenda recente; (b) superfície escura indicando a presença de uma fenda antiga, Cruz (2012)	27

2.14	Ilustração de uma possível mudança de humidade, isto é, exposição à humidade desde árvore até aos elementos de madeira lamelada colada de construções (Dietsch et al., 2012).	31
2.15	Aparelho comercial disponível usando o método capacitivo (esquerda), e esquema das áreas medidas por este método (direita), (Dietsch et al., 2014). . . .	33
2.16	Aparelho comercial disponível usando o método resistivo (esquerda), e esquema de áreas medidas usando elétrodos isolados e não isolados (direita), (Dietsch et al., 2014).	34
2.17	Influência do teor em água da madeira nas suas propriedades.	35
2.18	Resultados dos testes laboratoriais para verificar os resultados obtidos por métodos escolhidos para medições a longo prazo (métodos resistivos – Scanntronic Gigamodule),(Dietsch et al., 2012).	36
2.19	Representação esquemática do equipamento de medição,(Dietsch et al., 2012). .	37
2.20	Variação da humidade relativa e absoluta e a temperatura referentes ao período de medição, exemplo dado do Ice-Rink em Buchloe,(Dietsch et al., 2012). . . .	38
2.21	Variação do teor em água a diferentes profundidades da secção transversal ao longo do período medido, exemplo dado para o Ice-Rink em Buchloe,(Dietsch et al., 2012).	38
2.22	Curva envolvente do teor em água da madeira (esquerda) e dos gradientes de teor em água da madeira (direita) para diferentes profundidades da secção transversal, exemplo dado para o Ice-Rink em Buchloe,(Dietsch et al., 2012).	39
2.23	Teor em água da madeira e clima ambiente em dependência da classe de serviço, da avaliação de 245 avaliações de estruturas de madeira de grande vão, (retirado de Dietsch et al., 2012).	41
2.24	Teores em água da madeira em dependência do tipo de uso do edifício, de uma avaliação de 245 avaliações de estruturas de madeira de grande vão, (Dietsch et al., 2012).	42
2.25	Esboço da curva envolvente dos teores em água na secção transversal de madeira, incluindo a anotação de parâmetros de análise,(Dietsch et al., 2012).	43
2.26	Condições de humidade para diferentes tipos de uso de edifícios, (adaptado de Dietsch, 2015).	44
2.27	Retração e inchamento diferencial dependendo da direção do material (COST Action FP1101, 2014, p. 17).	47
2.28	Humedecimento ou intumescimento - adsorção, en: sorption (B. Franke et al., 2013, Fig. 1)	49
2.29	Secagem - Desadsorção, en: desorption (B. Franke et al., 2013, Fig. 2)	49

2.30	Tensões internas durante a) humedecimento e b) secagem. A linha horizontal (0.5 MPa) representa o valor característico de resistência à tração perpendicular às fibras de acordo com prEN 14080 (2011), (Angst & Malo, 2012, Fig. 8).	50
2.31	Representação do gradiente de teor em água (esq.) e tensões resultantes perpendiculares às fibras no caso de retrações restringidas, devido p.e. às conexões, da viga de madeira (dir.), Dietsch (2014, Fig. 20).	52
2.32	Tração transversal às fibras em resultado de restrições à retração da madeira (Cruz, 2012, Fig. 11).	52
2.33	(a) Fendas de secagem sem efeito na resistência da ligação; (b) Fendas de secagem com significativo efeito na redução da resistência da ligação; (Quenneville, 2014, p.32, Figs. 1-2).	53
2.34	Tensões restringidas causadas por deformações induzidas pela humidade sendo restringidas pelas cavilhas, que estão fixadas à placa de aço (Sjödin, 2008, Fig. 5)).	54
2.35	Fenda induzida pela humidade numa ligação (provete) exposto apenas a secagem (Sjödin, 2008, Fig. 9b)).	54
3.1	Estrutura de cobertura do Siemens Arena depois do colapso de dois pórticos, pórticos intactos é visto do lado direito (esquerda); canto com placas de aço que ligas as partes de madeira. Entre os parafusos visíveis, existem várias cavilhas no interior (centro).	57
3.2	Ice-Arena em Bad Reichenhall (esquerda); vista parcial do colapso da estrutura de cobertura (centro); secção transversal em caixa das vigas mestras (direita), (Dietsch et al., 2008).	59
3.3	Colapso da estrutura do caso 108/127, Bicycle-Arena em Ballerup, Dinamarca.	60
3.4	Estrutura de madeira do pavilhão desportivo, construído em 2001, (Bell, 2007).	61
3.5	Geometria do pórtico típico do pavilhão desportivo, (Bell, 2007).	61
3.6	Fotos das falhas no pórtico 1, (Bell, 2007).	61
3.7	– Fotos das falhas no pórtico 2, (Bell, 2007).	62
3.8	(a) Causas de danos; (b) Tipos de falhas, (Blass & Frese, 2010, 2011).	66
3.9	Rascunhos e imagem real de secções de MLC; (a) não danificada com 100% capacidade, (b) com alguns danos possíveis e capacidade desconhecida, (c) fendas internas às lamelas, (S. Franke et al., 2015, Fig. 3).	67
3.10	Fendas na direção das fibras em elementos de MLC (S. Franke et al., 2015, Fig. 4).	67
3.11	Largura de corte de uma viga de MM ou MLC quando sujeita a tensões de corte na direção considerada (Porteous & Kermani, 2013b, Fig. 4.9).	69

3.12	Componentes da tensão de corte mais as tensões de corte em um elemento: (a) uma componente de corte paralela às fibras; (b) ambas as componentes perpendiculares às fibras (corte por enrolamento), (Porteous & Kermani, 2013b, Fig. 10).	71
3.13	Consequência das fendas - Ilustração esquemática da distribuição das tensões de flexão, tensões de corte e tensões de tração perpendiculares às fibras numa viga estreita e numa viga curva, (Dietsch et al., 2013, Fig. 1).	72
3.14	Esquema da largura restante do elemento em dependência da localização e da profundidade das fendas em comparação com a largura requerida para transferir as tensões existentes, aqui as tensões de corte, (Dietsch, 2012, Dietsch & Schänzlin, 2010).	73
3.15	Configurações testadas e falhas típicas de corte para diferentes posições de fendas artificiais testadas (Pousette & Ekevad, 2012, Fig. 2-3).*	76
4.1	Reparação de fendas por métodos tradicionais (cintagem) (Dashöfer, 2015). . .	84
4.2	Pormenor de reforço com recurso a chapas e cintas metálicas (Mariani, 2004). .	84
4.3	Introdução de parafusos em fenda de secagem (Johnson, 1980).	85
4.4	Injeção de fendas com cola (Dashöfer, 2015).	87
4.5	Injeção de colas epoxídicas em selagem de fissuras (Rotafix, 2007).	87
4.6	Caption for LOF	88
4.7	Reparação de fendas com cola epoxídica e varões de reforço (adaptado de Lopes (2009)).	89
4.8	Procedimento*	89
4.9	Aplicação prática*	89
4.10	(Rotafix, 2009)	90
4.11	(a) Estrutura de MLC com dois meses com delaminação e fissuras; (b) Reparação da separação das lamelas por micro-injeção; (c&d) Preparação da reparação de vigas de MLC, por meio da realização de furos de 12 mm para a colocação de varões de reforço de GFRP; (Smedley, 2008, Fig. 7.7-8).	91
4.12	Resultado de diferentes métodos de reparação (por derramamento ou injeção) usando diferentes adesivos (Lehringer & Salzgeber, 2014, Fig. 1).	93
4.13	Vista dos varões colados nos apoios (Aicher & Schrank, 2006, Fig. 2).	94
4.14	Efeito de diferentes sistemas de reforço para enrijecimento ao corte elementos de MLC, adaptado de (Trautz & Koj, 2009, Fig. 6), (Rothoblaas, 2015).*	98
4.15	Reforço de vigas, (a), mediante uma armadura interior, cozimento das fendas com varões inclinados (sistema beta), (b), (Arriaga et al., 2002, Figs. 6.25-6.26).	98

4.16	Reforço de vigas com armaduras internas (Cigni, 1981), retirado de Arriaga et al. , Fig. 6.27.*	99
4.17	Colocação de chapa metálica na face inferior da secção, ligada por parafusos de porcas a toda a altura (a) ; Exemplos de colocação de chapa metálica na face inferior, conectada mecanicamente por parafusos a 45° (b&c)	103
4.18	Reforço das vigas deformadas com auxílio de tirantes metálicos com esticadores de aço (a), ou por intermédio de lâminas de madeira coladas (b), ou ainda com chapa metálica ou de materiais compósitos colados (Rodrigues, 2004 , Figura III.10).	105
4.19	(a) Viga de MLC ensaiada à flexão com reforço interno (parafusos autoperfurantes) e externo (reforço à flexão com lamela de aço), detalhe no canto inferior esquerdo do calço de ancoragem para fixar os parafusos à lamela; (b) Diagramas de Força-deslocamento (kN-mm) para as vigas reforçadas. *	106
5.1	Equipamentos usados para medição dos deslocamento.	116
5.2	Apontamentos e medições da configuração de teste dos ensaios.	117
5.3	Gráfico de força-deslocamento no intervalo das deformações elásticas, EN 408 (2010c, Sec. 9, Fig.2)	119
5.4	Configuração de teste para a determinação do módulo de elasticidade local, EN 408 (2010c, Sec. 9)	119
5.5	Configuração de teste para a determinação do módulo de elasticidade global, EN 408 (2010c, Sec. 10 ou 19)	120
5.6	Diagrama de esforços transversos.	121
5.7	Diagrama de momentos fletores.	121
5.8	Esquema de tensões.	125
5.9	Módulo de elasticidade local e global obtidos.	129
5.10	Resistência à flexão.	130
5.11	Resultados obtidos e estimados para a viga Ref1.	130
5.12	(a) início da rotura localizada devido ao desvio das fibras na zona tracionada; (b&c) Propagação de (a)	132
5.13	Resultados obtidos e estimados para a viga Ref2.	132
5.14	(a) Esmagamento localizado das fibras comprimidas; (b) Rotura frágil por tração das fibras tracionadas.	133
5.15	Resultados obtidos e estimados para a viga FC.	134
5.16	(a) Rotura local devido ao desvio localizado das fibras; (b) Nova rotura local devido a um desvio localizado das fibras.	135

5.17	Resultados obtidos e estimados para a viga FT.	135
5.18	Rotura global das fibras tracionadas com início num nó	136
5.19	Resultados obtidos e estimados para a viga FTRFC.	137
5.20	(a-e) Roturas locais; Rotura global (f).	138
5.21	Resultados obtidos e estimados para a viga FTFC.	138
5.22	(a) Rotura local, forte dano localizado a meio vão na face tracionada; (b) Rotura global.	139
5.23	Coeficientes unitários.	141
C.1	Materiais usados no reforço ao corte (Rothoblaas).	181
C.2	Materiais usados no reforço à flexão.	182
C.3	Representação 3D do reforço ao corte de vigas com parafusos auto-perfurantes, inclinados.	183
C.4	Representação 3D do reforço à flexão de vigas com tiras metálicas perfuradas.	184
C.5	Ligações de topo.	186
C.6	Esquema de tensões - viga reforçada à flexão.	187
C.7	Fluxo de corte numa secção mista madeira-aço.	189
C.8	Modos de rotura para corte simples e corte duplo (EN 1995:1-1).	189
C.9	Resultados obtidos para a viga FJs.	192
C.10	(a&b) Rotura do plano junta de colagem entre as lamelas tracionadas.	193
C.11	Resultados obtidos para a viga FJc.	193
C.12	(a&b) Rotura do plano junta de colagem entre as lamelas comprimidas.	194
C.13	Resultados obtidos para a viga JCc.	194
C.14	(a) Rotura local da junta de topo, “finger-joint”; (b) rotura global - juntas de topo + rotura por tração.	195
F.1	Programa desenvolvido usando o Guide(Matlab) - Regressão Linear	210
F.2	Resultados dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade local; Eixo das ordenadas: Deslocamento ($\text{mm} \cdot 10^{-1}$); Eixo das abcissas: Força (kN).	211
G.1	Pregos Anker e resistência ao corte simples (madeira-tira metálica), (Rothoblaas).	215
G.2	Linha furada e esticador de fita com grampo (Rothoblaas).	216
G.3	Dimensão, sistema de suporte e propriedades resistentes, do parafuso VGZ7100 (Rothoblaas).	216

Lista de Tabelas

2.1	Classes de serviço.	31
3.1	Valores do fator de modificação k_{cr} (Based on Table NA.4 in the UKNA to EC5).	70
5.1	Campanha experimental.	110
5.2	Massa volúmica aparente - medido/ normas/ literatura.	112
5.3	Propriedades mecânicas do Pinho bravo (para as diversas classes de qualidade), Simões et al. (2011)	115
5.4	Coefficientes de Correlação, Simões et al. (2011)	115
5.5	Propriedades geométricas, de resistência e rigidez estimadas	122
5.6	Esforços, tensões de corte e deslocamentos máximos estimados - ULS	123
5.7	Valor do rácio $\tau_{m\acute{a}x}/\tau_{mean}$ e o rácio entre b/h	126
5.8	Erros entre os valores estimados e obtidos por ensaio.	142
B.1	Mapeamento da Viga - REF1	175
B.2	Mapeamento da Viga - REF2	175
B.3	Mapeamento da Viga - FC	176
B.4	Mapeamento da Viga - FT	177
B.5	Mapeamento da Viga - FTRCF	178
B.6	Mapeamento da Viga - FTRC	179
C.1	Propriedades dos materiais usados no reforço à flexão.	182
C.2	Propriedades resistentes do Aço - S250 GD.	182
C.3	Esforços e deslocamentos estimados para a viga FTRC.	191
D.1	Classes de resistência da madeira de resinosas segundo a tabela 1 da EN 338 (2003)	199
D.2	Classe de qualidade / Classe de resistência para algumas madeiras utilizadas em estruturas (M1/LNEC, 1997).	200

D.3	Valores característicos das propriedades mecânicas da madeira de Pinho bravo, (M2/LNEC, 1997), relativos às classes de qualidade E e EE ,(NP 4305, 1995), e classes de resistência correspondentes C18 e C35 ,(EN 338, 2003)	200
D.4	Classes de qualidade estabelecidas para a madeira de Pinho bravo, (NP 4305, 1995).	201
D.5	Características dos provetes ensaiados.	202
E.1	Principais características da madeira de Pinho bravo	205
F.1	Propriedades Físicas e Geométricas	209
F.2	Módulo de elasticidade local	212
F.3	Resistência à flexão	213
F.4	Coefficientes unitários em relação a Ref2	213

Lista de Símbolos, Siglas e Abreviaturas

Símbolo	Grandeza	Unidades
PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS		
$[\]_{ef}$	Unidade efetiva	
b, B	Largura de um provete e de um elemento estrutural	mm
h, H	Altura de um provete e de um elemento estrutural	mm
l, L	Comprimento de um provete e de um elemento estrutural	mm
e	Espessura	
L_0	Comprimento inicial entre dois pontos	mm
L_{rr}	Comprimento entre dois pontos cujas retrações foram restringidas	mm
L_{rl}	Comprimento inicial entre dois pontos cujas retrações foram liberadas	mm
d	Diâmetro	mm
δ	Deslocamento	mm
Δ_L	Variância de comprimento entre dois pontos	mm
A	Área	mm ²
I	Momento de Inércia	mm ⁴
W	Módulo de flexão	mm ³
S	Momento estático	mm ³
T	Temperatura	°K
t	Tempo ou Temperatura em graus celsius	s, °C
COEFICIENTES		
k_{cr}	Fator de modificação da resistência ao corte	
k_{mod}	Fator de modificação (duração da ação e teor de água)	
k_{sys}	Fator de correção para a resistência do sistema	

PROPRIEDADES FÍSICAS

H, u, TH	Teor em água (NP 614)	%
H_{12}, u_{12}	Teor em água de referência - 12% (NP 614)	%
GTA, Δ_u	Gradiente de teor em água	
H_{eq}, u_{eq}	Teor em água de equilíbrio	%
H_f, u_f	Teor em água final	%
H_i, u_i	Teor em água inicial	%
H_{supr}	Teor em água superficial	%
HR	Humidade Relativa	%
PSF	Ponto de Saturação das Fibras	%
S, TSF	Teor em água de saturação das fibras, 28% em média (NP 615)	%
ρ_H	Massa volúmica a H % de teor em água	g/cm^3
ρ_{12}	Massa volúmica de referência	g/cm^3
V_H	Volume do provete a H % de teor em água	cm^3
$V_{S sa se}$	Volume do provete saturado ou seco ao ar ou seco em estufa	cm^3
m_{12}	Massa do provete com um teor em água de referência - H=12%	g
m_H, m_{15}	Massa do provete com um teor em água H - ex. H=15%	g
$m_{S sa se}$	Massa do provete saturado ou seco ao ar ou seco em estufa	g
a, r, t ou	Direções fundamentais de crescimento (axial, radial, tangencial)	
L, R, T LR, LT, RT	Planos fundamentais de crescimento (longitudinais e transversal)	
$l_{S sa se}$	Dimensão, numa dada direção, do provete saturado ou seco ao ar ou seco em estufa	mm
ϵ	Retração linear	%
$\epsilon_{a r t v}$	Retração axial, radial e tangencial	%

ε_v	Retração volumétrica	%
$\varepsilon_t/\varepsilon_r$	Coefficiente de anisotropia	%
ε_h	Retração hídrica	%
$\varepsilon_{h,r}$	Retração hídrica radial	%
$\varepsilon_{h,t}$	Retração hídrica tangencial	%
α	Coefficiente de retração linear	%
$\alpha_{a r t v}$	Coefficiente de retração axial, radial e tangencial	%
α_v	Coefficiente de retração volumétrica	%
α_h	Coefficiente de Expansão Hídrica	%
$\alpha_{h,r}$	Coefficiente de expansão hídrica radial	%
$\alpha_{h,t}$	Coefficiente de expansão hídrica tangencial	%

PROPRIEDADES MECÂNICAS

F	Força	N
V	Força de corte	N
M	Momento fletor	N.mm
F_{\max}	Força máxima	N
$F_{\max,est}$	Força máxima estimada	N
f_m	Resistência à flexão paralela às fibras (EN 408)	N/mm ²
D	Dutilidade	-
D	Coefficiente de difusão	m ² s ⁻¹
S	fator de emissão superficial	m s ⁻¹
E_m	Módulo de elasticidade à flexão	
$E_{m,l}$	Módulo de elasticidade local (EN 408)	N/mm ²
$E_{m,g}$	Módulo de elasticidade global (EN 408)	N/mm ²

COLAS - ADESIVOS

(RF)	Resorcinol-Formaldeído (Resorcinol Formaldehyde)
(PRF)	Resorcinol-Formaldeído (Phenol Resorcinol Formaldehyde)
(PF)	Fenol Formaldeído (Phenol Formaldehyde)
(MUF)	Melamina Ureia Formaldeído (Melamine Urea Formaldehyde)

(UF)	Ureia Formaldeído (Urea Formaldehyde)
(PUR)	Adesivo de Poliuretano (Polyurethane adhesive)
(BoS)	Bond on site
(GiR)	Glued in rods

OUTROS

(KAR)	Knot Area Ratio
PRF (FRP)	Compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras (Fibre-Reinforced Polymer)
MM (ST)	Madeira Maciça (Solid timber)
MLC (GLT)	Madeira Lamelada Colada (Glued Laminated Timber)
(LVL)	(Laminated Veneer Lumber)
MLCC (CLT)	Madeira Lamelada Cruzada Colada (Cross Laminated Timber)
(CEN)	Comité Europeu de normalização (European Committee for Standardization)
(CE)	Conformidade Europeia
(EEE)	Espaço Económico Europeu
(PEFC)	Programme for the Endorsement of Forest Certification
NP	Normas Portuguesas
IPQ	Instituto Português de Qualidade
(EN)	Normas Europeias (European standards)
(ISO)	Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization)
(ASTM)	Associação Americana para Ensaios e Materiais (American Society for Testing and Materials)
CDA (DOL)	Classe de duração da ação (Duration of load)
CQ (QC)	Classe de qualidade (Quality/ visual class)
CR (RC)	Classe de resistência (Strength/ resistance class)
CS (SC)	Classe de Serviço (Service class)
(RS)	Corte por enrolamento (Rolling shear)

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação & Objetivos

O que motivou a realizar a presente dissertação de mestrado foi o fascínio que a madeira, como material de construção biológico, me provocou. O conhecimento que tinha sobre este material de construção era básico, se não, nulo. Cedo me apercebi, com as primeiras pesquisas livres, que a madeira tinha um enorme potencial, para ser usado como material estrutural. Estudos estatísticos relacionados com vários colapsos de estruturas de madeira que ocorreram a partir de 2006 na Europa, demonstraram que o problema não estava no material, mas sim na falta de conhecimento e da não consideração séria por parte dos projetistas, nos projetos destas estruturas, de questões relacionadas com o comportamento físico da madeira e das fendas que possam surgir longitudinais às fibras, como resultado do comportamento higroscópico da madeira. As fendas nas direção das fibras, foram apontadas como sendo o principal tipo de falha, e o comportamento físico do material, como a causa de danos em estruturas de madeira. Contudo, e neste contexto de motivação, orientei a presente dissertação, para o estudo de fendas de secagem em vigas de madeira, suas causas e efeitos na capacidade resistente, e métodos de reparação.

Em suma, pretendo com esta dissertação, atingir os seguintes objetivos:

- Avaliar a estabilidade de vigas de madeira sob o efeito de variações do teor em água;
- Comparar o desempenho de vigas de madeira maciça com vigas de madeira lamelada-colada;
- Identificar quais as causas do surgimentos de fendas de secagem em vigas de madeira;
- Analisar o efeito redutor destas fendas na capacidade resistente de vigas de madeira;
- Recolher informações sobre métodos e técnicas de reparação de fendas e das vigas que as contêm;
- Analisar estes comportamentos à luz dos regulamentos e recomendações existentes.

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada em seis capítulos.

No **Capítulo 1** será feita a introdução à presente dissertação, onde será especificado: quais as motivações que levaram à sua realização, os objetivos que se pretendem atingir com a mesma e a forma como será estruturada.

O **Capítulo 2** iniciará com um enquadramento histórico [2.1], onde se descreverá resumidamente os avanços tecnológicos que a madeira, como elemento estrutural, tem vindo a presenciar desde os seus tempos primórdios até aos tempos modernos. De seguida descreve-se todo o comportamento da madeira como material biológico, anisotrópico, heterogéneo e higroscópico, dando ênfase ao seu comportamento retrátil e à relação que esta tem com as condições microclimáticas do ambiente circundante [2.2]. É ainda abordado todo o processo de produção, controlo de qualidade e requisitos da madeira lamelada-colada, com o objetivo de mostrar todas as medidas que foram tomadas com vista a obtenção de um material estrutural mais estável dimensionalmente (menos propício ao surgimento de fendas) e de maior durabilidade [2.3]. Enquadra-se a problemática, do defeito de secagem (fendas), ao longo de todo o processo de fabrico de madeira serrada, dando especial atenção à etapa, aos defeitos, aos mecanismos e tensões, de secagem [2.4]. Faz-se a distinção entre vários tipos de fendas na madeira maciça, das quais, as fendas de secagem, são alvo de maior detalhe e caracterização. Abordam-se questões relacionadas com o surgimento de fendas em elementos de madeira estrutural, como resultado do transporte e armazenamento em obra, inadequados [2.5]. Sabendo à priori, que as tensões induzidas pela humidade na madeira, causadoras de fendas de retração ou humedecimento, e que a intensidade relacionada de ambas, está intimamente relacionada com as condições ambientais circundantes, optou-se por se fornecer informação mais detalhada sobre este tema, visto que se considera fundamental na compreensão da razão pela qual este tipo de fendas ocorrem. Com base nesta informação, dedica-se um tópico, relativo a formas de diminuir os gradientes de humidade nas secções dos elementos estruturais de madeira [2.6]. Tomar medidas, que diminuam os gradientes de humidade apresentado pelas secções de madeira destes elementos, é importante no sentido em que, ao mesmo tempo se está a diminuir a possibilidade da ocorrência de tensões internas que possam ultrapassar a capacidade resistente à tração transversal às fibras de madeira, que se libertam em forma de fenda [2.7.1]. Por fim neste mesmo capítulo será ainda abordado o efeito das variações do teor em água em ligações [2.8].

O **Capítulo 3** começa por abordar a questão do colapso de muitas estruturas de madeira, que ocorreram a partir do início de 2006, por toda a Europa. Entender as razões e causas para esses colapsos é de extrema importância. Por este motivo, e com vista o aumento da sensibilidade do leitor, fez-se referência à análise de alguns casos de colapsos, e aos motivos pelos quais

ocorreram [3.1.1]. Aborda-se sobre a importância da criação de sistemas de classificação de falhas e armazenamento de dados em estruturas de madeira, com vista a obtenção de dados estatísticos dessas mesmas avaliações e análises [3.1.2, 3.1.3]. Conclui-se que as fendas nas direções das fibras são o principal tipo de falha apresentada, e que as questões físicas do material são a principal causa de danos [3.1.4]. Faz-se ainda a distinção dos vários tipos de fendas de retração que ocorrem na madeira lamelada-colada [3.2], e tenta-se perceber de que forma estas fendas afetam a capacidade de carga residual das vigas que as contêm [3.3].

Com o **Capítulo 4** pretende-se essencialmente recolher informação à cerca de métodos e técnicas de reparação, tanto tradicionais como recentes, de fendas e de vigas com fendas.

O **Capítulo 5** contém todo o relatório do trabalho experimental, que consiste no ensaio de 6 vigas de madeira maciça de Pinho bravo, à flexão. As conclusões desse mesmo trabalho experimental são apresentadas no **Capítulo 6**.

Capítulo 2

Estruturas de madeira e tensões de secagem

2.1 Introdução Histórica

A madeira como matéria-prima natural, tem assumido um papel muito importante em todo o desenvolvimento da humanidade e tem-na acompanhado desde sempre. A madeira maciça começou a ser utilizada com rendimento nos séculos XVI, XVII e XVIII, onde se realizaram verdadeiras obras-primas quer do ponto de vista de conceção como de realização. Porém, nos finais do século XVIII, a evolução da madeira parecia estabilizada. Com o surgimento do aço, e de perfis com formas e dimensões extremamente variadas, foi possível a realização de estruturas mais arrojadas, para corresponder às exigências do desenvolvimento industrial. Depois deu-se o desenvolvimento do betão armado. Com o desenvolvimento tecnológico do aço e do betão armado, verificou-se paralelamente, um rápido progresso no domínio do cálculo de estruturas e do conhecimento das propriedades dos materiais. Consequentemente, a madeira de emprego empírico e tradicional, começou a perder o seu lugar para estes novos materiais. No entanto, a partir do século XX, tem-se feito um grande esforço para restaurar a credibilidade da madeira como material de construção. O arquiteto francês Filiberto de l'Orme foi o primeiro a utilizar madeira encaixada para realizar acabamentos curvos, mudando da construção em pedra para a construção em madeira no século XVI. Pelo que se sabe, tudo começou com uma técnica concreta de madeira lamelada. O coronel Emy, na França, esteve em destaque, quando fabricou vigas compostas por lâminas (tábuas) encurvadas e sobrepostas, unidas por pregos e cintas metálicas. Contudo, a junção desta técnica com uma técnica utilizada pelos primeiros egípcios no fabrico de sarcófagos de madeira, até dar origem à madeira lamelada colada na fabricação de elementos estruturais na construção civil, apenas foi possível com o surgimento de colas de alta resistência. Foi portanto, com Otto Hetzer, possuidor de 5 patentes relativas aos anos 1892

e 1907, todas relacionadas a diferentes componentes de construção, que fazem uso da madeira como material de engenharia, tendo a ideia de substituir pela cola, as ligações metálicas de braçadeiras e parafusos, utilizadas pelo Coronel Emy. Na patente DRP No. 197773 de 1906, Hetzer descreveu como construir uma viga lamelada com uma forma curva, usando a caseína (baseado na proteína do leite) como adesivo. Desta forma obteve-se uma secção mais homogênea e sem ocorrência de deslizamentos entre as lâminas.

Em 1934, nos Estados Unidos, o Alemão Max Hanisch efetuou vários ensaios não destrutivos em vigas e, posteriormente realizou ensaios destrutivos em arcos, com o objetivo de estudar a sua resistência mecânica. Estes ensaios foram determinantes para a aceitação da madeira lamelada colada (MLC) para fins estruturais. O grande desenvolvimento da MLC, deu-se em 1940 com o aparecimento das resinas sintéticas, mais propriamente em 1942, com a introdução do adesivo phenol-resorsinol resistente à humidade na indústria da madeira serrada. A partir de então, foi possível usar a MLC, exposta ao ambiente exterior, sem que ocorra degradação da junta de colagem, o que não acontecia no caso da caseína, que apenas permitia a utilização da MLC em ambientes interiores e secos. O uso final da MLC vai depender do tipo de adesivo utilizado no processo, geralmente à base de formaldeído, para ambientes internos, externos ou em condições extremas. O adesivo mais recente é o PUR (Adesivo de poliuretano), que surge como um produto inovador, que oferece a linha de colagem excelentes características de resistência mecânica, resistência à humidade e às altas temperaturas, é um produto amigo do ambiente, pelo fator de ser livre de solventes e exige menor consumo de água. No entanto, ainda não tem preço competitivo no mercado.

Os aspetos relacionados com a durabilidade da madeira, têm sido alvo de desconfiança na aceitação da madeira como material estrutural, pelo que se tem vindo a observar um forte desenvolvimento tecnológico na área da proteção e tratamento da madeira para garantir a sua durabilidade, quebrando assim um forte tabu. A chave para manter a madeira estrutural em boas condições é controlar o teor em água, e mantê-lo abaixo dos 20%, visto que a madeira para esse valor não se deteriora, isto é não permite a proliferação de fungos. Existem vários métodos de proteção da madeira contra a humidade, como pinturas superficiais, impregnação de produtos (inseticidas, fungicidas e repelentes de água), tratamento em autoclave das lamelas ou de elementos estruturais, tratamentos térmicos (modificação térmica da madeira), entre outros. Estes tratamentos, diminuem a variação diferencial do teor em água ao longo da profundidade das secções transversais e do tempo, o que contribuem para a diminuição das tensões internas devidas aos movimentos restringidos de expansão e retração, que poderiam resultar em fendas. Existem métodos de reforço muito promissores tais como reforço transversal com parafusos auto-perfurantes, que reduzem significativamente as tensões internas. O ideal em termos de durabilidade, seria proceder ao tratamento da madeira, com produtos não nocivos ao ambiente e

à saúde, e que eliminassem a característica higroscópica que a madeira apresenta, e deste modo evitar os movimentos de expansão e retração principalmente nas direções transversais, sendo estes a principal causa da diminuição do tempo de vida de uma estrutura. Incrivelmente isto já é possível com uma elevada eficiência com o tratamento por acetilação (processo de modificação química da madeira).

Por meio de um projeto apropriado, detalhado, e proteções climáticas (ex. tratamentos de superfície), a MLC pode ser usada em várias aplicações, como por exemplo, pontes. Em 1970, as técnicas de vigas curvas foram melhoradas permitindo produzir grandes vigas com uma vasta gama de tamanhos e secções. O MLC tem alto valor estético, e permite realizar elementos estruturais com uma infinidade de formas, oferecendo liberdade aos arquitetos, e ao mesmo tempo estando de acordo com as normas de projeto. Atualmente, na Europa, as estruturas de madeira têm o seu próprio Eurocódigo (Eurocódigo 5), à semelhança das estruturas de betão armado ou metálicas. As normas seguintes do CEN (Comité Europeu de normalização) são importantes em relação à MLC mais propriamente a norma harmonizada EN 14080 que estabelece os requisitos para a marcação CE. O propósito da marcação CE nos produtos, é possibilitar que estes circulem livremente no Espaço Económico Europeu (EEE), e garantir que produtos de diferentes fabricantes possam ser comparados por meio de um número de propriedades declaradas (por ex. resistência à flexão, modulo de elasticidade, resistência ao corte da junta colada etc.). O controlo de produção da fábrica (FPC), assegura que os produtos são colocados no mercado de acordo com as características declaradas de desempenho. Antes de colocar o produto no mercado, serão necessários ensaios iniciais (ITT), inspeções iniciais às fábricas e inspeções de FPC, que são levadas a cabo por um órgão de fiscalização. Se todos os requisitos forem cumpridos depois do ITT e das inspeções iniciais, o fabricante pode colocar a marcação CE nos seus produtos. Por este meio, foi possível trazer a dimensão comercial que faltava à MLC, e aumentar a sua concorrência relativamente a outros materiais estruturais, com soluções alternativas. A energia envolvida para a produção de um elemento de MLC é muito menor que a necessária para um elemento com a mesma resistência feito de aço ou betão armado. É um material muito mais leve que os anteriores, e apresenta características de resistência com base na relação resistência-peso muito competitivas, como por exemplo, resistência à tração relativamente ao aço, e a resistência à compressão relativamente ao betão. Uma grande vantagem que a madeira apresenta relativamente ao aço, é relativa ao comportamento da superfície da madeira, que carboniza sob a ação do fogo, atuando assim, como isolante e impedindo a propagação das chamas para o seu interior. Consequentemente, as propriedades mecânicas no interior da secção não carbonizada permanecem intactas, garantindo a estabilidade da estrutura por mais tempo do que outros materiais, como por exemplo o aço. De uma análise comparativa de um estudo de 2002 de duas opções (vigas de aço v vigas de MLC de Espruce)

a usar numa estrutura de cobertura de um novo aeroporto em Oslo na Noruega, relativamente ao uso de energia, emissões de gás de efeito de estufa e custos, concluiu-se que se gastava 2 a 3 vezes mais energia, 6 a 20 vezes mais combustíveis fósseis, para fabricar vigas de aço do que para fabricar vigas de MLC, e que o custo das vigas de MLC foi, em suma, ligeiramente menor. A madeira empregada para a fabricação das peças, provêm de florestas certificadas - PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification, um certificado de gestão florestal sustentável), onde após o corte de uma árvore outras duas são plantadas. Na Europa a espécie mais utilizada é a Pícea-europeia (*Picea abies*), uma conífera que pertence à família das píceas, muito abundantes no Norte e Centro da Europa.

O maior campo de aplicação da MLC é maioritariamente em construções de estruturas de cobertura de grande vão, sendo possível criar vão de 150 metros ou mais, sendo tecnicamente possível.

A MLC é utilizada frequentemente para realização de coberturas de estruturas de grande vão, por permitir tecnicamente vencer vãos até 150 metros, ou mesmo mais. Nos USA, na Europa central e na Escandinávia, a MLC está a crescer em popularidade em construções modernas de pontes, especialmente em pontes pedestres e para bicicletas, bem como em pontes rodoviárias com vão médios. Para além destas aplicações, a MLC também pode ser utilizada em conjunto com outros materiais como o betão ou aço, em pisos estruturais de edifícios, permitindo alcançar boa absorção do som e resistência ao fogo, com um custo competitivos. Nos últimos tempos, tem-se vindo a realizar investigações sobre sistemas de reforço de elementos estruturais de MLC, com FRP's e aço, com o objetivo de obter o maior proveito das características resistentes mecânicas da madeira, ou como forma de restaurar a resistência residual perdida de elementos estruturais antigos.

O bambu será sem dúvida, o material que permitirá dar o salto, para a realização de obras monumentais, por apresentar características físicas e mecânicas melhoradas, relativamente à madeira como material de construção. A madeira será o símbolo de modernidade, visto que o futuro está no caminho dos materiais renováveis e eco-sustentáveis. O trabalho conjunto entre arquitetos, engenheiros, investigadores, indústria madeireira, entre outros que trabalham nesta indústria irão estabelecer o elo que falta entre as tecnologias avançadas no campo da construção que usam madeiras cultivadas. Com este esforço, pretende-se utilizar toda a tecnologia disponível em prol do uso da madeira em todo o seu potencial.

2.2 Teor em água

As mudanças do teor em água abaixo do ponto de saturação das fibras afeta as propriedades físicas, mecânicas e reológicas da madeira, tal como a retração e o inchamento, os valores

de resistência, o módulo de elasticidade ou a rigidez, ver Fig. 2.17b (p. 35). A diminuição do teor em água geralmente corresponde a um aumento da resistência da madeira. A madeira lamelada-colada surge como um avanço tecnológico da madeira maciça e apresenta características mecânicas e físicas melhoradas, destacando-se as seguintes características e vantagens:

- Maior estabilidade dimensional, e menos propícia ao surgimento de fendas;
- Melhoria das tensões médias de rutura e uma redução na dispersão dos seus valores;
- Possibilidade de tratamento da madeira em auto-clave tábua por tábua, o que confere enorme eficiência e garantia de durabilidade que pode chegar até aos 50 anos, contra o ataque de fungos e insetos xilófagos;
- Possibilidade de obter secções de peças não limitadas pelas dimensões e geometria do tronco das árvores.

2.2.1 Transporte da humidade & Variações dimensionais

O teor em água (H) da madeira define-se como sendo a relação entre a quantidade de água que a madeira possui nos seus poros e a massa da madeira no seu estado seco, ver Eq. 2.3 (p. 33). A água contida na madeira pode apresentar-se sob duas formas: água **livre ou capilar** (contida nos espaços celulares - lúmens - e intercelulares das células) e **água de impregnação ou higroscópica** (retida pelas membranas higroscópicas das células por forças capilares). A água livre é de fácil extração através de secagem intensa em estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, ao contrário da água higroscópica, pelo fator das forças de ligação serem de natureza distintas para ambas as formas da madeira conter água.

O **movimento da água livre** do interior para a superfície é realizada por forças capilares (Lei de Jurin), processo relativamente simples de compreender a nível físico e mecânico, o qual segue as leis de Darcy e Poiseuille. Já o **movimento da água de impregnação e do vapor de água**, ocorrem simultaneamente por meio de difusão em um tipo de transporte conhecido como transporte em estado instável. Nessas condições, o fluxo de humidade e o gradiente são variáveis no espaço e no tempo. A água higroscópica move-se por difusão através das paredes celulares, em consequência de forças originadas pelo gradiente de humidade. A contribuição do vapor de água, para a quantidade total de água movimentada, pode ser desprezada nas condições normais de secagem. A rapidez ou facilidade de secagem (coeficiente de difusão da água higroscópica) varia diretamente com a temperatura e a humidade, inversamente com a densidade e depende da direção estrutural da madeira. Como o fluxo e o gradiente de humidade são variáveis no tempo e no espaço, quando se

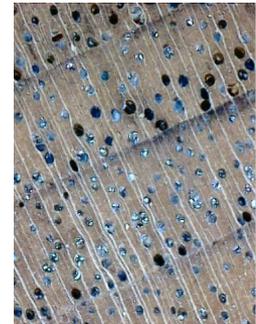


Figura 2.1: Corte ampliado de uma madeira porosa, mostrando os vasos condutores, os feixes de fibras e a diferenciação entre anéis anuais, [Wikipedia \(2015\)](#).

seca a madeira, a segunda lei de Fick é a que melhor se ajusta e representa este fluxo por difusão. Estes dois tipos de água desempenham comportamento/ reações distintas no processo de secagem da madeira. A **água capilar** é mais importante para as propriedades térmicas e elétricas. A **água higroscópica** age principalmente sobre as propriedades físicas e mecânicas da madeira.

O processo de secagem da madeira verde começa logo após o abate, onde esta apresenta um teor em água superior a 100%, a madeira encontra-se super-saturada. Se estiver ao ar livre, o teor em água da madeira vai diminuindo por secagem natural até que atinge um ponto em que toda a água livre se perde, e a única água existente, se encontra nas paredes das células (lúmens) saturadas. Este ponto corresponde normalmente a um teor em água entre 25-35% sendo o valor médio de 30%, e designa-se por ponto de saturação das fibras (PSF). A partir desde ponto, a madeira, devido ao seu comportamento **higroscópico**, irá interagir com as condições ambientais que a rodeia, ou seja do estado higrométrico e da temperatura do ar do local onde se encontra, ou por outras palavras, com as condições microclimáticas do ambiente circundante, até atingir um teor em água de equilíbrio (H_{equi}) ao fim de um determinado período de tempo sob condições constantes de humidade relativa e temperatura (ver curvas de humidade de equilíbrio da madeira).

No entanto, se a madeira estiver em contacto com o ambiente exterior, é sabido que este não apresenta um comportamento constante, isto é, o valor de humidade relativa e temperatura variam durante o dia e durante o ano (variações sazonais). Por consequência, a madeira estará em constante luta por encontrar o seu ponto de equilíbrio. A absorção e a cedência de água, correspondem a fenómenos de adsorção e de desadsorção, contudo, as isotérmicas de sorção não são coincidentes, apresentando por isso uma histerese (N. Machado, 2006). O movimento da água higroscópica ocorre por difusão, e por isso o estado de equilíbrio não se verifica uniformemente em toda a massa da peça, atingindo mais rapidamente o equilíbrio nas camadas superficiais em contacto com o ar envolvente, e prosseguindo de acordo com a lei de Fick da periferia para o núcleo do elemento. Deste fenómeno geram-se gradientes de humidade (GH) que levam por sua vez ao desenvolvimento de tensões internas que podem conduzir a fenómenos de rotura de porções da peça e segundo superfícies de fissuração.

A madeira, quando o seu teor em água varia para teores abaixo do PSF, fica sujeita a fenómenos de retração. Devido à **anisotropia** do material, a **retração** da madeira é diferente para as três **direções fundamentais de crescimento**, axial, radial e tangencial. A retração axial (longitudinal) pode ser desprezada, pelo fato dos seus valores não terem significado prático, enquanto que a retração tangencial já não pode, por ser a que tem valores mais elevados e com grande importância física e prática, sendo esta cerca de 1.5 a 2 vezes maior que a retração axial. Estas diferenças nas retrações transversais explicam as deformações e empenas que ocorrem durante a secagem, que também podem ocorrer devido a anomalias da estrutura anatómica da madeira. Por

outro lado, embora uma dada madeira tenha retrações tangenciais de valor elevado, não significa que estas venham a apresentar este tipo de anomalias.

Uma forma de medir o nível de instabilidade de uma dada espécie de madeira é recorrendo ao **coeficiente de anisotropia** (relação entre a retração tangencial e radial). Madeiras de boa qualidade apresentam um coeficiente de anisotropia inferior a 1.5, sendo neste caso a madeira classificada como muito estável (1.6 a 2.0 - média a baixa anisotropia, 2.0 a 2.5 - média a alta anisotropia, >2.6 - muito instável). Este coeficiente é geralmente superior a 1, pelo fato de que a retração tangencial é normalmente superior à radial. Quanto mais próximo de 1 for este coeficiente, menos propensa a defeitos, tais como, fendas ou empenos, será a madeira de uma dada espécie, embora por vezes, o coeficiente de retração volumétrica seja elevado (Silva et al., 2013).

Para quantificar esses movimentos, as variações dimensionais são registadas para uma gama de HR e TH. A relação linear entre a variação do comprimento Δl , e a variação do teor em água Δu , pode ser expressa de acordo com a seguinte equação:

$$\Delta l = \alpha * \Delta u \quad (2.1)$$

Onde, α é o coeficiente de expansão hídrica .

Angst-Nicollier desenvolveu medições e cálculos relativamente ao coeficiente de higroexpansão, nas direções tangencial e radial, registadas em Angst & Malo (2012) e (Angst-Nicollier, 2012, Apêndice A). Na primeira referência, os provetes de MLC foram colocados tanto em climas seco (40% HR) ou húmido (90% HR) antes de serem cortados em fatias ao longo da altura. As fatias foram expostas a humedecimento e a secagem, respetivamente, enquanto que a variação em comprimento e do TH foram medidos. A relação entre a mudança de comprimento e o TH resultou em coeficientes efetivos de higroexpansão ao longo da altura das fatias. Por intermédio de modelos numéricos, o coeficiente de higroexpansão efetivo pode ser dividido em coeficientes de higroexpansão tangencial e radial. Em contraste com a literatura, Angst-Nicollier encontrou diferentes coeficientes para o caso do humedecimento e secagem. Medições adicionais e cálculos do coeficiente de higroexpansão relativos ao (Apêndice A, Angst-Nicollier, 2012) revelaram o mesmo: Diferentes coeficientes foram obtidos para o humedecimento, e secagem. Além disso, os coeficientes individuais foram similares em ambos os estudos (ver Tab. 1, Angst-Nicollier, 2012), embora estes tenham sido determinados em diferentes provetes sujeitos a diferentes variações climáticas. Os resultados foram da mesma gama dos da literatura para o mesmo tipo de MLC, ou MLC vinda da Noruega (*Picea abies*), respetivamente. A Tab. 1 em (Angst-Nicollier, 2012), mostra que os coeficientes obtidos por diferentes autores varia consideravelmente, embora

tenham sido obtidos do mesmo material. A relação entre o coeficiente tangencial e radial, no entanto, é muito similar, sendo aproximadamente de 2:1.

Com o objetivo de minimizar as variações dos elementos de MLC em serviço, os elementos são secos para um teor em água perto do teor em água de equilíbrio tal como aquele que o elemento irá encontrar depois de montado. Caso contrário, deformações de retração podem ocorrer e podem levar por exemplo, a tensões perpendiculares às fibras e levar a falhas prematuras.

Permeabilidade

A permeabilidade da madeira é um aspeto importante quando se trata da secagem da madeira e sua preservação (tratamento preservador com soluções aquosas de produtos químicos). A permeabilidade varia em função dos seguintes fatores: **estrutura anatómica** (p. ex. cerne/borne), **direção** (direções fundamentais de crescimento), **tipo** (folhosas ou resinosas/coníferas), **espécie**, **densidade**.

De um modo geral, a permeabilidade da madeira a líquidos, é definida como a medida de maior ou menor facilidade de escoamento em um material poroso, sob a influência de um gradiente de pressão. Considerando que o fluxo de água líquida através da madeira obedecem às leis de Darcy e de Poiseuille, é possível estabelecer uma relação entre a permeabilidade e o raio do capilar, de acordo com a seguinte fórmula, [Jankowsky \(1995\)](#):

$$K = \frac{N * \pi * r^4}{8 * \mu * A} \quad (2.2)$$

Sendo, K a permeabilidade, N o número de capilares, r o raio dos capilares, μ a viscosidade do líquido e A a área da amostra, perpendicular à direção do fluxo.

A madeira de alta **densidade**, devido a apresentar menor volume de vazios para circulação dos fluídos, apresenta maior dificuldade de secagem e de impregnação de soluções preservativas. No entanto, é errado concluir que a permeabilidade do borne (mais denso) é menor que a do cerne (menos denso), porque na realidade o que acontece é exatamente o contrário, tanto nas coníferas como nas folhosas. Este fato pode ser explicado pela estrutura anatómica do cerne e do borne de ambos os tipos, independentemente da densidade dos mesmos.

2.3 Produção, controlo de qualidade e requisitos - MLC

As normas que estabelecem os requisitos necessários para o fabrico e uso da MLC, e que garantem a segurança e os níveis mínimos de qualidade são: [EN 14080](#) e [EN 386](#). A [EN 386](#) regula o processo de fabrico e a [EN 14080](#) regula as características da MLC para estruturas. A madeira das lamelas utilizadas para o fabrico da MLC deve ser classificada segundo a [EN 14081](#) que define dois sistemas de classificação segundo a resistência: **visual** e **mecânica**. A classificação visual baseia-se na limitação dos defeitos das peças, já a classificação mecânica

baseia-se na medição do módulo de elasticidade por flexão através de ensaios não destrutivos (sensores colocados na linha de produção) que nos dão uma estimativa do mesmo, ou ensaios destrutivos que consistem na retirada de amostras de lotes para posterior determinação exata do módulo de elasticidade.

A classificação segundo a resistência permite que se construam secções transversais com lamelas da mesma resistência (homogénea), ou de alta qualidade, onde nas lamelas exteriores, onde os esforços são mais elevados, são colocadas lamelas de maior classe de resistência e no interior as de menor resistência (heterogénea).

A MLC deve estar em conformidade com uma das classes preconizadas na [EN 1194](#), a qual define as classes de resistência e a determinação dos valores característicos para a MLC. No caso de se realizarem ensaios, estes devem seguir a metodologia expressa pela [EN 408](#) para determinar os valores característicos das propriedades mecânicas. No caso de se realizarem cálculos, as lamelas deverão ter as propriedades mecânicas necessárias à obtenção das adequadas propriedades mecânicas da MLC.

O adesivo utilizado é escolhido em função da classe de serviço como é indicado na [EN 1995:1-1](#). As juntas de topo entre lamelas devem apresentar a mesma resistência característica à flexão que a madeira utilizada, de acordo com a [EN 385](#).

O controlo de todo o processo de fabrico deve ser realizado principalmente no que diz respeito à integridade resistente das linhas de colagem, pois são estas que garantem a capacidade resistente de todo o elemento de MLC, bem como o seu desempenho a longo prazo, devendo ser principalmente resistentes aos agentes externos (exposição climática, agentes químicos e corrosão). Uma forma de avaliar a integridade e resistência da linha de colagem é procedendo ao ensaio de delaminação, [EN 391](#), para estruturas em classe de serviço 3, e ao ensaio de corte pelos planos de colagem, [BS EN 392](#), no caso de estruturas em classe de serviço 1 e 2.

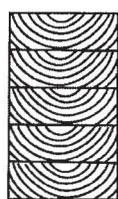
O ensaio de delaminação ([EN 391](#)), consiste na determinação da delaminação que ocorre após um determinado número de cargas e descargas, para os vários métodos (A, B e C) referentes a ciclos de impregnação de água em autoclave e sucessivas secagem dos provetes. A Tab.1 da [EN 386](#), dá-nos os valores limites em função do método do tipo de adesivo (I ou II) e a percentagem máxima após o número do ciclo (1 a 3), sendo o valor máximo de delaminação permitida de **10%**.

O ensaio de corte, [BS EN 392](#), consiste em ensaiar a MLC ao corte pelos planos de colagem, e limitar as percentagens mínimas de rotura pela madeira dependendo do adesivo, ver Tab.2 da [EN 386](#).

A madeira mais utilizada e disponível para a produção de MLC na Europa é o Espruce (*Picea abies* L.) sendo que em Portugal o Pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.) também pode ser utilizado. As coníferas são mais utilizadas que as folhosas, e uma das razões é o fator da adesão dos adesivos

à madeira estar relacionada com a densidade. Madeira tratada também pode ser utilizada, desde que sejam cumpridos os requisitos de qualidade e resistência impostos pelas normas inerentes. As lamelas devem apresentar teores em água após secagem de 8% a 15% (madeira não tratada) e 11% a 18% (madeira tratada) e entre lamelas adjacentes não deve haver uma diferença do teor em água superior ou igual 5%, para evitar deformações diferenciais e tensões internas elevadas que poderiam por em causa a integridade da linha colada, bem como do próprio elemento. O processo de secagem deve ser devidamente controlado para que não surjam defeitos devido à secagem como por exemplo, fendas de topo, empeno e distorções, etc. As espessuras das lamelas também estão limitadas, e dependem da classe de serviço e da forma da peça (reta ou curva), (ver 6.2.3 da EN 386). A limitação das espessuras tem como principal objetivo diminuir as variações dimensionais e por consequência as tensões internas elevadas que daí provêm, sendo uma das grandes vantagens que a MLC tem em relação à MM diminuindo o risco do aparecimento de fendas de secagem que possam por em risco a capacidade resistente e durabilidade do elemento estrutural de madeira.

As lamelas são ligadas por juntas de topo designadas por "finger-joints" e depois cortadas para obter o comprimento requerido, de seguida, procede-se ao aplainamento das faces de colagem e à colocação do adesivo que deve ser no mínimo de 350 g/m². A colocação do adesivo deve ser feito de tal forma, que toda a área de colagem esteja devidamente preenchida, para evitar posterior delaminação devido à deficiente aplicação do adesivo. As lamelas são então amontoadas e com a orientação das fibras segundo a direção longitudinal do elemento, para obter a secção requerida. Neste passo, é ainda necessário ter em consideração o padrão dos anéis anuais da secção transversal, com o objetivo de minimizar as tensões internas, sendo por isso, colocadas da forma como é apresentado na Fig. 2.2, em função da classe de serviço.



(a) Orientação geral



(b) Orientação para a classe de serviço 3

Figura 2.2: Orientação das lamelas na secção transversal, EN 386.

O conjunto de lamelas serão então colocadas numa prensa, a qual aplicará uma pressão de cerca de 0.6 a 1.2 MPa durante 72 horas, para adesivo fenólicos, ou de 24 horas para adesivos aminoplásticos. Esta pressão aplicada serve para melhorar a resistência da junta colada e também para dar forma ao elemento, podendo este ser flexionado para obter formas curvas ou arqueadas. A cura da cola é feita sob condições de temperatura de 20°C e humidade relativa de 65%. Vigas contínuas podem ser alternativamente produzidas recorrendo a prensas de alta frequência que

aceleram o processo de cura do adesivo. Por conseguinte, seguem-se os acabamentos finais que consistem no corte do elemento para as dimensões pretendidas, aplainamento das faces e aplicação de revestimentos necessários de proteção, realização dos furos para encaixe de ligações que são executados geralmente por CNC's.

Os elementos de MLC devem ser depois armazenados em locais abrigados e sob condições climáticas constantes para que atinjam o teor em água o mais próximo possível do teor em água de equilíbrio onde irão ser colocados. Devem ser ainda protegidos com uma película plástica por forma a proteger o elemento do ambiente circundante e assim evitar trocas diretas com o meio circundante. Essa película deve ser apenas retirada depois da conclusão do fecho da obra.

O controlo de qualidade é uma parte importante da produção da MLC. Ela consiste numa parte interna levada a cabo pelo fabricante e uma parte externa realizada por uma entidade independente. O controlo de qualidade inclui ensaios à flexão, testes à tração das juntas de topo "finger-joints" e ensaios de delaminação ou ao corte para verificar a integridade das linhas coladas. O fabricante tem de estabelecer um controlo de produção da fábrica "factory production control (FPC) system", e um plano para os ensaios dos produtos e onde os fazer. Isto será verificado pela entidade independente que adicionalmente irá fazer visitas de inspeção à produção e levar a cabo os testes tipo iniciais. A execução do controlo de qualidade de acordo com as normas relevantes Europeias, que para a MLC são as seguintes: EN 301, EN 385, EN 386, permitem atribuir a marcação CE à MLC.

2.3.1 Adesivos e qualidade da junta colada

Adesivos

Segundo a (EN 1995:1-1, 2004, 3.6), adesivos com propósito estrutural devem realizar ligações resistentes e duráveis, e que sejam capazes de manter a integridade das mesmas sob as condições da classe de serviço em causa durante todo o período de vida estrutural. Já a norma, (EN 1995:1-2, 2003, 3.5), acrescenta ainda que a integridade da colagem deve ser mantida para todo o período definido de resistência ao fogo. Para efeito, deve haver à partida um criterioso cuidado na escolha do adesivo a usar para uma determinada aplicação estrutural, pelo que, as suas propriedades devem estar devidamente documentadas tanto em termos de resistência como de durabilidade sob carregamentos e exposições ambientais de longa duração, logo, apenas os adesivos que foram alvo de estudos exaustivos práticos e teóricos é que poderão ser usados. Os requisitos formais são dados pela EN 14080 (requisitos para a produção de MLC) e pelas sub normas EN 301 (adesivos para estruturas, classificação, desempenho e requisitos) e EN 302 (adesivos para estruturas, métodos de teste: (1) resistência ao corte, (2) delaminação, (3) resistência aos ácidos sob ciclos de temperatura e humidade, (4) efeito da retração na resistência

ao corte). De acordo com a [EN 301](#) os adesivos pertencentes ao **tipo I** podem ser utilizados em todas as classes de serviço, isto é, podem estar totalmente expostos às condições ambientais exteriores e a temperaturas até e acima de 50°C, por outro lado, os adesivos do **tipo II**, devem ser usados apenas nas classes de serviço 1 e 2, por isso tem de estar protegidos do ambiente exterior e não podem estar expostos a temperaturas superiores a 50°C durante um longo período de tempo. É necessário ter em atenção que a temperatura de amolecimento, situa-se bem abaixo do ponto de carbonização, assim sendo, mesmo que os adesivos não entrem em ebulição, estes perdem a sua resistência por amolecimento e para temperaturas bem abaixo da anterior. O tipo de adesivo (I ou II) usado na colagem das lamelas das vigas de MLC deve constar no selo da marcação CE de acordo com a [EN 14080](#), ([Myllypa, Porteous & Kermani, Handbook 2](#)).

2.4 Defeitos da madeira e características naturais

Os defeitos da madeira são singularidades/irregularidades ou anomalias estruturais, alteração química ou colorações normais que se apresentam no interior ou exterior que uma peça de madeira apresenta e que desvalorizam e comprometem total ou parcialmente a sua utilização para um dado fim. A norma ”[NP 180 \(1962\)](#). Anomalias e defeitos da madeira”, descreve os vários tipos de anomalias e defeitos da madeira, agrupando-os em quatro grupos. Dos quatro grupos, o que será abordado nesta dissertação é o relativo a anomalias e defeitos devidos **ao abate, à secagem e à laboração**. Neste grupo enquadram-se os defeitos e anomalias como os **empenos/distorções e fendas/fissuras**. Outros defeitos são: fio, nós, lenho de reação, lenho juvenil, medula, descaio, bolsas de resina e casca inclusa. De seguida, segue-se a explicação com mais detalhe destes dois tipos de defeitos da madeira que têm influência no seu comportamento estrutural bem como a importância do processo de secagem ao longo de todo o processo de fabrico da madeira serrada, [Cachim \(2014\)](#), [Madeira \(2007\)](#).

2.4.1 Fendas/empenos e distorções no processo de produção da madeira serrada

A produção da madeira é decomposta em várias operações [Coutinho \(1999\)](#). Durante estas operações é necessário ter em consideração vários aspetos de produção, para retirar o máximo rendimento da madeira do toro e ao mesmo tempo obter peças da melhor qualidade possível, evitando padrões de corte que resultem em técnicas complexas de manuseamento do toro levando ao aumento do custo e tempo de produção. Além disto, é ainda necessário tomar medidas em todas estas fases, para evitar defeitos como **empenos/distorções e fendas/fissuras** que possam por em causa a utilidade da peça final.

De seguida será feita uma breve explicação das fases de produção da madeira serrada, dando parti-

cular atenção as aspetos relacionados com os defeitos anteriormente mencionados conjugando-os com as propriedades físicas da madeira.

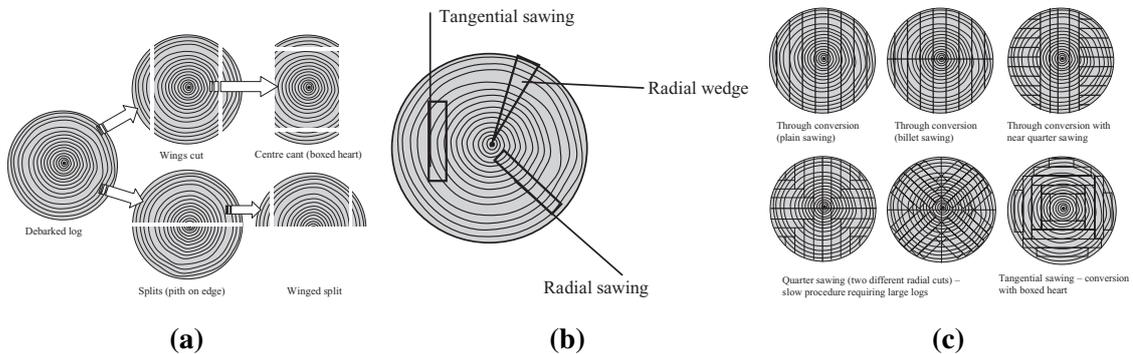


Figura 2.3: (a) Falquejamento do toro; (b) Corte tangencial e radial; (c) Padrões de corte mais comuns; (Porteous & Kermani, 2013a, Fig.1.3(a,b & c)).

Abate

O abate consiste na operação de cortar o tronco da árvore pela base, deitando assim a árvore por terra, de seguida a copa é removida, o tronco descascado posteriormente e cortado transversalmente em troços (**toragem**), passando-se a designar por toro. Os toros são então armazenados em pilhas e pulverizados com água ou colocados em água doce (rios, lagos) para evitar que sequem rapidamente. Esta operação deve ser realizada no Inverno, principalmente por questões de durabilidade. Durante o Inverno, ocorre a paralisação da vida vegetativa das árvores, consequentemente existe menos seiva elaborada, amido e fosfato que são alimento para agentes xilófagos que são a causa da destruição da estrutura da madeira e da sua degradação, diminuindo a sua durabilidade e resistência. Além do mais, as condições climáticas que se verificam durante o Inverno, permitem que a madeira seque lentamente. O motivo pelo qual se pretende que a madeira seque lentamente, é a minimização do surgimento de fendas resultado da secagem rápida do toro, que põem em causa a sua durabilidade por ser uma entrada para os agentes de degradação, e também por diminuírem a qualidade e o aproveitamento eficaz do toro. As extremidades dos toros devem ser pintadas com uma tinta isoladora, para evitar que estes sequem mais rapidamente nas extremidades, pelo fator da perda de humidade da madeira ser maior no sentido longitudinal das fibras, evitando desta forma, o surgimento de gradientes de humidade em relação ao sentido longitudinal da peça, o que conjuntamente com as **tensões internas de crescimento**, poderia resultar em fendas de topo e em empenos, diminuindo a qualidade do toro e o seu aproveitamento. Os toros de alta qualidade são enviados para serem cortados para o fabrico de folheados mas a maioria (dependendo da qualidade) são enviados para a serração para converter os toros redondos em madeira serrada, (Porteous & Kermani, 2013a, Coutinho, 1999, Martins, 2010)

Falquejamento

Cada serração tem os seus padrões de corte para produzir madeira serrada, mas o primeiro passo de todas estas passa pelo falquejamento (escanear) do toro para um melhor alinhamento, padrão de corte e otimização. Este processo consiste em converter o toro em falca (en: cant), isto é, remover quatro peças curvas chamadas de costaneiras (peças curvas dos cantos; en: wings cut, winged split), tornando a secção do toro redondo em uma secção mais esquadriada, aproximadamente retangular. Este processo visa ainda preparar o toro, para o processo de serração, tornando-o mais fácil de trabalhar.

Serração

A serração consiste em subdividir um toro ou uma peça de madeira por cortes longitudinais ou em série. A serração recorrendo a cortes longitudinais paralelos (desfiar, en: through conversion) produz maioritariamente cortes tangenciais da madeira, já a serração por cortes normais aos anéis de crescimento produz cortes radiais (serração radial). Cada serração estabelece os seus padrões de corte para diferentes tamanhos de toros,



Figura 2.4: Posição do núcleo (mltfh).

tendo sempre em vista, a maximização do número de peças cortadas nos tamanhos mais populares (ou comerciais) e na minimização dos defeitos naturais destas mesmas peças. Do ponto de vista económico, a madeira cortada tangencialmente é mais económica pelo fato dos métodos de produção serem relativamente menos repetitivos. A conversão do toro delimitando o núcleo em forma de caixa (en: boxing the heart), é uma técnica moderna de corte que elimina o cerne das pranchas, que é por vezes, causa de defeitos como fendas anelares, eliminando a madeira juvenil que poderia estar podre, produzindo cortes tangenciais. As técnicas de corte em quartos (anéis anuais fazem um ângulo de 65° - 90° com borda da prancha; en: quarter sawing), produz cortes radiais, e por isso trata-se de um processo mais caro pelo fator de ser necessário dobrar (ou mais) as posições do toro e também por apresentar um desperdício maior de material de acordo com o padrão de corte radial ou semi/radial (misto) adotado. A grande vantagem desta técnica é dar origem a peças mais decorativas e menos propensas a **empenos** e **distorções**.

Existem várias alternativas de cortes tangenciais e radiais para obter as melhores e mais económicas pranchas com vista o seu uso final. Exemplos desses métodos de repartição do toro e de diferentes padrões de corte são mostrados na Fig. 2.3c.

Relativamente aos elementos estruturais de madeira maciça, normalmente utilizados na construção de casas tradicionais de madeira, recomenda-se que estes não contenham o núcleo, com o objetivo de evitar ou minimizar a ocorrência de fendas visíveis e empenos. As secções de madeira

maciça livres do núcleo, ver Fig. 2.4(dir.), retraem menos que aquelas que o contêm, ver Fig. 2.4(esq.), daí serem menos propensas à ocorrência de fendas e empenos.*

* <http://mltfh.com/timberframespecifications/>

Secagem

A madeira da árvore está saturada de água. De fato, isto é responsável por proteger a árvore contra a degradação por fungos. O processo após a serração é a **secagem**, e esta tem como objetivo reduzir o teor em água da madeira para um nível adequado ao ambiente no qual esta irá ser instalada. A madeira que até então se considerava verde ($TH > 30\%$, acima do PSF), dependendo do processo de secagem adotado, irá passar a designar-se por madeira comercialmente seca ($TH \leq 20\%$), madeira seca ao ar ($14\% \leq TH < 18\%$), madeira dessecada ($0 \leq TH < 14\%$, em geral só por secagem artificial) e madeira anidra ($TH = 0\%$, quando seca em estufa). Note-se que o processo de secagem deve idealmente remover até $1/3$ do teor em água das paredes das células.

A secagem da madeira tem várias vantagens:

1. quando a madeira seca, esta torna-se mais resistente e mais rígida;
2. se o teor em água for baixo o suficiente, esta fica protegida contra a degradação por ataque de fungos, visto que estes necessitam de altos teores em água;
3. se esta for instalada com um teor em água adequado ao ambiente circundante, esta não irá inchar nem retrair significativamente.

É justo afirmar, que a maioria dos problemas da utilização da madeira são atribuídos ao seu teor em água. A secagem da madeira é um processo energético intensivo, que deve ter especial cuidado, para que a madeira não se degrade como resultado da ocorrência de distorções e da separação das fibras em forma de fendas.*

* <http://www.iom3.org/wood-technology-society/wood-drying>

Os métodos mais comuns de secagem da madeira são a secagem ao ar e a secagem em ambiente condicionado. Estes dois métodos são de seguida explicados com mais detalhe.

Secagem ao ar ou natural: A secagem ao ar ou natural é um processo de secagem lento, que pode levar vários anos. Além de ser um processo lento, é também dispendioso indiretamente, porque implica uma imobilização de capital durante todo o tempo de secagem. Embora alguma secagem possa ser alcançada por secagem ao ar livre (secagem natural), com custos diretos energéticos nulos, esta resulta de um processo que depende da variabilidade do clima. Por exemplo, um clima quente de Verão pode danificar irreparavelmente uma pilha de toros recém serrados.



Figura 2.5: Madeira serrada seca ao ar livre

Secagem em ambiente condicionado ou artificial: A secagem em ambiente condicionado ou artificial é uma simulação computadorizada de climas adequados a uma secagem rápida, controlando a secagem minuto a minuto, assegurando um excelente resultado em termos de qualidade da madeira, e encurtando para 2 a 4 semanas o processo de secagem natural antes descrito.*

* <http://www.jular.pt/download/Importancia-secagem-madeira.pdf>

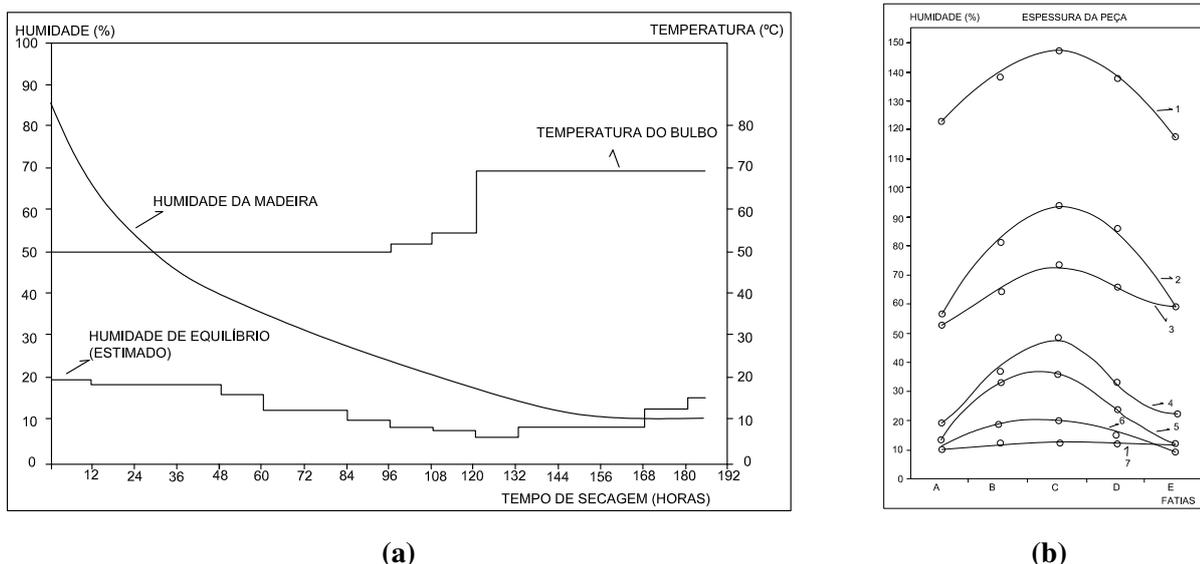


Figura 2.6: (a) Representação gráfica das condições de secagem artificial a que foi submetida uma determinada espécie; (b) Desenvolvimento do gradiente de humidade ao longo do período de secagem, adaptado de (Jankowsky & Silva, 1985, Fig.2-3).

Melhores resultados, em comparação com os da secagem natural, são obtidos por secagem artificial numa câmara específica, onde ar é injetado, a uma dada temperatura e humidade relativa, por entre as pranchas de uma pilha, separadas por tiras de madeira (Figs. 2.7a e 2.7c). A taxa de secagem e as tensões no interior da madeira podem ser cuidadosamente monitorizadas e controladas (Fig. 2.6). Investigações continuam no sentido de melhorar a precisão e a eficiência energética das câmaras de secagem. Paralelamente com a secagem da madeira, existe muito interesse na medição do teor em água da madeira (Fig. 2.7b). Medições rápidas e precisas são

essenciais no processo de secagem e de produção da madeira estrutural. Muitos problemas permanecem, tal como, o relacionado com a medição do teor em água da madeira modificada (IoM).



(a) Esquema de circulação de ar. (b) Medição do teor em água. (c) Forno de secagem.

Figura 2.7: Secagem em fornos/estufas e ao ar livre da madeira serrada.

(a) <http://www.connectpol.eu/images/stories/produkty/piec-u/suszarnia-tarcicy.jpg>; (b) http://www.gillwood.ca/nw/images/right_side_images/kiln_drying.jpg; (c) <http://www.thomson-sawmills.co.uk/images/kiln-dry-04.jpg>.

Defeitos da secagem: Os defeitos de secagem são resultantes basicamente de tensões internas que se desenvolvem durante o processo de secagem e dão origem essencialmente a fendas e distorções. São vários os motivos que estão na base da ocorrência destes defeitos, sendo eles: a secagem em excesso ou não uniforme, a existência de peças comprimidas, presença de nós, as exposições cíclicas ao vento e à chuva ou a climas severos (grandes variações de humidade relativa do ar e temperatura), incumprimento dos espaçamentos mínimos aquando o empilhamento, escolha incorreta do programa de secagem para uma dada espécie. A presença de medúla nas peças, é um fator que pode provocar sérios defeitos de secagem para além de ter influência na resistência da madeira, sendo preferível a sua ausência nas peças de madeira. Assim, entende-se que é essencial a existência de um controlo de qualidade rigoroso no final do processo de secagem, isto é, um processo de averiguação de defeitos, de modo a qualificar a madeira como adequada, ou não, ao seu uso final. Na Fig. 2.8, é apresentado um esquema de rejeição de peças que perdem a sua validade, onde são ilustrados empenos e fendas de topo. São ainda apresentados neste esquema exemplos de alguns defeitos que podem ocorrer durante a secagem, como fendas internas (alveolado), tensões permanentes que se manifestam após a serragem (encruamento), ou as paredes celulares deformadas e ondulamento da madeira (colapso).



Figura 2.8: Tipos de defeitos causados ou agravados por uma deficiente operação de secagem (Santos et al., 2011, Fig. 5).

Mecanismos de secagem: A água na madeira normalmente move-se das zonas de maior teor em água para as de menor teor em água. Se a superfície da madeira estiver sujeita ao processo de secagem, o teor em água do interior mais húmido, irá se deslocar em direção à superfície, de menor teor em água, até se atingir um estado de equilíbrio (teor em água constante ao longo de toda a largura da secção transversal e em equilíbrio com o clima circundante). A secagem pode ser dividida em duas fases: movimento da água da madeira do interior da secção transversal para a superfície, e evaporação do água da superfície. As fibras de madeira da superfície de uma secção transversal, na maioria das espécies alcançam o teor em água de equilíbrio com o ar circundante, logo após o processo de secagem ter começado. Desta forma, desenvolve-se logo na fase inicial do processo de secagem, um gradiente de teor em água típico, provocado pela diferença entre os teores em água das camadas mais superficiais e as mais internas à secção transversal, ver Fig. 2.6b. Se a circulação de ar for demasiado baixa, é necessário muito tempo para a superfície da madeira atingir o teor em água de equilíbrio, sendo esta uma das razões da importância da circulação de ar na secagem da madeira em fornos de secagem. Neste caso, a taxa de secagem poderá ser inferior à necessária e poderá dar origem, sob estas condições, a bolores na superfície da madeira. Por outro lado, se a secagem for demasiado rápida, a taxa de secagem é superior à necessária, promovendo a ocorrência de defeitos de secagem, tais como fissuras, fendas ou empenamentos. Recomenda-se nesta situação, o devido controlo e coordenação da velocidade das ventoinhas e da humidade relativa do ar, minimizando o desperdício de energia usada para mover as ventoinhas.

A água no interior da madeira pode-se mover no seu estado líquido ou em forma de vapor, pelas passagens e vazios constituintes da estrutura celular da madeira, bem como através das próprias paredes celulares das células, em todas as direções e sentidos, transversalmente e paralelamente às fibras, respetivamente. De uma forma geral, as espécies de menor densidade, mais leves, secam mais rapidamente que as de maior densidade, mais pesadas, e isto deve-se à estrutura das madeiras leves apresentarem um maior volume de vazios, por onde a água se move mais rapidamente, do que através das paredes celulares.

A água move-se segundo dois principais mecanismos: capilaridade (água livre ou capilar) e difusão da água ligada às paredes celulares (água de impregnação ou higroscópica). A capilaridade leva a água livre a fluir através das cavidades das células e das pequenas passagens que conectam as cavidades adjacentes das mesmas. A difusão da água de constituição das paredes celulares, move-se das áreas de alta concentração de humidade para as de menor concentração. A difusão na direção longitudinal é cerca de 10 a 15 vezes mais rápida que nas direções tangenciais e radiais, e a difusão radial é um pouco mais rápida que a tangencial. Isto explica o porquê, a madeira cortada “flatsawn” geralmente seca mais rápido que a madeira cortada em “quartersawn”. Embora a difusão longitudinal seja mais rápida que a difusão transversal às fibras,

esta na generalidade não tem importância na madeira serrada que é muitas vezes mais longa que espessa. Adicionalmente, um resultado direto da difusão poderá ser as fendas de topo, quando não são tomados os devidos cuidados.

Por causa dos extrativos químicos do cerne que tapam as passagens de conexão, a humidade geralmente move-se mais livremente no borne do que no cerne, assim, o borne seca mais rapidamente que o cerne. No entanto, o cerne de muitas espécies contém menos humidade que o borne. Assim o cerne pode alcançar o teor de humidade de equilíbrio tão rapidamente quanto o borne.

A taxa à qual a humidade se move na madeira depende da humidade relativa do ar circundante, do declive do gradiente de humidade, e da temperatura da madeira. Menores humidades relativas aumentam o fluxo capilar. Baixas humidades relativas, também estimulam a difusão por diminuírem o teor de humidade na superfície, deste modo ajustam o gradiente de humidade e aumentam a taxa de difusão. Quanto mais elevada for a temperatura da madeira, mais rápido será o transporte de humidade do interior de uma peça de madeira húmida para a superfície seca, acentuando o gradiente de humidade. Se a humidade relativa for demasiado baixa na fase inicial de secagem, poderá ocorrer retração excessiva, resultando em fendas superficiais e fendas de topo. Se a temperatura for demasiado elevada, pode ocorrer o colapso da madeira (ex. favos de mel), ou diminuição da resistência (Bergman, 2010).

Tensões de secagem: As tensões de secagem são a principal causa de defeitos de secagem, sendo a sua compreensão necessária, para que se possam tomar medidas que as minimizem, tendo em mente o dano que elas possam causar às peças de madeira. As tensões de secagem são devidas ao comportamento retráctil da madeira, mais concretamente devido à retração diferencial entre as camadas externas e internas de uma prancha de madeira, a título de exemplo. Na fase inicial do processo de secagem da prancha, as fibras das camadas externas secam primeiro e começam a retrair, por consequente perda de teor em água. No entanto, nesta fase inicial de secagem, as camadas interiores à prancha ainda se encontram húmidas, isto é, ainda não começaram a secar nem a retrair. De fato, nesta fase inicial do processo de secagem, observa-se um gradiente elevado de teor em água entre as camadas externas e internas à prancha, que irão originar tensões internas restringidas, por consequência da restrição das camadas internas à retração das camadas externas. Assim, as camadas externas ficam tracionadas e as camadas internas comprimidas, , ver Fig. 2.9(a). Se processo de secagem for intenso e demasiado rápido, irá dar origem a elevados gradientes de teor em água entre as camadas internas e externas, podendo as camadas externas ficar sujeitas a tensões de tração superiores à do seu limite elástico, dando origem a fendas superficiais, ou fissuras, que são frequentes nesta fase inicial e sob estas condições, e consideradas um sério defeito em muitos usos e aplicações. As camadas externas,

secam segundo uma condição permanente, sem retrair completamente, devido à libertação das tensões restringidas, em forma de fendas ou fissuras. Com o decorrer o processo de secagem, as camadas internas começam a secar e tendem a retrair. Por outro lado, as camadas externas encontram numa condição de expansão permanente, prevenindo a retração normal das camadas internas, o que irá causar a reversão das tensões: as camadas internas passam a estar tracionadas e as externas comprimidas. Na Fig. 2.10, é-se possível observar, a relação entre o teor em água das camadas externas e internas e as tensões internas que surgem, durante o processo de secagem (50 dias), que podem facilmente dar origem a fendas internas (favos de mel, en: honeycomb). A retração diferencial causada pela diferente retração radial, tangencial e longitudinal é a principal causa de empenos. As distorções mostradas na Fig. 2.8 são devidas à retração diferencial. Quando de um lado temos madeira juvenil ou de reação e do outro madeira normal, a diferença entre a retração longitudinal entre ambos podem causar também empenos (Bergman, 2010).

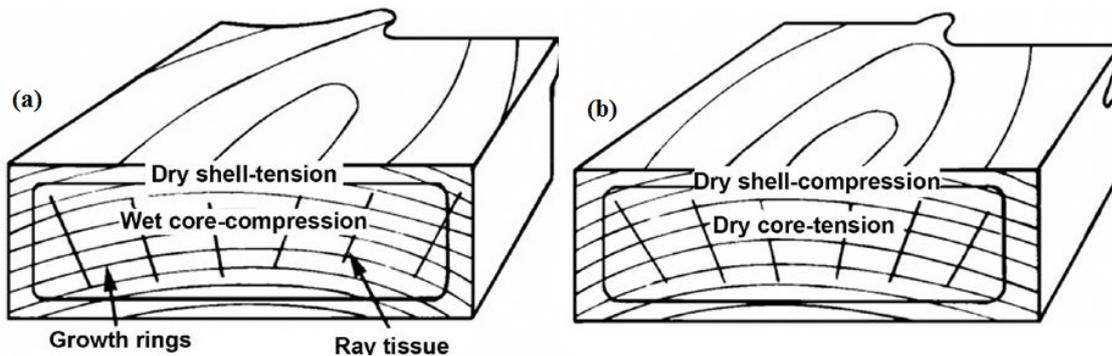


Figura 2.9: Vista de topo de uma prancha mostrando o desenvolvimento de tensões de secagem (a) precoce e (b) posterior (Bergman, 2010, Fig. 13-3).

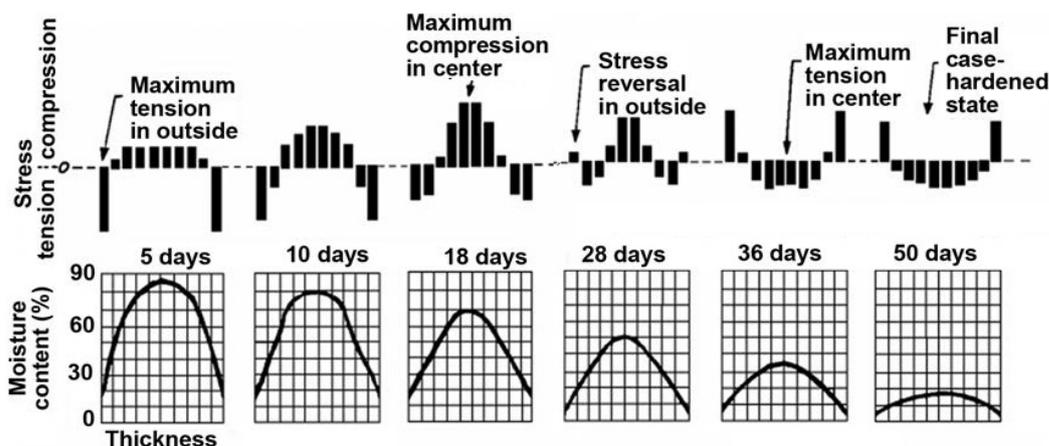


Figura 2.10: Relação entre as tensões induzidas pela humidade e o teor em água durante seis estágios da secagem da madeira de “red oak” de 50 mm de espessura em fornos de secagem (Bergman, 2010, Fig. 13-4).

2.5 Tipos de fendas em madeira maciça

Fendas de secagem superficiais (Fig. 2.11a) & profundas (Fig. 2.11b): A partição, divisão, fendimento ou separação das fibras de madeira está associada ao seu processo de secagem e são mais pronunciadas, quando a madeira é seca ao ar livre do que em estufas de secagem. Este tipo de fendas são normalmente pequenas e estreitas, com larguras de 0.5 a 1 mm e comprimentos de 10 a 30 mm. Estas fendas superficiais, embora por vezes possam exceder os 2 mm de espessura, podem ser uma característica estável da madeira em elementos estruturais antigos. As fendas profundas são como as superficiais, mas geometricamente maiores.

Fendas internas - núcleo (Fig. 2.11c): As fendas internas são devidas maioritariamente à presença da medula na secção transversal. Secções de grandes dimensões de madeira, p. exemplo 200 x 200 mm, são particularmente afetadas por este tipo de fendas, pelo fato do núcleo da secção que contem a medula ser difícil de excluir. As tensões internas que surgem no núcleo da secção transversal devidas ao processo de secagem da madeira ou a tensões de crescimento instaladas, levam ao surgimento de fendas internas. No caso das secções cortadas no caminho do núcleo, estas tensões são libertadas durante o processo de corte.

Fendas internas - favos de mel/alveolado (Fig. 2.11d): As fendas internas, mais especificamente as que tem forma de favo de mel ou alveolares, são mais pronunciadas que as fendas de superfície. Podem afetar o núcleo de pranchas de madeira serrada com espessuras a variar entre os 50-100 mm, quando sujeitas a um processo de secagem inadequado. Ocorrem particularmente quando o toro serrado é pequeno.

Fendas anelares (Fig. 2.11e): As fendas anelares, são fendas circulares, interiores ao tronco. Estão normalmente associadas a uma zona frágil ou de propriedades distintas, como é o caso da interface borne-cerne, espaçamento brusco e exagerado entre anéis de crescimento, anéis gerados num ano no qual ocorreu um incêndio. Estas zonas frágeis quando associadas às tensões induzidas pela humidade ou às tensões de crescimento, pode inutilizar completamente a madeira.

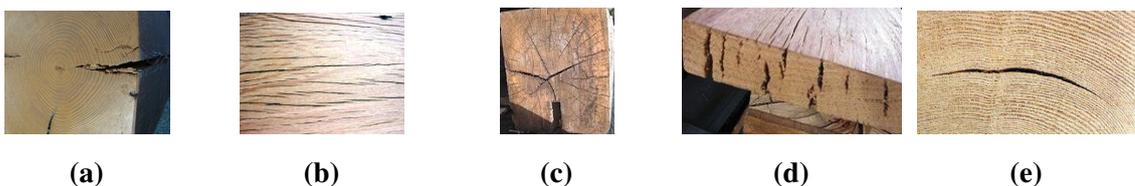


Figura 2.11: Imagens de tipos de fendas em madeira maciça (<http://www.timberzoo.com.au/timber-info/info3.htm>).

2.5.1 Fendas na classificação de madeiras segundo classes de qualidade

Na classificação visual, as fendas são um indicador de qualidade da madeira. A medição e identificação de fendas em peças de madeira são importantes do ponto de vista do comportamento estrutural, e do peso relativo que este defeito/singularidade possui no elemento. A afetação do elemento pela presença de fendas é clara, mas nas normas de classificação visual, onde reside os maiores problemas é na determinação de valores que limitem a abrangência destas nas classes de qualidade.

Existem normas específicas, a nível nacional aplicadas especificamente à classificação visual de madeiras, que têm características específicas, tendo em conta: espécie ou conjunto de espécies, origem geográfica, diversos requisitos dimensionais, qualidade geral do material disponível no mercado, influência histórica ou a tradição dos mercados. Existe uma grande variedade de normas disponíveis de classificação visual em uso nos diversos países, e a criação de uma norma europeia universal, é atualmente impossível. Por isso, as normas de classificação visual normalizadas em cada um dos país membros, são válidas desde que estejam em conformidade com os requisitos da norma EN 14081, a qual estabelece bases comuns que servem de referência às normas nacionais.

A classificação visual deve ser efetuada utilizando uma norma que apresente os requisitos indicados no anexo A da [EN 14081-1\(5.2\)](#). De seguida é feito um resumo do Anexo A da [EN 14081-1](#), relativo às condicionantes atribuídas às fendas, onde são definidas as exigências de desempenho gerais relacionadas com este defeito, a serem pormenorizadas nas normas específicas de classificação visual publicadas em cada país, no que respeita às suas limitações (valores mínimos) às características das fendas, que reduzem a resistência de uma peça de madeira.

Fendas: As fendas não devem apresentar comprimentos inferiores ou iguais ao disposto no quadro A.1 da norma EN 14081. Medem-se de acordo com o ponto 4.9.1 da [EN 1310](#), nos locais onde tenham influência na resistência, por exemplo na resistência ao corte de uma viga, onde o seu valor deve ser limitado. Caso contrário podem ser desprezadas. O valor máximo do comprimento das fendas não deve ser superior ao dado na tabela da Fig. 2.12, sendo feita a distinção entre fendas repassadas ou não.

Ficará ao critério de cada país acrescentar outros parâmetros que considerem necessários para além das limitações referidas na Tab. 2.12. Cada país, tem as suas normas de classificação visual relativas a espécies de madeira lá existentes, e cada uma destas normas apresenta um determinado número de classes de qualidade, nas quais terão sempre de existir limitações específicas relativas à presença de fendas em peças de madeira.

Strength class according to EN 338		C18 and below	Above C18
Max. permitted length of fissures ^a		Fissures less than half the thickness may be ignored	
	Fissures not going through the thickness	Not greater than 1,5 m or ½ the length of the piece, whichever is the lesser	Not greater than 1 m or ¼ the length of the piece, whichever is the lesser
	Fissures going through the thickness	Not greater than 1 m or ¼ the length of the piece, whichever is the lesser. If at the ends, a length not greater than two times the width of the piece	Only permitted at the ends with a length not greater than the width of the piece

Figura 2.12: Comprimento máximo das fendas num elemento de madeira (EN 14081-1, 2005, Tab. 1).

2.5.2 Fendas em elementos de madeira

Segundo [J. S. Machado \(2014\)](#), a presença de fendas em elementos de madeira bem como o seu impacto nas propriedades mecânicas é uma questão frequente levantada em obra. A análise desta questão não é simples. No entanto, esta questão pode ser analisada do ponto de vista da duração ou idade das fendas, isto é, se se tratam de fendas existentes em elementos antigos, ver Fig. 2.13b, ou em elementos recentemente colocados em obra, ver Fig. 2.13a.



(a)



(b)

Figura 2.13: Observação da superfície interna das fendas; (a) superfície clara indicando a presença de uma fenda recente; (b) superfície escura indicando a presença de uma fenda antiga, [Cruz \(2012\)](#).

Fendas em elementos aplicados em obra

De acordo com [J. S. Machado \(2014\)](#), as dimensões das fendas observadas em estruturas antigas são influenciadas por dois fatores:

1. Secções transversais de grande dimensão;
2. Aplicação da madeira verde (teor em água acima dos 24%), que sofreu o seu processo de secagem em obra.

Para a avaliação das fendas deve ter-se em conta os seguintes aspetos:

Idade (recentes ou antigas): Uma das formas de determinar a idade das fendas é observar o interior das mesmas. No caso do aspeto superficial do interior das fendas for claro, estamos perante fendas recentes, ver Fig. 2.13a , por outro lado, se esta for escura, trata-se de fendas antigas, ver Fig. 2.13b . A cor escura deve-se à oxidação da madeira ou da deposição de poeiras e sujidades.

Comprimento, largura e profundidade: Trata-se do primeiro passo a ser realizado e para o levar a cabo é necessário usar o apalpa folgas e a fita métrica.

A profundidade das fendas deve ser realizada em pelo menos 3 pontos do seu comprimento. Esta medição deve ser auxiliada com equipamentos que permitam avaliar o estado do elemento em profundidade (p.e. equipamentos de avaliação da resistência à perfuração).

Localização no elemento: As fendas devem ser avaliadas tendo em consideração a sua localização no elemento e dos esforços presentes nessa zona. As zonas críticas para a localização de fendas são as que apresentam elevados esforços de corte ou de tração perpendicular às fibras. Nestas zonas críticas mencionadas, as fendas devem ser limitadas pelos limites impostos pelas normas de classificação visual da madeira em causa para fins estruturais.

As fendas antigas são resultado na maioria, da aplicação de madeira com um teor em água muito elevado em relação ao teor em água de equilíbrio que esta atingiria em obra. Deste modo, o processo de secagem da madeira irá se realizar em obra, o que resultará na formação de fendas significativas.

A evolução das fendas ao longo do tempo deve ser monitorizada por forma a detetar mudanças de uso do espaço que levem a variações do clima interno e que por sua vez resultem em processos de secagem da madeira resultando em fendas de secagem.

Quando ocorre mudanças de utilização do espaço, sejam estas relativas ao clima ou às ações impostas sobre os elementos, devem ser tomadas medidas a curto prazo.

As fendas podem ser reparadas e/ou estabilizadas através, ([Dias et al., 2009](#)):

1. Técnicas tradicionais (p. ex. cintas metálicas);
2. Colagem com auxílio ou não de varões metálicos.

A colmatação das fendas, deve ser realizada quando estejam asseguradas as condições de estabilidade do teor em água da madeira e com resinas compressíveis. Caso contrário, a resina solidificada pode surtir num efeito de cunha, que levará a um aumento brusco das fendas após humedecimento da madeira.

A monitorização das fendas situadas em zonas críticas é de extrema importância para que não surjam dúvidas acerca da sua estabilidade, visto serem um fenómeno com desenvolvimento temporal, ([Dietsch & Kreuzinger, 2011](#)).

Fendas em novos elementos de madeira

A classificação da madeira em serração é normalmente feita para um teor em água que lhe confere a designação de madeira comercialmente seca. No entanto este teor em água é ambíguo, pelo fator da [EN 14081-1 \(2005, 3.4\)](#) estabelecer que a madeira estrutural de secção retangular para fins de classificação segundo a sua resistência, tem como requisito (termos e definição), que a madeira para este fim seja parte de um lote que tenha sido intencionalmente classificada para um teor em água médio de 20% ou menor, sem que nenhuma medição possa exceder os 24% (podendo assim compreender valores entre os 6% e os 24%).

A ambiguidade do conceito de madeira comercialmente seca reflete-se na ocorrência em obra de defeitos como sejam fendas e empenos, e por isso, tem de se ter em consideração a importância desta ambiguidade.

A classificação da madeira para fins estruturais é feita durante a serração, onde se procede à atribuição da classe de qualidade e consequentemente à classe de resistência desejada, a qual obedece aos limites impostos quanto ao número, tipo e extensão das fendas.

No entanto, poderá ocorrer com frequência a receção em obra de madeira classificada corretamente em serração, que evidenciam fendas com alguma extensão, podendo comprometer a classificação da mesma, por deixar de obedecer aos limites impostos, definidos para este tipo de defeito.

Este fenómeno ocorre pelo fator da classificação ter ocorrido para valores de teor em água entre 18% e 24%, em serração, tendo ocorrido a secagem da madeira para valores normalmente entre os 12% e os 16%, em obra. Entende-se por isso, que no caso do fornecimento de madeira nova, o problema das fendas coloca-se ao nível do caderno de encargos (especificação). Sendo assim, recomenda-se que o caderno de encargos especifique o teor em água a que a madeira deve ser classificada e entregue em obra, assim como a respetiva tolerância (p. ex. $14\% \pm 2\%$). Por este meio, reduz-se o perigo de desfasamento significativo entre o teor em água da classificação e da utilização, com o correspondente aparecimento de fendas e empenos que originam atrasos e incertezas em obra.

No caso de secções fora da gama incluída na [EN 1313-1](#), a ocorrência de fendas nestas pode ser inevitável, principalmente em secções de madeira maciça de grandes e largas secções, sendo por isso, recomendável a utilização de lamelados colados. Para secções com dimensões acima de 200 x 160 mm, deverão-se atender a cuidados adicionais, com vista a diminuição do risco de fissuração.

Transporte e armazenamento em obra

A variação do teor em água dos elementos novos de madeira durante o seu transporte e armazenamento em obra, se não efetuados corretamente, pode colocar em risco ou mesmo comprometer

a aplicação do material em obra.

Revela-se importante a realização do registo do teor em água dos elementos com humidímetros desde a sua saída da unidade de secagem (definindo a qualidade de secagem do lote), aquando da receção em obra e no momento de aplicação em obra. O registo do teor em água dos elementos é um procedimento que visa garantir as condições ideais da aplicação dos elementos em obra e detetar atempadamente problemas associados à humidificação accidental. Para que tal não se verifique devem ser definidas no caderno de encargos todas as medidas que visem mitigar o efeito da variação excessiva do teor em água dos elementos em todas as fases e os custos associados ao seu fornecimento.

- No caderno de encargos, deve portanto, estar definido o teor em água que os elementos devem ser classificados e entregues em obra;
- Na fase de transporte e armazenamento, devem ser reunidas as condições necessárias de forma a evitar alterações excessivas ($\pm 3\%$) do teor em água relativamente ao previsto no caderno de encargos;
- Relativamente ao transporte, dependendo das condições (lote fechado, aberto exposto ou não ao ambiente exterior), a variação do teor em água pode ir de 1,5% a 7%;
- Necessidade de proteção dos elementos durante o transporte (p. ex. Coberturas impermeáveis e/ou proteção dos topos com um selante adequado);
- Relativamente aos locais de armazenamento dos elementos, estes devem ser abrigados de forma a evitar que os elementos fiquem expostos à radiação solar direta, chuva ou ambientes de humidade elevada.

No caso de não serem asseguradas as condições mínimas de proteção dos elementos de madeira, estes devem ser equacionados para a classe de serviço mais elevada para mitigar os danos provocados pelas variações do teor em água ou simplesmente a escolha de outro material. No caso da MLC, as repercussões são maioritariamente ao nível da qualidade da junta colada.

2.6 Avaliação dos efeitos das condições ambientais

A madeira é um material higroscópico, e por isso está em constante interação com o ambiente que a rodeia (humidade relativa e temperatura), tentando sempre atingir um estado de equilíbrio, teor em água de equilíbrio. A reação da madeira à humidade tem levado à realização de vários trabalhos de pesquisa em relação este material de construção renovável e natural. A preocupação do comportamento higroscópico da madeira estende-se a todas as fases do período de vida deste material, como no projeto, execução, manutenção de edifícios construídos com madeira ou seus derivados. Desde o abate da árvore até ao uso da madeira como material de construção, isto é, para elementos estruturais, a madeira irá passar por várias fases de processamento e de forma em

que será sujeita às variações das condições ambientais. A influência dessas variações ao longo do período de vida da madeira no seu teor em água pode ser ilustrada através da Fig. 2.14.

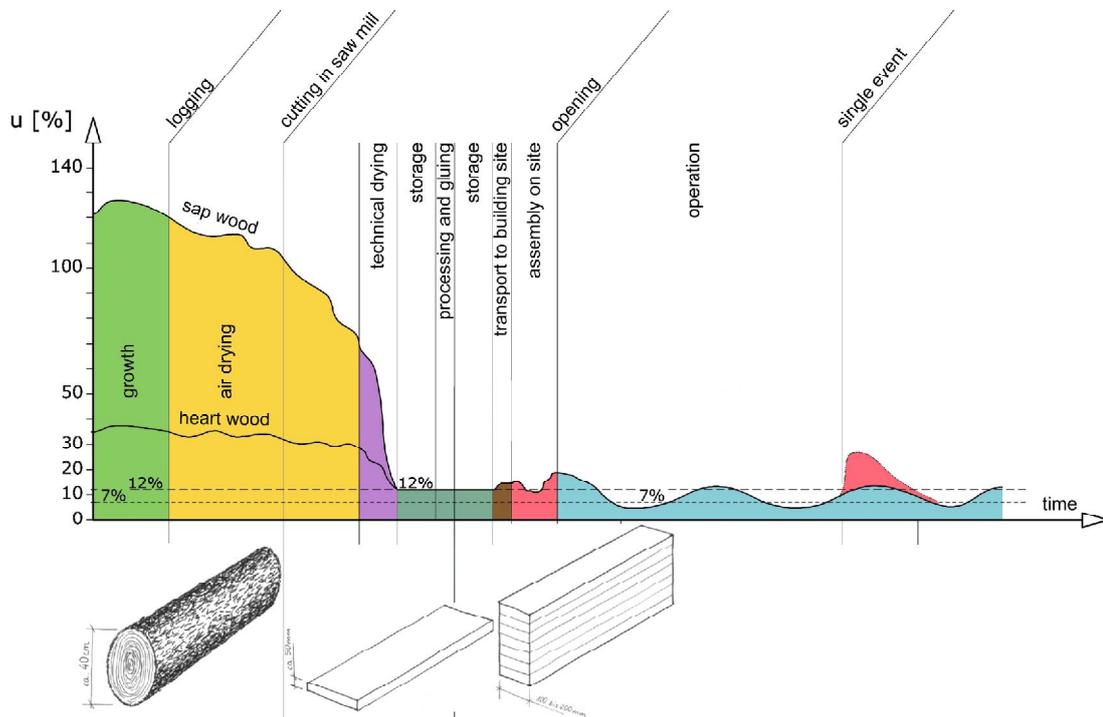


Figura 2.14: Ilustração de uma possível mudança de humidade, isto é, exposição à humidade desde árvore até aos elementos de madeira lamelada colada de construções (Dietsch et al., 2012).

A mudança do teor em água leva mudanças de todas as propriedades físicas e mecânicas (por exemplo, resistência e rigidez) da madeira. Este fato, é tido em consideração na secção 2.3.1.3 da norma EN 1995:1-1 (2004), pela classificação dos elementos estruturais de madeira em uma das 3 classes de serviço possíveis de acordo com as condições climáticas durante o período de vida em serviço de projeto.

Tabela 2.1: Classes de serviço.

Classes	MC	RH
1 Interior	< 12%	< 12%
2 Coberturas frias, paredes externas	12% – 20%	< 85%
3 Exterior (exposição total)	> 20%	

Quando a madeira sofre variações do seu teor em água abaixo do seu ponto de saturação, esta vai retrair ou expandir. No entanto, pelo fator das partes superficiais se adaptarem primeiramente às condições climáticas, provocam gradientes de humidade, que por sua vez devido aos movimentos de retração e expansão diferenciais restringidos, leva ao surgimento de tensões internas ao longo da secção transversal. Por vezes, estas tensões internas podem ultrapassar a baixa resistência

a tração perpendicular às fibras, e quando isto acontece, verifica-se um alívio de tensões em forma de fendas, que podem reduzir a capacidade resistente dos elementos estruturais de madeira ao corte ou à tensão perpendicular às fibras por diminuição da secção transversal efetiva para transmitir as tensões respetivas.

2.6.1 Métodos de medição

Temperatura e da humidade relativa

A medição da temperatura e da humidade relativa é parte de todas as avaliações em estruturas. A informação do macro clima é, entre outros aspetos, necessário para a comparação com o teor em água. As medições devem ser realizadas na vizinhança dos componentes estruturais onde se estão a realizar as medições do teor em água, por meio de termómetros, higrómetro, termo-higrómetros e barómetros. Um higrómetro é o instrumento usado para medir o teor em água na atmosfera. Normalmente os instrumentos de medição de humidade dependem da medição de alguma outra quantidade tal como a temperatura, a pressão, a massa ou uma alteração mecânica ou elétrica de uma substância quando esta absorve humidade do ar. Através de calibração e cálculos, estas quantidades medidas podem ser transformadas em uma medição da humidade. Dispositivos eletrónicos modernos usam a temperatura de condensação (ponto de orvalho), ou alterações da capacitância elétrica ou resistência para diferentes humidades. Em situações de avaliação de estruturas, a humidade relativa é medida normalmente com recurso a um higrómetro capacitivo. Para aplicações onde o custo, o espaço, ou a fragilidade são relevantes são usados outros tipos de sensores eletrónicos, mas com menor precisão. Em sensores capacitivos de humidade é medido o efeito da humidade na constante dielétrica de materiais, tais como polímeros ou óxidos de metal. Com calibração, estes sensores tem uma precisão de $\pm 2\%$ HR num intervalo entre 5-95% HR. Sem calibração, a precisão é de 2 a 3 vezes pior. Os sensores capacitivos são sensíveis a efeitos, tais como a condensação e a temperaturas elevadas temporárias. Estes estão sujeitos a contaminação, derrapagem e a efeitos de envelhecimento, mas no entanto são adequados para várias aplicações. Como importa medir de uma só vez valores de humidade relativa, temperatura e pressão atmosférica, aparelhos mistos são vantajosos e práticos, como por exemplo termo-higrómetros.

Teor em água da madeira

A medição do teor em água pode ser realizada por vários métodos: método gravimétrico, método dielétrico/capacitivo, método resistivo.

Método gravimétrico

O método gravimétrico (secagem de provetes em fornos de secagem) encontra-se normalizado na [NP 614 \(1973\)](#). O método consiste em pesar um provete com dimensões de

acordo com as respectivas normas e livre de defeitos. Posteriormente seca-se na estufa a $103^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ até obter uma massa constante, deixa-se arrefecer no exsicador e pesa-se. Depois o teor em água é determinado de acordo com a seguinte expressão:

$$H = \frac{m_h - m_s}{m_s} * 100 \quad (2.3)$$

Sendo, m_h a massa do provete húmido em gramas, e m_s a massa do provete seco em gramas.

O método apresentado na [EN 13183-1 \(2002\)](#), permite a determinação de gradientes de humidade em elementos de madeira, embora seja um método destrutivo, difícil e trabalhoso, fazendo dele um método pouco adequado para investigações em sítio. O método consiste na extração e segmentação dos provetes de forma a não influenciar o teor em água, depois o processo de determinação do teor em água desses segmentos é semelhante ao realizado na [NP 614 \(1973\)](#), descrita de uma forma simplificada anteriormente.

Método dielétrico/ capacitivo

O método dielétrico/capacitivo (ver Fig. 2.15) é um método comum para determinar o teor em água em sítio, e a norma correspondente é a [EN 13183-3 \(2002\)](#). A madeira muda as suas propriedades dielétricas em proporção com o seu teor em água. Por conseguinte, através de um condensador (aparelho) colocado na face da madeira que funciona como dielétrico, é possível medir apenas as variações do teor em água perto da superfície (<35 mm), visto que não existe penetração na madeira dos metros. Por isso não é possível proceder à medição de gradientes de humidade. Este método demonstra uma precisão aceitável para o teor em água da madeira de 2% acima do ponto de saturação das fibras, embora a temperatura afete consideravelmente as propriedades dielétricas da madeira.

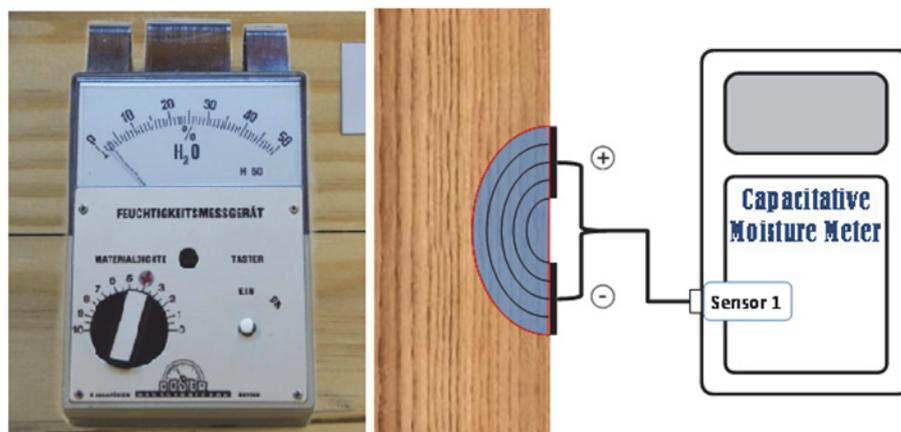


Figura 2.15: Aparelho comercial disponível usando o método capacitivo (esquerda), e esquema das áreas medidas por este método (direita), ([Dietsch et al., 2014](#)).

Método resistivo

O método mais comum para determinar o teor em água em sito é o método resistivo (ver Fig. 2.16), e a norma correspondente é a [NP EN 13183-2 \(2012\)](#). Em prática, a medição do teor em água é realizada por meio de um medidor de humidade manual, que contém dois elétrodos embutidos na madeira ou ligados à superfície com uma distância usualmente de 20 mm entre eles que medem a resistência da corrente elétrica entre eles, que é influenciada pelo teor em água e pela temperatura. Este método permite medir gradientes de humidade, pela leitura do teor em água a várias profundidades (por ex. 10, 30 e 50 mm). Isto consegue-se por isolar os elétrodos com o isolante-Teflon, por forma a medir o teor em água claramente em profundidades definidas da secção transversal. O método apresenta uma precisão aceitável de 1% para teores em água entre 6% e o ponto de saturação das fibras (28%-30%). Acima do PSF, a precisão diminui consideravelmente. Abaixo dos 6% a resistência elétrica alcança valores muito elevados que são desafiantes de medir. Outro fator que influencia a resistência elétrica da madeira é a temperatura do material. A resistência diminui com o aumento da temperatura (ver Fig. 2.17a). As leituras da humidade podem também ser afetadas pela espécie e direção da medição (perpendicular ou paralela às fibras). No caso de a madeira apresentar sais, terpenos, óleos e produtos preservativos, o método de medição da resistência não é adequado e deveria ser substituído pelo método da destilação.

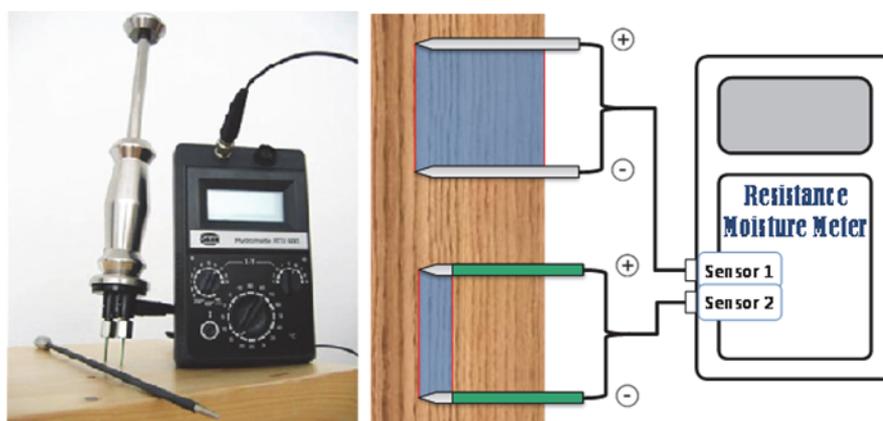


Figura 2.16: Aparelho comercial disponível usando o método resistivo (esquerda), e esquema de áreas medidas usando elétrodos isolados e não isolados (direita), ([Dietsch et al., 2014](#)).

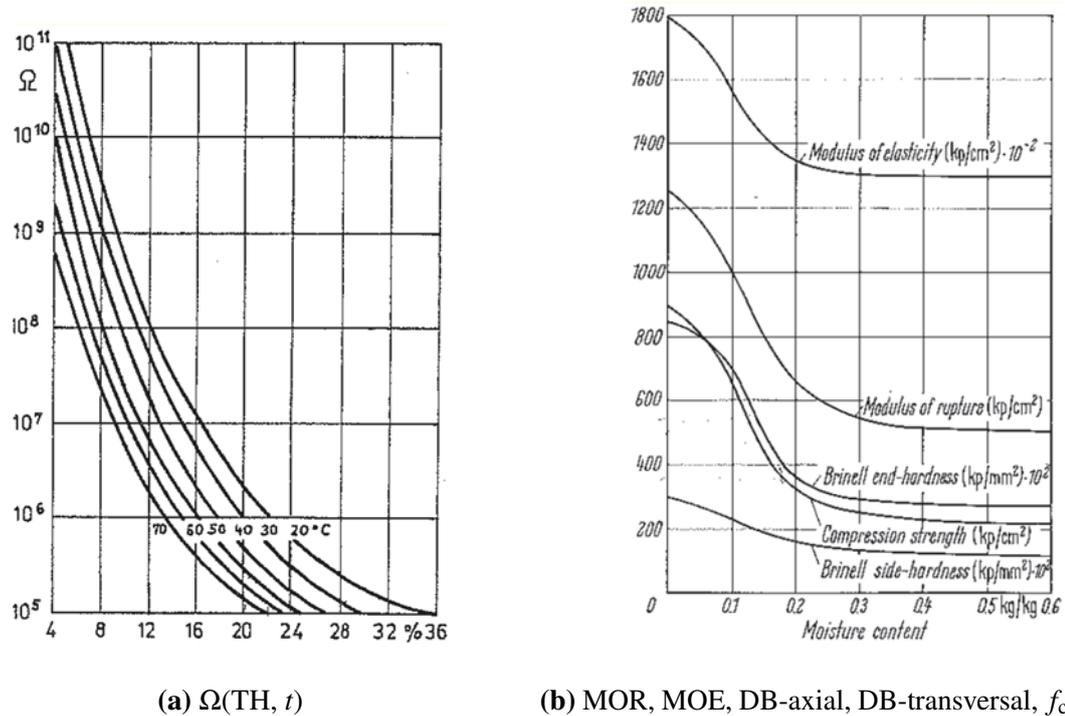


Figura 2.17: Influência do teor em água da madeira nas suas propriedades.

2.6.2 Temperatura, humidade relativa e teor em água a longo prazo

Escolha do método de medição e verificação dos dados medidos

O método escolhido por Dietsch et al. (2012) para a realização das medições do teor em água da madeira a longo prazo foi o método resistivo, uma vez que apresenta ser um método confiável e de ampla aplicação, permitindo realizar medições não destrutivas dos gradientes de humidade ao longo da secção transversal, através da possibilidade da medição do teor em água numa localização específica por meio de eléctrodos embutidos na madeira e revestido por um isolante de acordo com a profundidade a ser avaliada. No âmbito de um projeto de investigação levado a cabo por Dietsch et al. (2012), foram comparadas as medições do teor em água contínuas e discretas em dependência da temperatura e da humidade relativa em provetes por meio de vários aparelhos de medição que usam o método resistivo, com o valor real do teor em água determinado pelo método da secagem. Concluiu-se que não existe diferenças significativas nos resultados obtidos entre dois sistemas de medição (escolhido e de referência), mesmo quando estes usam diferentes tipos de eléctrodos. Também se verificou que no âmbito do intervalo dos teores em água medidos durante este projeto de investigação ($u_{\max} = 19\%$), existiu uma boa concordância para o intervalo de 12-18%. Foi obtido um desvio máximo absoluto de 1,3% para provetes secos, pelo que ambos os medidores de humidade (escolhido e de referência) tendem a subestimar o teor em água real para os intervalos abaixo. Teria de ser necessário desenvolver

um sistema de medição para cobrir os teores em água em baixos intervalos, que implicaria a medição de altas resistências elétricas (por ex. 6% de TH em “espruce” $\cong [10]^{12}\Omega$).

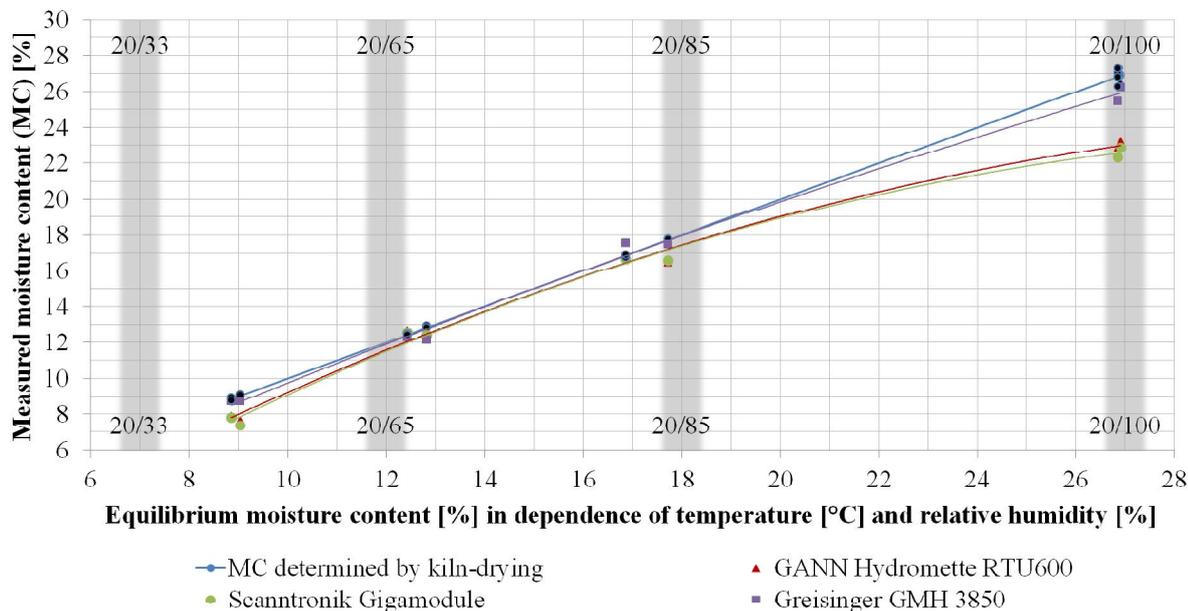


Figura 2.18: Resultados dos testes laboratoriais para verificar os resultados obtidos por métodos escolhidos para medições a longo prazo (métodos resistivos – Scantronik Gigamodule), (Dietsch et al., 2012).

Instalação do equipamento de medição, leitura e processamento dos dados

O equipamento de medição do teor em água, humidade relativa e temperatura, é realizado através do equipamento representado na Fig. 2.19. A medição do teor em água da madeira é realizada por meio de pares de elétrodos com diferentes comprimentos, que são embutidos na madeira a diferentes profundidades com auxílio a uma pré-perfuração e revestidos por um isolante “Teflon” para se realizar medições a profundidades claramente definidas. A cabeça dos elétrodos também é revestida para evitar condensações e posteriores erros de medição. Estes pares de elétrodos estão ligados a um dos canais do medidor de humidade por ligações comuns de cabos protegidos. As medições são geradas ao longo do tempo, e posteriormente transmitidas para um registador de dados. Os dados climáticos são obtidos por meio de um segundo registador de dados, em combinação com um sensor que mede a humidade relativa e temperatura do ar. Este segundo registador de dados permite também medir a temperatura da superfície do material, sendo assim possível proceder a uma compensação do teor em água devido à influência da temperatura.

Após a realização das medições de um determinado período de tempo, é necessário um programa capaz de ler a grande quantidade de dados armazenados, e que seja capaz de proceder à sua representação gráfica dos dados em diferentes gráficos, como por exemplo o Excel. Para isso é necessário converter os dados brutos (resistências) em valores de teor em água, e proceder a

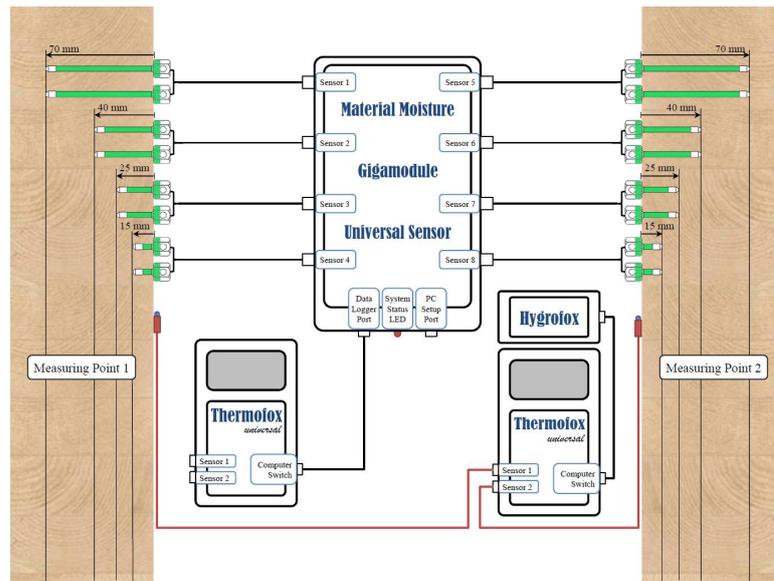


Figura 2.19: Representação esquemática do equipamento de medição, (Dietsch et al., 2012).

compensações do mesmo para ter em consideração a influência da temperatura do material. Visto que a medição da temperatura é apenas feita na superfície do material, será necessário melhorar os equipamentos para que se possa proceder à medição da temperatura a diferentes profundidades da secção transversal. Essas medições também devem ser usadas como aproximação do cálculo da temperatura a diferentes profundidades com base em medições na superfície. A modificação do teor em água também pode ser realizado tendo em consideração a diferença obtida pelo método de secagem, observado em laboratório. As medições da humidade relativa e da temperatura são usadas para determinar o teor em água de equilíbrio que prevalece na secção transversal perto das superfícies utilizando uma média móvel. É necessário ter em consideração, nos cálculos do teor em água, possíveis influências dos tratamentos usados, caso existam.

Processamento e representação dos resultados

As medições dos dados climáticos e do teor em água da madeira a longo prazo permitem proceder a uma análise destes dados armazenados por meio de um programa especializado. O programa possibilita a representação dos dados armazenados em curvas (séries em função do tempo) das variáveis medidas (teor em água para diferentes profundidades da secção transversal, temperatura, humidade relativa e humidade absoluta) ao longo de um determinado período de tempo. Existem 3 representações importantes que nos permitem entender como estas variáveis se relacionam entre si e com o tempo. A representação de curvas (séries temporais) de humidade relativa, humidade absoluta e temperatura medida numa determinada localização (ponto de medição) ao longo do tempo, é dada pela Fig. 2.20.

Por meio desta representação observa-se que a temperatura é inversamente proporcional à

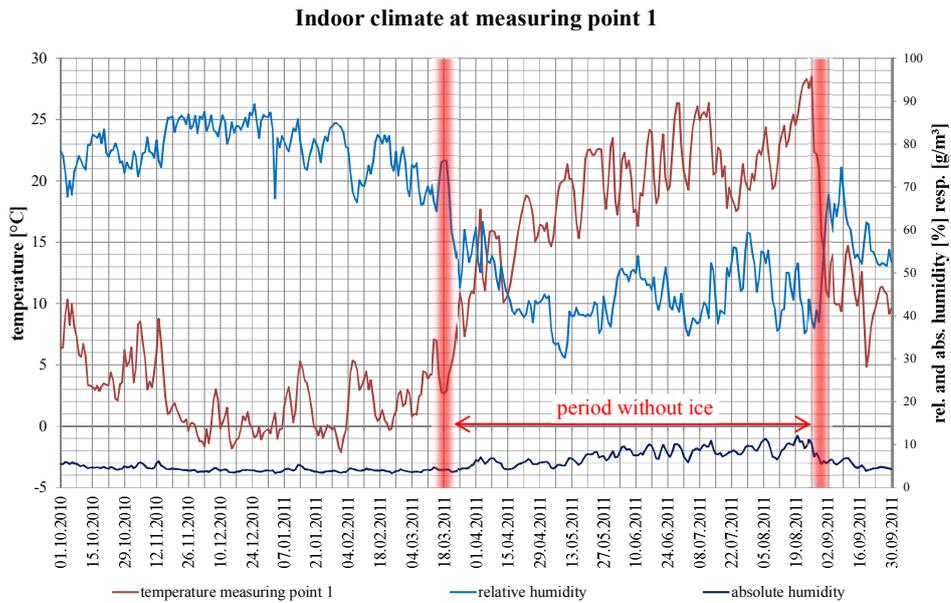


Figura 2.20: Variação da humidade relativa e absoluta e a temperatura referentes ao período de medição, exemplo dado do Ice-Rink em Buchloe,(Dietsch et al., 2012).

humidade relativa e que quando as curvas se interseam dividem o ano em dois períodos, em que um deles para este caso analisado, é o período sem gelo, quando as temperaturas aumentam, a humidade relativa diminui, pelo fator de o ar ser capaz de conter mais humidade absoluta. Outra representação do mesmo tipo, e feita para o teor em água para várias profundidades da secção transversal, e o teor em água de equilíbrio à superfície, ver Fig. 2.21.

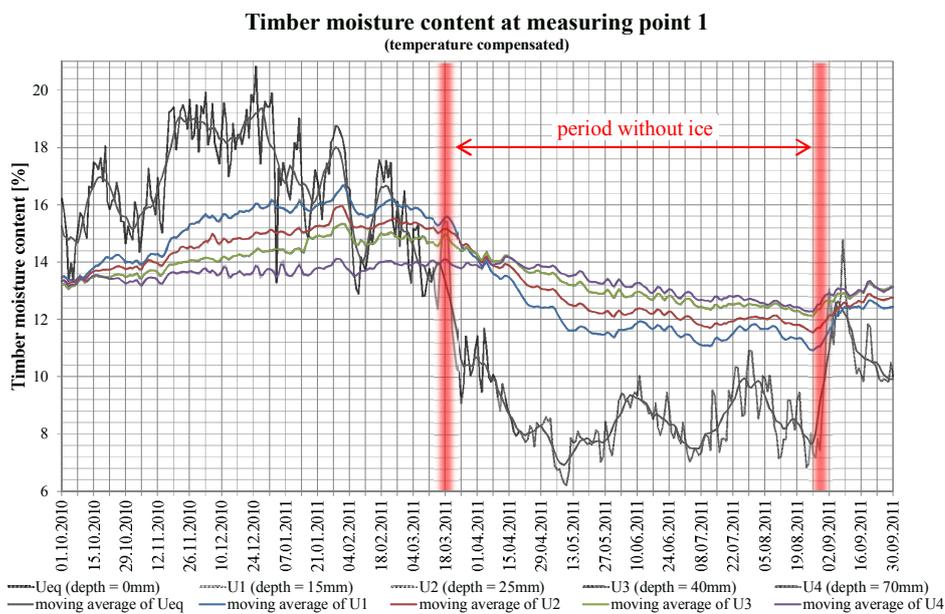


Figura 2.21: Variação do teor em água a diferentes profundidades da secção transversal ao longo do período medido, exemplo dado para o Ice-Rink em Buchloe,(Dietsch et al., 2012).

Sabe-se que a madeira exposta a um determinado ambiente com uma determinada humidade relativa e temperatura, depois de um determinado período de tempo, tende para um estado de equilíbrio, teor em água de equilíbrio. No entanto, a madeira não atinge esse estado de forma uniforme ao longo da secção transversal, mas sim inicialmente nas camadas exteriores e conseqüentemente uma posterior adaptação das camadas interiores com o tempo. Através deste gráfico, observa-se que o teor em água da madeira ao longo da profundidade da secção não é igual ao longo do ano. Observa-se também que a madeira para o correspondente período sem gelo, entra numa fase de redução do seu teor em água, logo em fase de secagem, e no restante período, entra numa fase de aumento do teor em água, fase de humedecimento.

Adicionalmente, é possível proceder à representação gráfica do teor em água ao longo da largura da secção transversal, permitindo criar curvas envolventes de máximos e mínimos de teores em água, bem como curvas de mínimos e máximos dos gradientes de teor em água, derivados do gráfico anterior utilizando a expressão $grad(u) = du/dx$, ver Fig. 2.22.

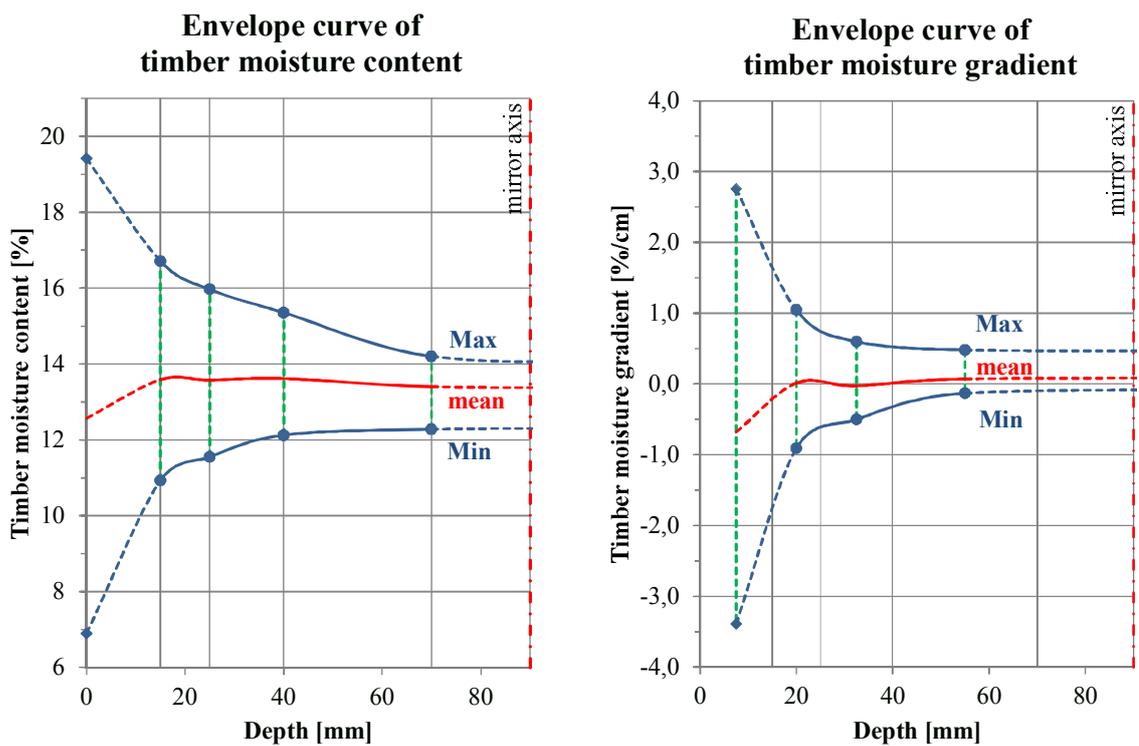


Figura 2.22: Curva envolvente do teor em água da madeira (esquerda) e dos gradientes de teor em água da madeira (direita) para diferentes profundidades da secção transversal, exemplo dado para o Ice-Rink em Buchloe,(Dietsch et al., 2012).

As Figs. 2.21 e 2.22 confirmam o atraso da adaptação do teor em água com o aumento da profundidade.

2.6.3 Medições de curto e longo prazo

Avaliações de danos de estruturas de grande vão, mostram que os tipos de danos que mais prevalecem são fendas pronunciadas em linhas de colagem das lamelas, e nas próprias lamelas dos elementos estruturais de madeira. Por meio de uma avaliação de tipos e causas de danos de 245 estruturas de madeira de grande vão, numa cadeia de estruturas de madeira, foi possível concluir que metade dos danos é devida a baixos ou altos teores em água ou a severas variações do mesmo. Baixos ou altos teores em água ou mudanças severas do mesmo podem ser explicados por condições locais (infiltrações na cobertura), mas na maioria dos casos, podem ser explicados pelas condições climáticas, em função do tipo de construção e do seu uso, e das variações sazonais do clima interior da construção. Durante a avaliação destes edifícios são recolhidas informações de teores em água, de condições climáticas (humidade relativa e temperatura). No entanto, todas as medições avaliadas representam uma medição pontual (curto prazo) na data da avaliação, por isso, elas não nos dão indicações do teor em água da madeira na abertura do edifício (início de operação) nem das variações sazonais do mesmo. Para se obter informações da sequência e magnitude das variações sazonais, é necessário realizar medições a longo prazo de dados climáticos (temperatura e humidade relativa) e do teor em água da madeira. As medições a longo prazo do teor em água para diferentes profundidades da secção transversal assumem relevante interesse, uma vez que permite retirar conclusões da magnitude e da velocidade dos ajustamentos do teor em água e sua distribuição em função da mudança das condições climáticas. As medições a curto e longo prazo do teor em água da madeira, temperatura e da humidade relativa devem ser efetuadas de modo a que se permitam comparações entre estruturas de um determinado tipo (sistema estrutural), com diferentes tipos de uso, se apresentam climatização interior (sistemas de aquecimento), e envolvente do edifício, tratamento das superfícies, posição dos pontos de medição, dimensões do elemento e condições ambientais. O objetivo é então, a obtenção de dados, e permitir uma visão global sobre as condições climáticas e resultados de teor em água da madeira que podem ocorrer em edifícios de um determinado tipo de diferentes usos. Assim, consegue-se estabelecer referências de valores realistas com respeito a potenciais danos (fendas), bem como, possíveis teores em água que surjam em determinados elementos estruturais de madeira que possam diminuir a durabilidade do material ou crescimentos de fungos.

Resultados e observações de medições a curto prazo

A Fig. 2.23 contem teores em água da madeira e condições climáticas para todas as estruturas para que tal informação foi obtida durante a avaliação das 245 avaliações de estrutura de madeira de grande vão. As medições do teor em água da madeira para as construções da classe de serviço 1 mostram pronunciadas variações a volta da média de $u = 10.7\%$, bem como as medições

correspondentes de temperatura e de humidade relativa apresentam uma pronunciada variação. Por outro lado, elementos estruturais de classe de serviço 2 mostram variações pequenas ($u = 14.9\%$). À semelhança da classe de serviço 1, a classe de serviço 3 apresenta grandes variações do teor em água da madeira ($u_{\text{mean}} = 22.4\%$), e das condições climáticas do edifício. No entanto, as grandes variações do teor em água da madeira, temperatura e da humidade relativa para as construções da classe de serviço 1 podem particularmente ser explicadas devido à dependência da diversidade de tipos de uso desses edifícios. Por isso importa, de certa forma proceder particularmente à diferenciação do teor em água da madeira em dependência do uso dos edifícios, ver Fig. 2.24. Por meio da análise da Fig. 2.24, pode-se concluir que o teor em água da madeira em edifícios fechados e aquecidos são notáveis e frequentemente baixos, inferior a 10%, e correspondem a 47% das estruturas avaliadas, com elementos estruturais abaixo dos 10% de teor em água. É de notar, que os valores dos teores em água médios determinados para sótãos ($u_{\text{mean}} = 16,1\%$), Equitação ($u_{\text{mean}} = 18,2\%$), correspondem à caracterização da classe de serviço 2, e para patinagem no gelo ($u_{\text{mean}} = 21,6\%$), à classe de serviço 3, sendo que Pontes, apresentam classe de serviço 3 com ($u_{\text{mean}} = 26,7\%$).

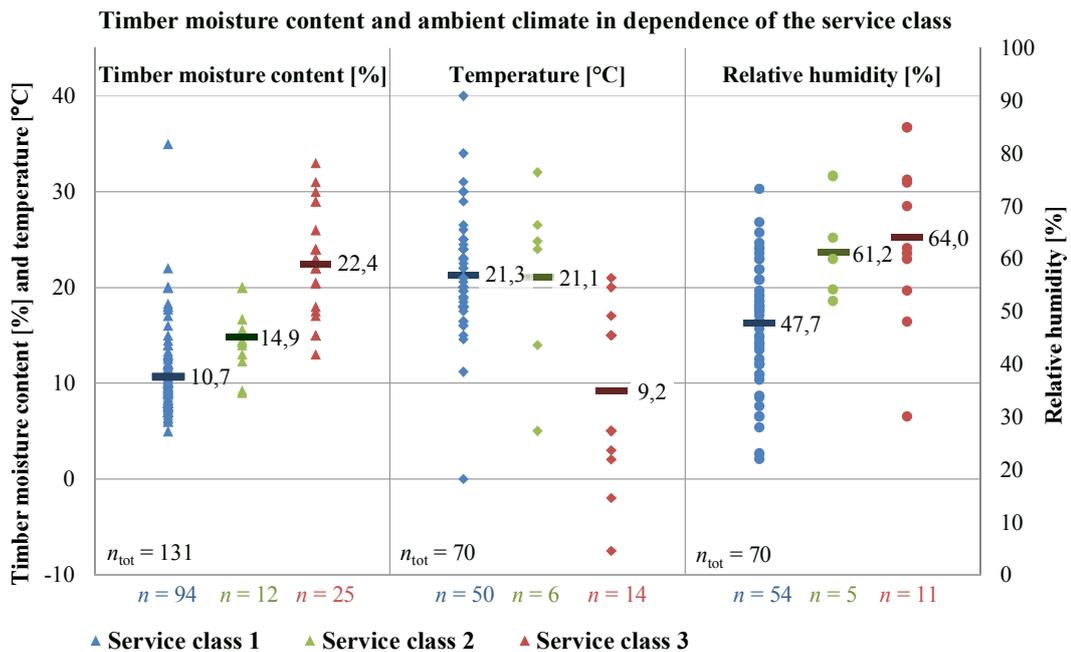


Figura 2.23: Teor em água da madeira e clima ambiente em dependência da classe de serviço, da avaliação de 245 avaliações de estruturas de madeira de grande vão, (retirado de Dietsch et al., 2012).

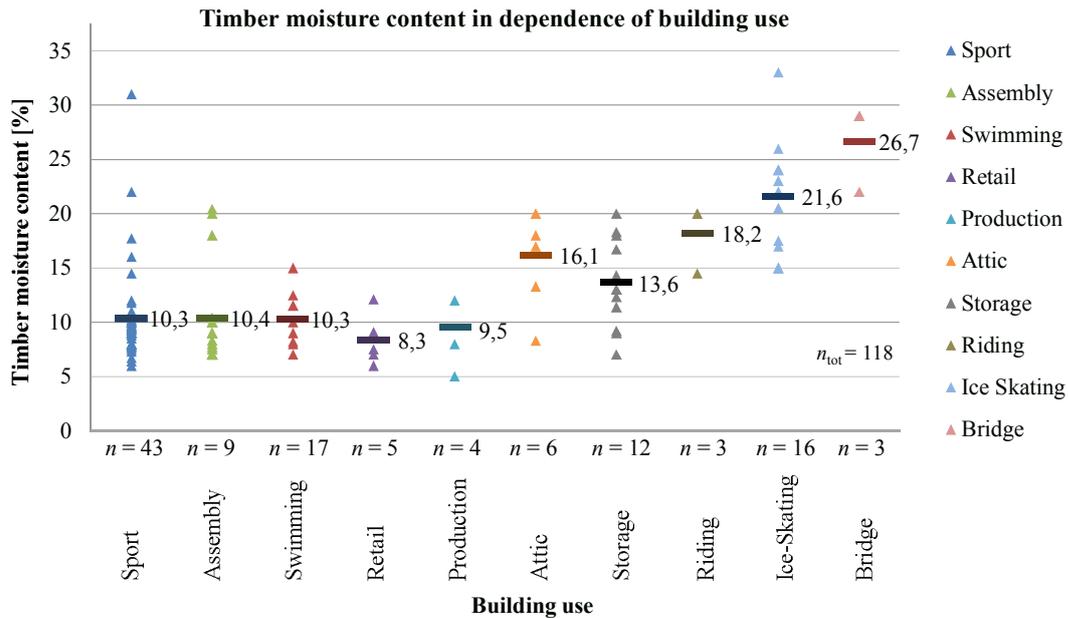


Figura 2.24: Teores em água da madeira em dependência do tipo de uso do edifício, de uma avaliação de 245 avaliações de estruturas de madeira de grande vão, (Dietsch et al., 2012).

Resultados e observações de medições a longo prazo

Para que se possa comparar os resultados de medições a longo prazo do teor em água da madeira, bem como das condições climáticas, de edifícios com diferentes tipos de uso, é necessário caracterizar parâmetros de comparação. Estes parâmetros iram indicar o grande intervalo de possíveis condições climáticas em edifícios com estruturas de madeira, e também da grande variedade de magnitudes e de velocidades de ajustamento do teor em água da madeira e sua distribuição em função da mudança das condições climáticas. Os parâmetros mais importantes são, (ver figura 2.25):

- Valores médios de humidade relativa e temperatura (baseados em valores médios diários);
- Valor médio do teor em água (média ao longo da profundidade);
- Máxima amplitude para todos os parâmetros (diferença entre os valores máximos e mínimos, medidos ao longo do período de medição);
- Máximo gradiente entre duas profundidades;
- Máxima diferença do teor em água da madeira entre dois pontos de medição (ex. 15 mm e 70mm).

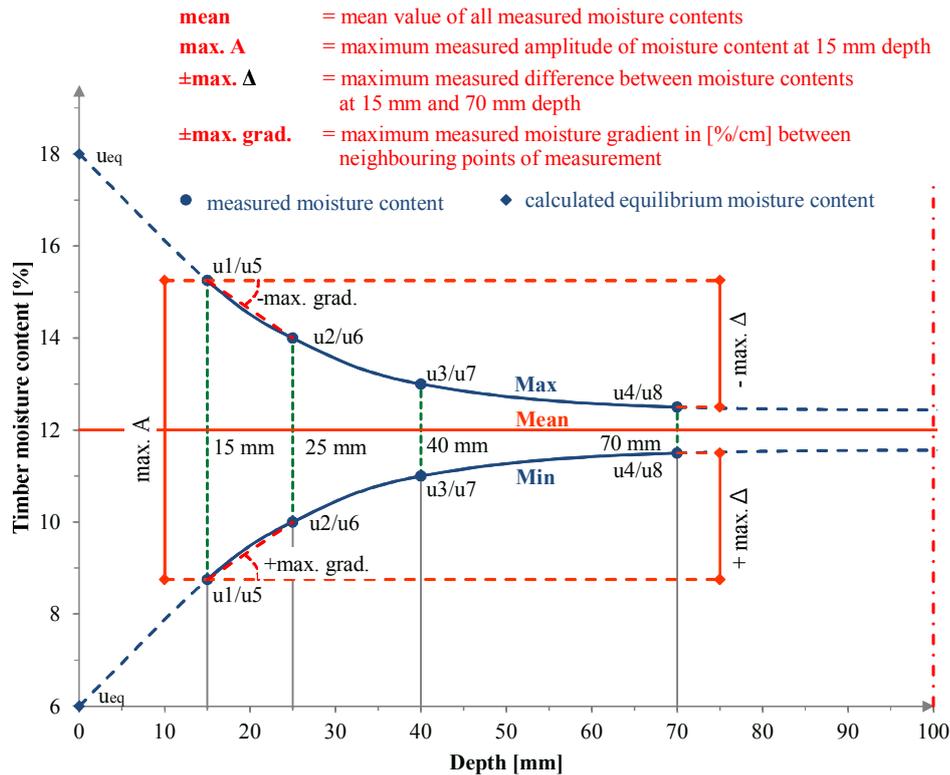


Figura 2.25: Esboço da curva envolvente dos teores em água na secção transversal de madeira, incluindo a anotação de parâmetros de análise, (Dietsch et al., 2012).

Após a comparação dos resultados dos tipos individuais de uso de edifícios de estruturas de madeira, confirmou-se o grande intervalo de possíveis condições climáticas. A média dos teores em água, avaliados para os diferentes tipos de uso encontrou-se entre 4,4% e 17,1%. No que concerne a identificar o tipo de uso mais suscetível ao aparecimento de fendas, importa identificar quais são os mais desfavoráveis, isto é, os tipos de uso que apresentam gradientes de humidade elevado, pelo que climas que provoquem gradientes elevados, provocam tensões internas maiores, aumentando a probabilidade do aparecimento de fendas que são desfavoráveis à capacidade resistente dos elementos estruturais bem como à sua durabilidade.

Os edifícios isolados e aquecidos apresentam gradientes de humidade mais baixos que os não isolados. Os edifícios abertos, com forte influência da variação natural do clima exterior apresentam gradientes de humidade elevados.

Piscinas interiores

Piscinas interiores, apresentam condições climáticas constantes, e por isso apresenta pequenas variações do teor em água da madeira e conseqüentemente pequenos gradientes. Nas zonas de transição com o ar exterior, devido à diminuição da temperatura, resulta numa maior flutuação da humidade relativa e do teor em água da madeira, e por isso, em maiores gradientes de humidade.

Ginásios

Os ginásios, também apresentam condições climáticas constantes, por serem aquecidos, com temperatura muito constante, resultando em teores em água baixos e pouco variáveis, e por isso apresentam gradientes de humidade muito baixos. A medição a longo prazo em elementos de estruturas de cobertura situados por de baixo de clarabóias, são uma exceção, mesmo em edifícios isolados e aquecidos. Sob clarabóias resultam altas temperaturas e baixos teores em água relativa, fazendo com que estes elementos fiquem muito secos, com teores em água muito baixos.



(a) Pista de Gelo

(b) Ginásio

Figura 2.26: Condições de humidade para diferentes tipos de uso de edifícios, (adaptado de [Dietsch, 2015](#)).

Pistas de gelo

Pistas de gelo, com climas fechados e sem ar condicionado são marcados por uma clara mudança entre o inverno e o verão (períodos sem gelo).

Pistas de patinagem no gelo, apresentaram teores em água altos e variados. Em elementos de edifícios com ar condicionado e tratamento de superfície este efeito foi amortecido, levando a menores gradientes de humidade. Os elementos acima da zona do gelo apresentaram teores em água superiores às restantes áreas. As faces dos elementos viradas para o gelo tendem a arrefecer devido à troca de radiação, levando a condensações e ao surgimento de uma camada de gelo, resultando no aumento do teor em água.

Instalações de produção e vendas

Instalações de produção e vendas com o mesmo tipo de uso, não isolados e parcialmente abertos mas com sistema de aquecimento que faz com que a influência do clima exterior na temperatura e na humidade relativa interior seja amortecida, apresentam gradientes de humidade constantes. Medições em objetos em zonas de processamento de ferragem de metal, resultou em altas temperaturas temporárias abaixo da cobertura, em conjunto com baixas humidades relativas, resultou teores em água bastantes baixos. Após a cessação dos

trabalhos irá ocorrer o humedecimento destes elementos e deste modo surgiram gradientes de humidade.

Pistas de equitação

Pistas de equitação, não isoladas e não aquecidas, são fortemente influenciadas pelo clima exterior, e por isso, apresentam climas marcados pelas variações sazonais, que levaram a altas variações da temperatura e de humidade relativa. Por conseguinte, este tipo de edifícios apresentam teores em água da madeira muito elevados, e devido a natureza das variações sazonais apresentou altos gradientes de humidade.

As mesmas condições foram encontradas em **pavilhões agrícola & pecuária**, não isolados e aquecidos. Tanto nos **pavilhões agrícola & pecuária como nas pistas de equitação** mencionados anteriormente, particularmente nos edifícios abertos, devido ao ar frio nos meses de inverno e o aumento da humidade relativa do ar, resultaram em altos teores em água da madeira e condensações, no entanto este efeito foi aumentado nas pistas de equitação por introdução de vapor de água de borrifadores para diminuir o pó da pista.

Armazéns

Como último exemplo, os armazéns, abertos, sem isolamento e sem aquecimento, são extremamente influenciados pelo clima exterior. Por isso, apresentam teores em água médios bastante elevados e suas variações foram das mais elevadas de todos os tipos de uso mencionados. O uso do armazém para armazenamento de plantas no inverno foi um aspeto bastante desfavorável, pelo fator da introdução de humidade adicional proveniente das plantas que veio aumentar a humidade relativa e o surgimento de condensações. Para agravar mais a situação, estes armazéns tinham clarabóias, solo os elementos estruturais de madeira abaixo destas, iriam estar diretamente expostos à luz solar, logo estariam expostos a períodos de extrema secagem e de extremo humedecimento, consequentemente, foram os elementos que apresentaram maior amplitude do teor em água e o maior gradiente de humidade de todos os objetos avaliados.

De acordo com as construções descritas anteriormente e das respetivas condições climáticas que estas apresentam em função do seu tipo de uso, percebe-se que as mudanças das condições climáticas dos edifícios são desfavoráveis, na medida em que, se refletem por mudanças distintas do teor em água da madeira e consequentes gradientes de humidade que surgem ao longo da secção transversal como resposta a adaptação gradual da madeira a essas mudanças das condições climáticas. Pelo que, é necessário ter em consideração intervenções temporárias ou mudanças de uso dos edifícios, para que se possam tomar medidas durante tais intervenções com o objetivo de desacelerar a mudança das condições climáticas.

Em suma, em *edifícios fechados, com isolamento e aquecidos* (p.e. espaços de convívio, espaços de trabalho, ginásios, produção e instalações de vendas), caracterizados por climas constantes

mas secos, a mais severa mudança do teor em água da madeira irá maioritariamente ocorrer durante o primeiro inverno de operação, após montagem e enclausuramento do edifício. Nestes casos, tratamentos superficiais, por exemplo, em forma de produtos que amortecem a adsorção e a desadsorção nos primeiros anos de operação do edifício poderia ser uma forma de contornar a secagem brusca dos elementos recentemente instalados. Fortes mas mudanças periódicas do teor em água pode ocorrer em *edifícios com mudanças sazonais de uso* (p.e. pistas de gelo) ou em *edifícios com uma considerável influência do clima exterior no clima interior* (p.e. edifícios não-aquecidos ou não isolados tais como pistas de equitação, estábulos e armazéns). Para este grupo, a aplicação de isolamento no telhado pode ajudar a amortecer as mudanças fortes no clima interior e correspondente os gradientes de teor em água da madeira. No caso de *intervenções temporárias ou mudanças de uso*, deve-se tomar cuidado durante tais intervenções para realizar um amortecimento e uma mudança controlada do teor em água (p.e. em forma de bacias de evaporação ou tratamentos superficiais) (Dietsch, 2014).

Diminuição dos gradientes de humidade

As mudanças rápidas ou significantes do clima interior de um edifício podem ser devido ao seu tipo de uso. Constatou-se que essas mudanças são intensificadas em zonas pontuais tais como sob claraboias e vizinhanças de sistemas de aquecimento. Observou-se também, que para edifícios com climas constantes e secos, a maior mudança do mesmo irá ocorrer maioritariamente no primeiro inverno de operação, depois da montagem e fecho do edifício. Tendo em consideração estes fatores, é importante tomar medidas, para que se possa desacelerar as mudanças internas do clima, e amortecer a absorção da humidade, com o objetivo de evitar secagens ou humedecimentos rápidos ou o aparecimento de gradientes elevados que possam induzir tensões internas que resultem no aparecimento de fendas.

As três medidas mais relevantes para que se reduzam os gradientes de humidade da madeira são:

- Controlo artificial do clima interior;
- Tratamentos superficiais;
- Coberturas de proteção.

O controlo artificial do clima interior pode ser realizado com recurso a sistemas de aquecimento ou sistemas de humidificação do ar. O sistema de aquecimento tem como objetivo desacelerar as mudanças internas do clima, que será ajustado para que não ocorram reduções demasiado rápidas e fortes da humidade relativa. O sistema artificial de humidificação do ar, permite amortecer a velocidade de secagem dos elementos estruturais. Os tratamentos superficiais, por osmose ou pinturas, em forma de produtos que amortecem a absorção da humidade, evitam a secagem rápida de elementos recém-instalados em climas constantes e secos, que ocorrem principalmente nos primeiros anos de vida de operação das construções. As coberturas de proteção em forma de

painéis de materiais, são ideais em áreas com fortes mudanças periódicas do teor em água.

2.7 Tensões e fendas induzidas pela humidade (MiS)

Devido ao comportamento higroscópico e à retratilidade apresentada pela madeira para teores em água abaixo do ponto de saturação das fibras (Fig. 2.27), e devido às consequências que tal comportamento poderá proporcionar (i.e. gradientes de humidade e consequentes tensões internas), quando a madeira é exposta às variações das condições higrotérmicas circundantes do ambiente, poderão surgir fendas, com impacto negativo na capacidade resistente dos elementos estruturais, ou mesmo que levem ao colapso destes mesmo elementos.

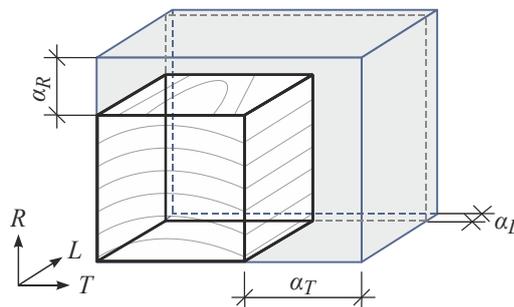


Figura 2.27: Retração e inchamento diferencial dependendo da direção do material (COST Action FP1101, 2014, p. 17).

As fendas, em peças de madeira, ocorrem principalmente pouco tempo após a montagem destas em sítio (semanas ou meses), devido a um aumento ou uma diminuição gradual do teor em água, ou por estas apresentarem um estado de equilíbrio durante as etapas de fabrico, armazenamento e transporte, distinto daquele que estas iriam atingir em serviço. Todavia, devem-se tomar medidas que visem a redução inicial do teor em água nos elementos de madeira, para prevenir a ocorrência de processos de adaptação bruscos destes elementos às novas condições de equilíbrio, que possam resultar em elevados gradientes de humidade e seus inconvenientes (i.e. variações dimensionais da secção transversal, tensões internas, surgimento de fendas). Neste contexto o correto condicionamento, desde o fabrico até ao fecho da obra, assume especial importância na redução deste tipo de fendas, devendo estes nestas fases apresentar um teor em água de equilíbrio igual ou próximo ao que atingiriam em serviço.

No entanto, os elementos de MLC têm sido produzidos com um teor em água de 8 a 15% de acordo com EN 386 e irão ser posteriormente instalados com este teor em água. Não obstante, o teor em água em serviço pode ser muito maior, dependendo do local onde estes elementos irão ser instalados, o que por si, é um problema face ao mencionado anteriormente.

Os elementos em pontes em condições climáticas europeias normais apresentam um teor em água cerca de 15% a 20%, (Scharmacher & Müller, 2012). O teor em água para a classe de

serviço 2, por exemplo, permite apenas uma variação de 8% no teor em água (EN 1995:1-1, 2004).

Tem-se constatado que, um aumento gradual do teor em água de apenas 1% pode teoricamente, levar a que a resistência perpendicular às fibras seja atingida (considerando as propriedades características atribuídas à classe GL 24h).

2.7.1 Medição das tensões induzidas pela humidade

O teor em água dos elementos de MLC em serviço varia com as variações das condições higrotérmicas do ambiente circundante. Pelo fato do processo de transporte da humidade na madeira ser relativamente lento em elementos de grandes secções, estes tendem a ser mais propícios à ocorrência de grandes gradientes de humidade, por nestes ser mais difícil a perda da humidade interior, que por consequência levam à ocorrência de tensões internas referidas como tensões induzidas pela humidade. A madeira de uma camada da secção transversal fica restringida de retrair ou expandir de acordo com o seu teor em água apresentado, por ser restringida pela madeira das camadas adjacentes que exibem um teor em água diferente. Quanto maior for a diferença de teor em água entre ambas as camadas adjacentes, maior será o gradiente entre as camadas, e maiores serão as restrições aos seus movimentos de retração ao expansão, e por consequência, maiores serão as tensões resultantes dessas restrições.

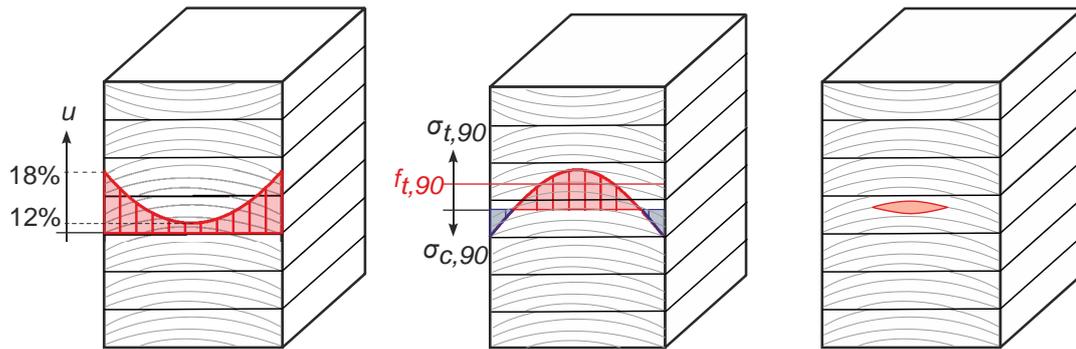
No caso de um humedecimento, por exemplo, o teor em água aumenta nas partes externas da secção transversal, dando origem à expansão da madeira. No entanto, os movimentos de expansão são restringidos pelas partes internas da secção transversal (que têm um teor em água inferior). Em consequência dessa restrição, surgem tensões de compressão nas partes exteriores, enquanto que no centro da secção transversal surgem tensões de tração, ver Fig. 2.28.

Num caso de secagem, acontece precisamente o oposto, as partes exteriores exibem uma diminuição do teor em água, dando origem à retração da madeira. Devido às restrições internas, tensões de tração surgem nas partes externas, e tensões de compressão no centro, ver Fig. 2.29.

As tensões de compressão e tração no interior da secção transversal são auto-equilibrantes, perante a ausência de tensões externas. As tensões induzidas pela humidade podem ser de tração perpendiculares às fibras e assim podem causar fendas no elemento de MLC.

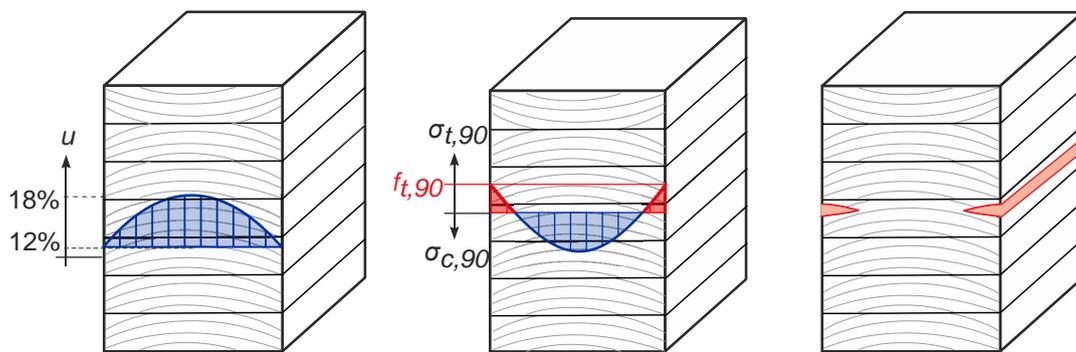
Devido à baixa resistência da madeira segundo esta direção, essas fendas podem causar a rotura global do elemento. De acordo com a distribuição de tensões no caso de um humedecimento, essas fendas podem começar no centro da viga (Fig. 2.28), enquanto que num caso de secagem podem surgir e começar na superfície (Fig. 2.29).

As tensões induzidas pela humidade podem ser avaliadas por meio de experiências ou simulações numéricas. [Angst-Nicollier \(2012\)](#) aborda no tópico 3.3 sobre métodos experimentais para



(a) Teor em água/ após humedecimento (b) Tensões transversais resultantes (c) Delaminação/ fendas de humedecimento (internas)

Figura 2.28: Humedecimento ou intumescimento - adsorção, en: sorption (B. Franke et al., 2013, Fig. 1)



(a) Teor em água/ após secagem (b) Tensões transversais resultantes (c) Delaminação/ fendas de secagem (superficiais)

Figura 2.29: Secagem - Desadsorção, en: desorption (B. Franke et al., 2013, Fig. 2)

medição das tensões induzidas pela humidade, sendo o método das fatias o geralmente usado para efeito (Angst & Malo, 2012, Jönsson, 2004, Svensson & Toratti, 2002). Um caso típico na prática é uma viga longa de MLC (com $L \gg W$ e H) que é coberta na face superior. Como as variações climáticas são primeiramente induzidas nas faces laterais (p.ex. chuva, sol), as tensões induzidas pela humidade são neste caso assumidas como resultado de um transporte de humidade uni-direcional perpendicular às fibras.

No tópico 3.5, Angst-Nicollier, apresenta o modelo unidirecional teórico-analítico para cálculo das tensões induzidas pela humidade, no qual o modelo básico do material geralmente utilizado é baseado numa formulação de somatório de taxas de extensões, embora recentemente tenham sido aplicados modelos tridimensionais (p. ex. Fortino et al., 2009, Gereke & Niemz, 2010, Ormarsson et al., 1998). Neste mesmo tópico ainda se aborda sobre o modelo de transporte de humidade que é baseado na segunda Lei de Fick's da difusão de massa.

Por meio de experiências, apenas se podem obter tensões médias (médias ao longo da altura da secção transversal), e a precisão das tensões obtidas depende da precisão dos parâmetros

medidos. Através de simulações numéricas, por outro lado, é possível também avaliar tensões locais na secção transversal, sendo que neste caso, é possível mostrar através dos diferentes parâmetros estudados, que os resultados calculados e sua precisão são fortemente afetados pela escolha e atribuição dos parâmetros do material e pela configuração geométrica/padrão da secção transversal do provete.

Resultados experimentais e numéricos

Diferentes investigações relativas às tensões induzidas pela humidade em elementos e MLC sob condições realistas climáticas mostraram que se podem desenvolver tensões de tração significativas, que podem claramente exceder a resistência à tração perpendicular às fibras característica da MLC, ver Fig. 2.30. Assim, fendas podem ser induzidas mesmo sem carregamento externo. Além disso, observou-se que as tensões desenvolvidas durante o humedecimento são maiores que as desenvolvidas durante a secagem. Nos tópicos 3.4 e 3.6, são apresentados por [Angst-Nicollier \(2012\)](#), os resultados experimentais e numéricos obtidos e respetivas conclusões, por aplicação destes métodos e modelos. Através dos resultados obtidos da análise numérica, foi possível estudar a influência de certas variáveis, no que concerne às tensões induzidas pela humidade. **As variáveis estudadas foram as seguintes:** *efeito das variações naturais e sazonais do clima, efeito do material e dos parâmetros de modelo, efeito das configurações geométricas da secção transversal, efeito da largura da secção transversal.*

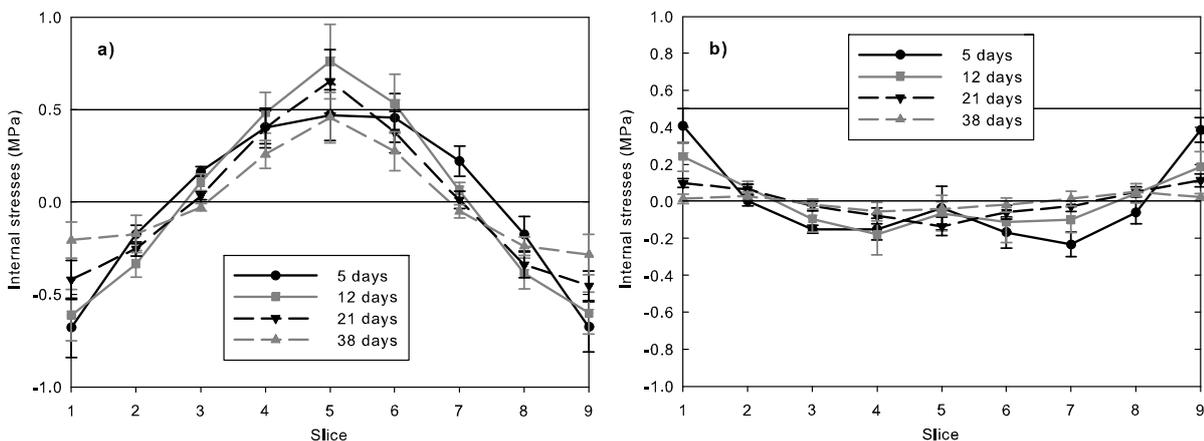


Figura 2.30: Tensões internas durante **a)** humedecimento e **b)** secagem. A linha horizontal (0.5 MPa) representa o valor característico de resistência à tração perpendicular às fibras de acordo com [prEN 14080 \(2011\)](#), ([Angst & Malo, 2012](#), Fig. 8).

2.8 Efeito das variações do teor em água e gradientes em ligações

As mesmas tendências observadas nas propriedades físicas e mecânicas (ver 2.2), devidas às variações do teor em água na madeira, são esperadas também nas ligações, e podem ser constatadas em estudos experimentais em ligações de pequena escala (ver [Rammer \(2001\)](#), [Rammer & Winistorfer \(2001\)](#)). A variação do teor em água e os seus gradientes, tem sido apontados com um dos principais fatores que afetam a capacidade resistente a curto e a longo prazo de elementos de estruturas de madeira e das suas ligações. Os elementos estruturais mais afetados, são as vigas de cobertura, vigas curvas, e elementos carregados transversalmente às fibras, principalmente quando o teor em água é elevado, originando condições propícias à proliferação de fungos e ao conseqüente processo de degradação da madeira. No entanto, tem-se observado que em ligações, mais propriamente as cavilhadas, mesmo naquelas em que não há carregamento direto transversal às fibras, uma certa diminuição da capacidade resistente. Para estes casos, as tensões induzidas pelos gradientes de teor em água, tem sido apontados como sendo a explicação para os resultados obtidos, bem como os movimentos associados de retração e de entumescimento, mais pronunciados na direção tangencial, que podem resultar em fendas de secagem (superficiais) ou de inchamento (internas). A intensidade e a frequência com que estas fendas ocorrem dependem obviamente da ocorrência de tensões internas de tração transversais às fibras provocadas por altos gradientes de teor em água, resultadas da adaptação da madeira às variações sazonais do ambiente circundante, quer exterior ou interior, sendo neste último, o tipo de edifício, o tipo de uso, se é ou não aberto ao exterior, ou se tem sistemas de ar-condicionado ou de aquecimento, aspetos que devem ser diferenciados, quanto ao seu impacto. Para além disto, as características da secção transversal também podem influenciar negativamente na ocorrência, mais ou menos intensa, destas tensões (p.ex. grandes secções, padrão desfavorável das lamelas, presença de medula nas lamelas), ver 2.7.1.

As ligações em elementos estruturais, são geralmente consideradas rotuladas, por terem baixa capacidade de resistir a momentos. Isto deve-se essencialmente à pequena dimensão da zona de ligação que apenas admite um pequeno binário, e como resultado, um modesto momento resistente. Outro fator, é a natureza anisotrópica do material que dificulta a transferências das forças internas, principalmente quando estas estão orientadas segundo a direção transversal às fibras, ou quando os elementos a ligar têm orientações distintas, ver Figs. 2.33a e 2.33b. Normalmente recorre-se a elementos de interposição metálicos, para realizar a ligação entre os elementos, que deve ser sujeita a procedimentos de dimensionamento ([Negrão & Faria, 2009](#), 12.3).

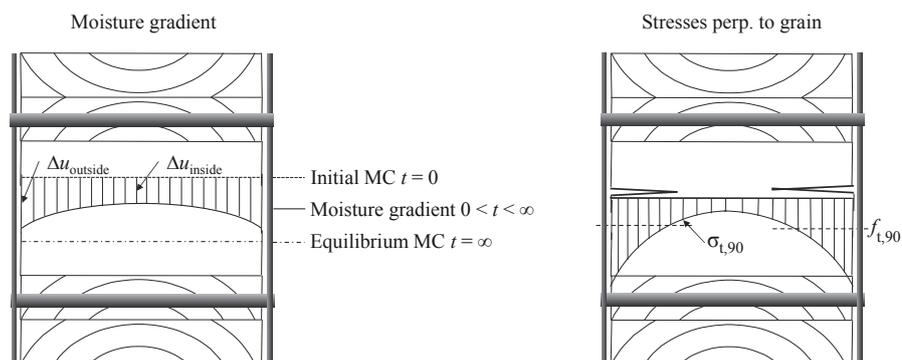


Figura 2.31: Representação do gradiente de teor em água (esq.) e tensões resultantes perpendiculares às fibras no caso de retrações restringidas, devido p.e. às conexões, da viga de madeira (dir.), Dietsch (2014, Fig. 20).



(a) Ligação resistente a momentos.



(b) Ligação de apoio de pilar.

Figura 2.32: Tração transversal às fibras em resultado de restrições à retração da madeira (Cruz, 2012, Fig. 11).

A Fig. 2.32a ilustra uma ligação semi-rígida num nó de pórtico, na qual o momento de continuidade é realizado pelas forças exercidas pelos ligadores contra a madeira envolvente e pelo braço que estas fazem com o centro de rigidez de rotação. Esta é uma ligação realizada sem recurso a chapas de aço, sendo o pilar realizado por dois montantes, um de cada lado da viga central. Já para o caso da ligação das Figs. 2.35 e 2.32b, utiliza-se uma chapa inserida no interior das peças a ligar, ou em alternativa, duas chapas nas faces, resultando, em qualquer dos casos, numa ligação plana. O padrão poligonal ou circular ou em fileiras é reproduzido em ambos os lados da secção de emenda.

Neste tipo de ligações, os movimentos de retração e de inchamento da madeira deixam de ser livres e passam a ser restringidos devido à presença dos elementos de conexão (ex. chapas, cavilhas, parafusos), que suspendem o equilíbrio das tensões internas, tornando-as ainda mais intensas, resultando em fendas largas e profundas na área de ligação, ver Fig. 2.31. Estas fendas podem alterar significativamente a resistência do ligador se se situarem no plano potencial de falha, ou podem ser insignificantes se se situarem fora deste. Em estruturas que foram construídas

com madeira ainda no seu estado verde, é frequente encontrar neste tipo de ligações, este tipo de fendas, muito pelo fato da madeira sofrer o seu processo de secagem em sítio, partindo de um teor em água de equilíbrio que proporciona significantes retrações. A título de exemplo, é possível observar na Fig. 2.33 duas situações, em que o surgimento de fendas de retração resultaram na significativa redução (2.33b), ou não (2.33a), da capacidade resistente das ligações, onde madeira Douglas-fir foi usada verde, de modo a permitir, durante a Segunda Guerra Mundial (WWII), a rápida montagem de grandes salões. Nestas ligações, os movimentos de retração foram restringidos pelos conectores do tipo “split-rings” com 102 mm de diâmetro.



(a)



(b)

Figura 2.33: (a) Fendas de secagem sem efeito na resistência da ligação; (b) Fendas de secagem com significativo efeito na redução da resistência da ligação; (Quenneville, 2014, p.32, Figs. 1-2).

Uma das hipóteses do trabalho experimental realizado por Sjödin (2008), foi que tais tensões induzidas pela variação do teor em água podem afetar a capacidade resistente a curto prazo de ligações do tipo “multiple steel-timber dowel”, mesmo carregadas paralelamente às fibras, ver Fig. 2.34. Os resultados obtidos deste trabalho experimental permitiram concluir que a capacidade resistente deste tipo de ligações pode ser negativamente afetada por uma exposição de secagem inicial, que pode aumentar a fragilidade deste tipo de ligações quando carregadas paralelamente às fibras.

Em qualquer destes casos é necessário, portanto ter-se em consideração este monolitismo, necessário à realização das forças equilibrantes previstas nos modelos mecânicos, que pelo fato de geralmente exporem as extremidades dos elementos e que por causa da realização de entalhes para as placas de aço, facilitam um elevado nível de transporte de água, aumentado ainda mais o risco do surgimento de tensões internas na área de ligação e seus efeitos correspondentes. Este efeito indesejável pode ser prevenido limitando a dimensão da zona de ligação, mas se tal não for possível, deve-se proceder ao cálculo explícito das tensões resultantes deste constrangimento (Negrão & Faria, 2009, 12.3).

Por conseguinte, verifica-se que neste tipo de ligações há a necessidade de se dar mais atenção ao detalhe, que parece ter sido inadequado ou ignorado, em prol da redução de custo ou até mesmo

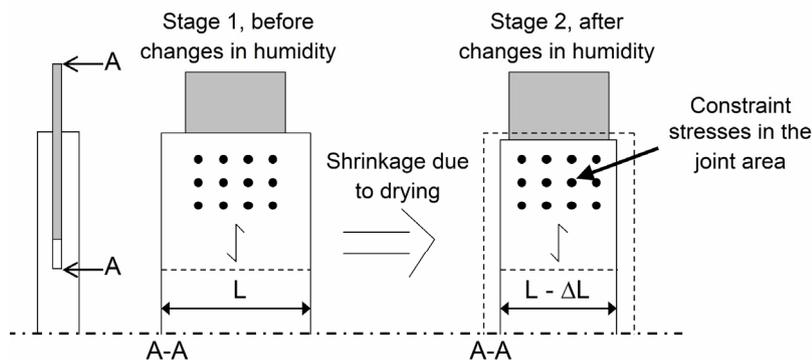


Figura 2.34: Tensões restringidas causadas por deformações induzidas pela humidade sendo restringidas pelas cavilhas, que estão fixadas à placa de aço (Sjödin, 2008, Fig. 5)).

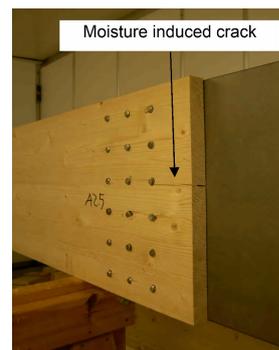


Figura 2.35: Fenda induzida pela humidade numa ligação (provet) exposto apenas a secagem (Sjödin, 2008, Fig. 9b)).

por desconhecimento do projetista, embora exista, em alguma forma, conhecimento acerca desta área. A não consideração da retração da madeira restringida pelos elementos de conexão, na fase de cálculo e na fase da realização dos desenhos de detalhe, tem-se demonstrado um erro, que pode sair bastante caro.

Todavia, por mais medidas que forem tomadas ao nível do detalhe quer do cálculo ou dos desenhos de pormenor de ligações cujas retrações da madeira são restringidas pelos elementos de conexão, deve-se sempre dispor de metodologias ou técnicas de reparação, que sejam capazes de limitar ou até mesmo anular, o efeito negativo das fendas na capacidade resistente das ligações a curto e longo prazo.

O advento dos novos parafusos, agora disponíveis, proporcionaram a evolução das técnicas de reparação, e têm sido cada vez mais usados para este efeito, mas não só. Os parafusos, normalmente de dupla rosca, também são usados como reforço deste tipo de ligações, sendo por isso um elemento preventivo de possíveis roturas inesperadas, e melhoram ainda o comportamento da ligação quando carregada, quer monotonicamente quer ciclicamente. Porém, deve-se também tomar nota de erros cometidos no passado, como é caso do incorreto uso de varões roscados para limitar o comprimento das fendas ou para melhorar a resistência ao corte na área de ligação, ver Fig. 2.33, para que não se voltem a repetir. Por fim, a inspeção deste tipo de ligações, é de extrema importância e não deve ser descartada de modo algum, por possibilitarem a tomada de medidas atempadas de reparação ou reforço, caso necessárias, antes que seja tarde demais. O leitor mais interessado poderá consultar alguns dos estudos, sobre o reforço de ligações cavilhadas, com parafusos autoperfurantes, realizados por Echavarría (2007), Lam F., Schulte-Wrede M., Yao C.C. (2008), Bejtka & Blaß (2005), Delahunty et al. (2014), Tannert & Lam (2009), Dietsch & Brandner (2015).

Capítulo 3

Falhas em Estruturas de Madeira

Lamelada Colada

3.1 Falhas e colapsos de estruturas de madeira

No início de 2006, muitas estruturas de madeira construídas no séc. XX colapsaram, na Alemanha e nos países adjacentes, por exemplo, no estado da Baviera devido a um Inverno muito rigoroso, desde 18 de Novembro até a meio do mês de Abril de 2006, durante o qual, muitos edifícios colapsaram, principalmente estruturas de grande vão. A Alemanha foi a principal afetada, com o colapso do Bad Reichenhall Ice-Arena (estrutura de madeira especial), tal como a Lituânia com o colapso do pavilhão Siemens Arena. Na Polónia ocorreram também alguns colapsos, mas neste caso, de estruturas metálicas. Estes colapsos resultaram em mortes e feridos. A Áustria e países vizinhos também foram afetados, mas sem mortes e feridos. Com o colapso as estruturas referidas e de muitas outras espalhadas por toda a Europa, mais significativamente na Europa Central e Europa do Norte (Países Nórdicos), surgiu a necessidade de entender o motivo, causas e razões que estavam por de trás do colapso destas estruturas. Inicialmente pensou-se que o peso da neve tinha sido a causa de colapso destas estruturas, mas verificou-se que muitas delas, colapsaram para níveis de carregamento da neve bastante inferiores aos valores de projeto. Verificou-se que o colapso destas estruturas era uma combinação de várias razões, que teriam de ser consideradas para explicar o colapso das mesmas.

3.1.1 Análise de casos

Com o objetivo de se entender quais as causas que estão na origem do colapso das estruturas de grande vão, que foi o tipo de estruturas mais afetadas, irá se analisar os dois casos de colapso anteriormente mencionados, nomeadamente as estruturas de madeira do Bad-Reichenhall Ice-Arena, na Alemanha, e do Siemens Arena, na Lituânia, bem como de um colapso de uma estrutura

de cobertura (caso 108). Adicionalmente analisar-se-á o caso de um pavilhão desportivo, cujos danos não resultaram no colapso da estrutura de cobertura. Desta forma pretende-se ganhar sensibilidade sobre as possíveis causas de colapso deste tipo de estruturas.

Colapso da estrutura de cobertura do Siemens Arena (Lituânia)

Relativamente à estrutura do Siemens Arena, o seu colapso foi repentino, a poucos meses depois da inauguração, e a poucos dias de um grande evento. Tratava-se de uma estrutura, em que a cobertura que colapsou, era composta por vigas de suporte com arcos superior e inferior. O arco superior estava à compressão, e o arco inferior à tração. As componentes horizontais destes dois esforços anulavam-se nos apoios por meio de uma ligação composta por placas e cavilhas de aço embutidas ocultamente na madeira e alguns parafusos de porca. Era uma estrutura esbelta, com um vão de 73 m, e uma distância entre os pórticos das vigas era de 12 m. Feita a descrição da estrutura de cobertura de MLC, segue-se a análise das causas que levaram ao colapso da estrutura. Pela descrição da estrutura, e pelo modo de rotura das vigas (rotura da secção transversal crítica na ligação de canto, note as cavilhas e as placas de aço da Fig. 3.1), percebe-se que a causa do colapso está relacionada com a ligação no apoio conjuntamente com a junção da viga superior e inferior do pórtico da viga. Por observação, verificou-se a rotura total de uma secção crítica na extremidade da viga de tração no início dos elementos de ligação, ver Fig. 3.1 (direita). Com este tipo de ligação, criou-se uma zona muito rígida devido à presença dos elementos de ligação, e de forte concentração de tensões, devido aos esforços que provinham das vigas, e também devido às restrições das variações dimensionais da madeira como resultado da exposição ao ambiente externo. Em contraste, a secção da viga de tração imediatamente a seguir aos elementos de ligação, era uma secção pouco rígida, e com secção reduzida devido à presença da chapa metálica de ligação, o que fez desta secção uma secção crítica para dimensionamento. Investigações realizadas mencionadas por [Munch-Andersen & Danish \(2009\)](#), mostraram que a resistência desta secção era apenas 25-30% da requerida. Para além dos fatores mencionados, a causa para o colapso resulta de um erro de cálculo de projeto (erro humano), por não se ter considerado esta secção crítica em todo o projeto. Outros erros de projeto foram cometidos como por exemplo, incorreta determinação da capacidade resistente de projeto, sendo esta cerca de 48% superior a real, e a não consideração da redução da altura da secção transversal nas extremidades dos arcos. A capacidade a curto prazo esperada para a secção crítica demonstrou ser ligeiramente maior que o esforço devido ao peso próprio da estrutura, por isso não seria necessário qualquer carregamento exterior para que ocorresse a rotura dessa secção, isto é, poderia ocorrer a rotura da secção apenas devido à consideração da capacidade resistente a longo prazo, que tem em consideração o tipo de carregamento e a classe de serviço ambiental (k_{mod}). Este fator, reforça a razão pela qual o colapso da estrutura, se deu

poucos meses depois da inauguração, (Munch-Andersen & Danish, 2009).



Figura 3.1: Estrutura de cobertura do Siemens Arena depois do colapso de dois pórticos, pórticos intactos é visto do lado direito (esquerda); canto com placas de aço que ligas as partes de madeira. Entre os parafusos visíveis, existem várias cavilhas no interior (centro).

Colapso da cobertura do Bad Reichenhall Ice-Arena (Alemanha)

A análise do colapso da estrutura de cobertura do Bad Reichenhall Ice-Arena, ver Fig. 3.2, segundo o relatório de imprensa elaborado por duas entidades (TU München e TÜV Süd) e o ministério público, baseado nas normas em vigor, investigações intensivas em sítio (diretamente nas zonas onde ocorreram os danos), e inspeções em zonas seguras da construção (onde foram extraídas partes da estrutura para caracterizar as propriedades resistentes de cada componente), resultaram nas mesmas conclusões por parte destas entidades, que subscreveram que o colapso da estrutura de cobertura do Bad Reichenhall Ice-Arena não foi devido a uma única causa, mas sim, o resultado de vários defeitos e danos acumulados. O Bad Reichenhall Ice-Arena, ver figura 3.2 (esquerda), foi construído no ano de 1971/1972, e tinha uma estrutura de cobertura composta por um tipo de viga especial, viga em caixa, ver Figura 3.2 (direita), composta por banzos de MLC e almas de um derivado da madeira, X-LAM. Estas vigas mestras, venciam um vão de 48 metros, e eram compostas por 3 tramos de 16 m, ligados por juntas dentadas comuns e tinham uma altura de 2,87 m. O fator de as normas para este tipo de vigas, permitirem apenas uma altura máxima de 1,2 m, foi um motivo forte para a explicação do colapso da estrutura, visto não ter sido encontrado nenhum estudo aprovado para este caso particular. Não foram encontrados nenhuns cálculos estáticos da estrutura de cobertura, que no caso de estruturas especiais é obrigatória. O máximo valor de $1,5 \text{ KN/m}^2$ que se aplica nos cálculos estáticos não foi excedido até a data do colapso, portanto não se pode afirmar que o colapso tenha sido devido ao peso da neve. Foram cometidas muitas omissões devido a não se ter realizado os cálculos estáticos, consequentemente, a capacidade resistente da viga foi sobreavaliada, e as margens de segurança de apenas 2, não existia, para ter em consideração fatores, tais como, erros do processo construtivo, variação da resistência do material e condições atmosféricas. Cálculos comparativos por peritos, usando as normas aplicáveis até a data, mostraram que o coeficiente de segurança era apenas de 1.5. Foi

mostrado que assentamentos de 100 mm ao longo da linha da estrutura de suporte, resultaram em esforços adicionais que poderiam não ser conclusivos. Foram verificados também defeitos no processo de produção das vigas, relativamente à ligação das almas ao banzo. Principalmente, para além das razões mencionadas anteriormente, o colapso da estrutura deveu-se à redução constante do período de vida em serviço da estrutura devido às influências externas ambientais (efeito da humidade), que resultaram na deterioração das juntas dentadas e das juntas de colagem das vigas inferiores, onde se verificaram muitos danos nas juntas coladas, que não tiveram um efeito adesivo prolongado a profundidades de 50-80 mm. A forte deterioração das juntas de colagem, teve como origem o uso incorreto da cola urea-formaldehid. Esta cola apenas era admissível para ambientes secos, de acordo com as regras técnicas até a data, por não serem permanentes à prova de humidade. Por isso esta cola não era adequada para ser utilizada em elementos resistentes nesta construção, pelo fator de esta apresentar um clima crítico, para componentes sensíveis à humidade. Ice-Arenas não aquecidas e sem ar condicionado, apresentam geralmente humidade relativa bastante alta nestas áreas. A arena era inicialmente aberta em dois lados, levando a um clima interior bastante dependente do clima exterior, logo sujeito a fortes variações, que mais tarde foi fechada, afirmando os peritos, em concordância, que não haviam efeitos desvantajosos. Contudo o estado de arte até a data no que respeita a utilização desta cola nesta Arena, não foi violado, pelo fator de não existirem estudos sobre as condições de humidade crítica em Ice-Arenas em 1972. Ice-Arenas apresentam climas com temperaturas baixas, e conseqüentemente a estrutura de cobertura apresenta temperaturas baixas. Devido à emissão de calor como resultado das radiações térmicas entre a cobertura e a superfície de gelo, a temperatura do ambiente interior sobe, provocando condensações nas superfícies dos elementos da estrutura de cobertura. No caso de existirem clarabóias na cobertura, a radiação solar incide diretamente nos elementos subjacentes, originando zonas de forte alternância entre humificação devido à condensação e secagem da radiação direta incidente proveniente das clarabóias. Infiltrações de água devido a falhas na membrana de cobertura e no sistema de drenagem do gelo vêm agravar ainda mais a deterioração dos elementos da estrutura de cobertura, mais respetivamente a junta de colagem das lamelas, que neste caso era muito sensível à humidade. Mesmo estando, a utilização desta cola, de acordo com as normas até a data, esta cola tinha rotura frágil, e por isso deveria ter sido substituída por uma cola resorcinol (RF) mais elástica. A inexistência de tarefas de manutenção bem como a falta de inspeções, vieram agravar todos os aspectos relacionados com a integridade da estrutura, visto que se poderiam ter identificado possíveis patologias na estrutura de cobertura, que pudessem por em causa a estabilidade da estrutura, e deste modo, poder-se-iam ter tomado decisões de reparação ou reforço com vista a garantir a estabilidade da estrutura, (Dietsch et al., 2008).



Figura 3.2: Ice-Arena em Bad Reichenhall (esquerda); vista parcial do colapso da estrutura de cobertura (centro); secção transversal em caixa das vigas mestras (direita), (Dietsch et al., 2008).

Edifício desportivo, colapso da estrutura de cobertura - caso 108

No âmbito de um projeto em conjunto Sueco-Finlandês “Inovação de Design, um novo paradigma de resistência, QA e confiabilidade para construções de grande vão”, foram incluídas nas pesquisas, investigações e análises de 127 casos de falhas de estruturas, com madeira como principal material de construção. De seguida irá se proceder à análise do caso número 108. O caso número 108, tem muitas características semelhantes ao Siemens Arena. É um edifício desportivo, construído em 1988. A estrutura de cobertura consiste em 7 vigas curvas, com um comprimento de 20 metros, espaçadas entre si por 5 metros, e com uma espessura de 18,5 cm. Uma inspeção inicial, observou fendas extensas em várias vigas. Foi medido o teor em água que era inferior a 10% em todos os casos. Ou contrário do Bad Reichenhall Ice-Arena, que apresentava um clima muito severo para elementos sensíveis à humidade (adesivos e os próprios elementos estruturais de madeira) com um clima muito húmido, os recintos desportivos têm um ambiente mais favorável, e se forem aquecidos e ventilados, é normal apresentarem baixos teores em água, como é o caso. Embora, o edifício apresente um clima favorável, foram observadas fendas severas. Numa análise mais detalhada dada pelas investigações originais, concluiu-se que para além das fendas de secagem que são normais em MLC, observaram-se 10 fendas com cerca de 1-8 metros de comprimento e 30-70 mm de profundidade, que não podiam ser explicadas, devidas somente à secagem. A fenda mais severa dessas 10, situava-se numa zona crítica, a zona dos apoios, prologando-se 6-7 metros em direção ao meio vão e pela linha de colagem. Esta fenda situava-se nos dois apoios da viga, e tinha uma profundidade de cerca de 70 mm e 10 mm, em cada face. As fendas foram reparadas com o mesmo adesivo escuro (preto) usado no fabrico das vigas. A profundidade de reparo foi de 10 mm. Evidenciou-se que o adesivo tinha começado a curar muito antes de ter sido aplicada a pressão adequada. O colapso das vigas da estrutura de

cobertura, foi devido a estas fendas, que foram provocadas pela secagem, erros de fabrico e do tempo demasiado longo da montagem, que originou num aumento do teor em água das vigas, que veio agravar as tensões de retração após a finalização da construção, que iria apresentar um ambiente seco, e mais propício para o desenvolvimento de fendas de secagem. Dever-se-iam ter tomados medidas relativamente a proteção das vigas no processo de montagem ou à diminuição do tempo do mesmo, para que estas não absorvessem muita humidade. A capacidade resistente ao corte das vigas deveria ter sido reavaliada, para ter em consideração a profundidade das fendas e do seu comprimento, principalmente nas zonas dos apoios onde as tensões de corte são máximas,



Figura 3.3: Colapso da estrutura do caso 108/127, Bicycle-Arena em Ballerup, Dinamarca.

Pavilhão desportivo

Por último, vai-se proceder à análise da rotura por corte de vigas de MLC de alguns dos 14 pórticos, de um recinto desportivo construído em 2001, ver Fig. 3.4. Neste caso a rotura das vigas ao corte, não resultou no colapso total nem parcial da estrutura, mas sim em sérios danos nas vigas e ligações, resultado das fendas de corte, que colocaram a integridade e a estabilidade da estrutura em risco.

O alarme foi dado quando às 8 da tarde do dia 20 de Março de 2005, durante um treino, os jogadores ouviram um grande barulho de fendas de corte na viga principal do pórtico 2, que era visível do piso do campo de jogos do recinto. Depois de uma inspeção mais próxima, foram encontradas mais fendas de corte nas vigas principais de mais 2 pórticos – pórtico 1 e 10. A carga da neve no dia seguinte era de 2,3-3,5 kN/m², bem abaixo dos 5,5 kN/m² do valor de projeto.



Figura 3.4: Estrutura de madeira do pavilhão desportivo, construído em 2001, (Bell, 2007).

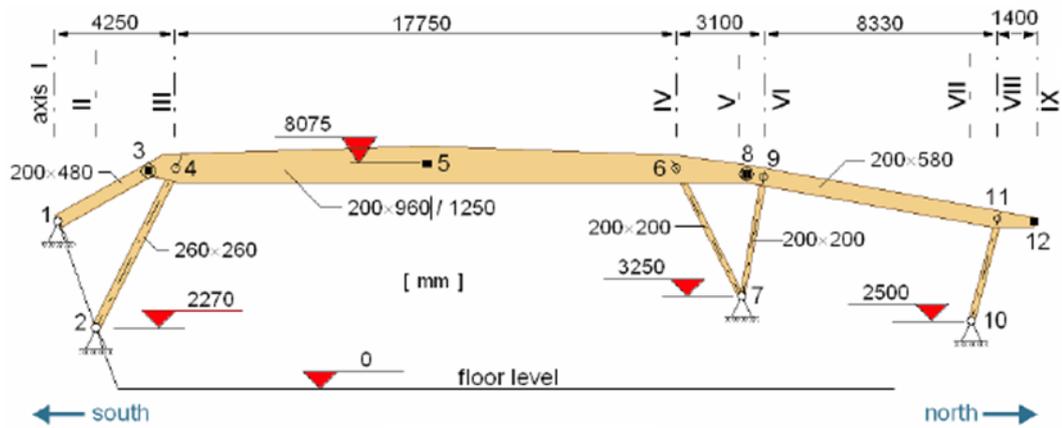


Figura 3.5: Geometria do pórtico típico do pavilhão desportivo, (Bell, 2007).

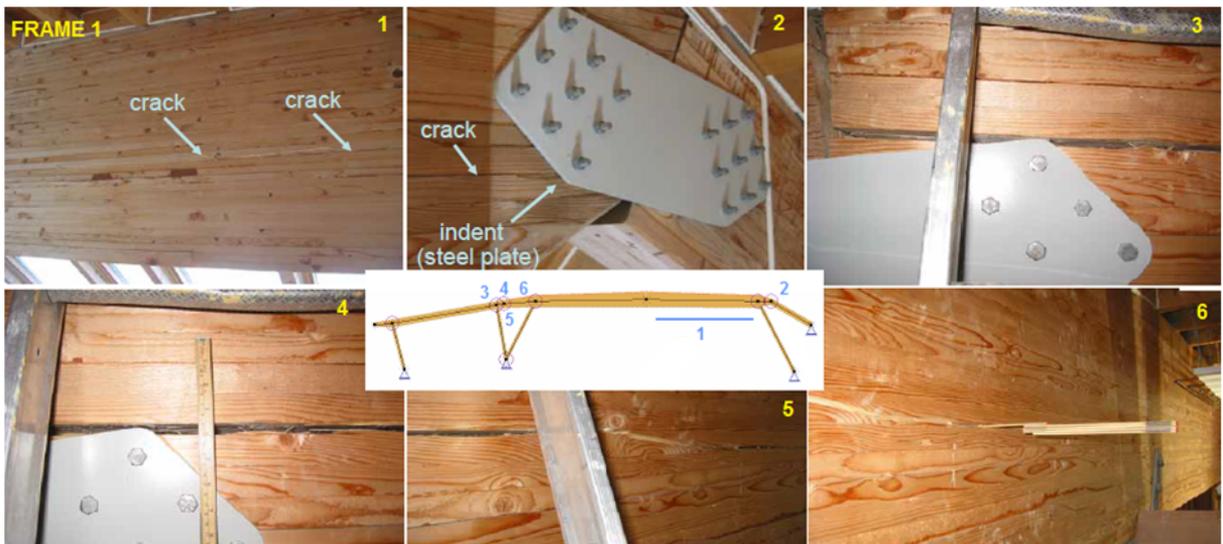


Figura 3.6: Fotos das falhas no pórtico 1, (Bell, 2007).

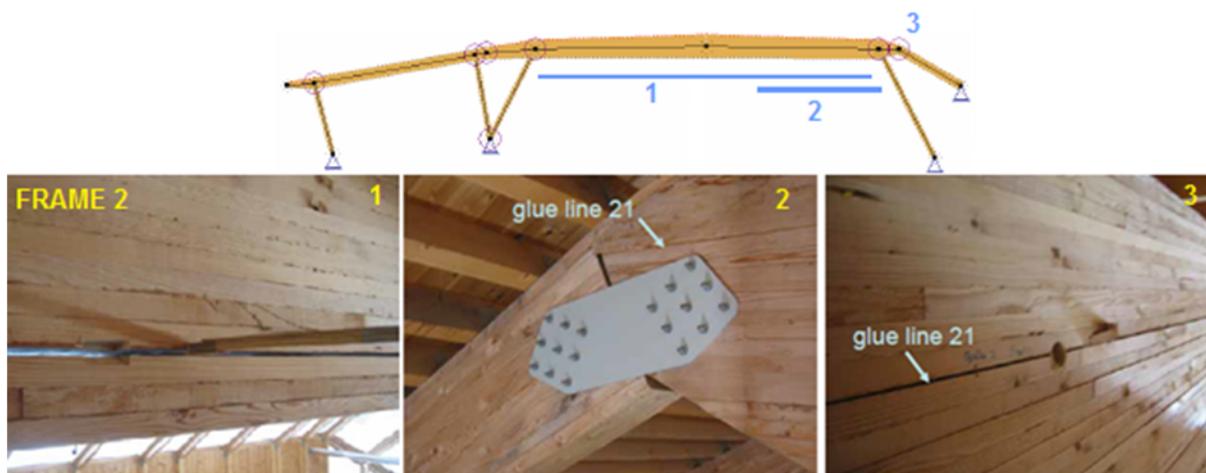


Figura 3.7: – Fotos das falhas no pórtico 2, (Bell, 2007).

Foram realizados cálculos num modelo 2D do pórtico, para comparar os valores de esforços de projeto com os esforços devidos ao carregamento no momento em que as falhas ocorreram, que eram as cargas permanentes (peso próprio da estrutura, peso da relva sobre a viga da extremidade Norte) e a carga variável neve medida no dia seguinte. Os cálculos estáticos, neste modelo, permitiu verificar que as tensões e os esforços, no momento da falha eram ainda bem inferiores aos de projeto, apenas os deslocamentos eram muito próximos. Desta forma, de entre as causas possíveis para a ocorrência da falha (carregamento excessivo, projeto incorreto, fraca qualidade dos detalhes, humidade (retração e inchaço)), a qualidade do MLC, parece ser um possível culpado. Segundo o cenário de falha mais provável, a falha começou com um defeito na linha colada 21 no nó 4 do pórtico 2, propagando-se até ao centro da viga. As tensões de corte na linha defeituosa (3ª linha de colagem) do pórtico 2 aumentaram e causaram a rotura total desta linha colada (do nó 4 ao 6). A resultante cedência do pórtico 2 aumentou ligeiramente o carregamento do pórtico 1 e isso causou uma falha de corte que começou em um defeito na linha colada no nó 4 – a fenda de corte propagou-se em direção ao meio vão da viga. A adicional cedência do pórtico 1 causou uma larga rotação da ligação no nó 9 que por sua vez causou uma fenda devido à tensão perpendicular às fibras, que depois se propagou em direção ao nó 6. Contudo, percebe-se a necessidade de avaliar a resistência ao corte, tendo em consideração a possível pobre qualidade do material, tais como defeitos nas juntas de colagem das lamelas, fendas de secagem, que são frequentes nesta zona. O detalhe da ligação das vigas, favorecia que na ocorrência de rotações relativa das vigas, surgissem tensões perpendiculares às fibras que facilmente ultrapassassem a baixa resistência a tração perpendicular às fibras, resultando em fendas de delaminação (Modo I). Seria necessário uma análise mais detalhada do pormenor da ligação.

3.1.2 Sistemas de classificação de falhas em estruturas

Um projeto de como parte de um projeto em conjunto Sueco-Finlandês, tinha como objetivo obter informações acerca de causas de falhas em sistemas de estruturas de madeira. O projeto tinha como propósito direto, aprender de cada experiência, com o objetivo de melhorar o sistema de controlo e educação de engenheiros de estruturas de madeira. O contexto das investigações, foram a ocorrência de colapsos de estruturas de cobertura de madeira, nos países Nórdicos e na Europa Central, nos anos de 2005-2007. Foram realizadas investigações de falhas em construções, em que a madeira era o material primário de construção, de 127 casos de falha, 1-2 páginas por cada caso. Posteriormente, os casos reportados foram analisados e as causas por de trás das falhas foram classificadas de acordo com 9 categorias: desempenho do material (madeira), erros no processo em fábrica, pobres princípios de produção, alterações em sito, pobres princípios durante a montagem, fraca qualidade de projeto/ falta de projeto em relação às cargas mecânicas, fraca qualidade de projeto/ falta de projeto no que diz respeito às ações ambientais, sobrecarga em relação aos regulamento de construção, outros motivos desconhecidos. O sistema de classificação das falhas para estas estruturas consistia numa tabela que para cada caso, procedia à sua numeração, material respetivo, causa da falha (9 categorias) e a fonte (empresa que efetuou a inspeção, documentos). Na atribuição da causa de falha seria atribuído uma percentagem relativamente às 9 categorias, por exemplo, um caso com 20% atribuído à categoria 4 e 80% à 9, significa que a causa de falha desse caso foi devido maioritariamente à sobrecarga em relação aos regulamentos de construção, e um pouco a erros do processo em fábrica. O somatório, terá de ser sempre 100%. Os 127 casos analisados, provêm de fontes literárias (L) e de investigações individuais (I), dos seguintes parceiros: Limträteknik AB, Falun (I) – 12 casos, LTH (L) - 67 casos, SP (I) - 18 casos, VTT (I,L) - 30 casos, refazendo assim um total de 127 casos. O objetivo destas investigações e análise dos casos de falha de estruturas de madeira, é sobretudo aprender com estas, para que no futuro se possam tomar medidas para melhorar a qualidade e seguranças das estruturas, bem como de todo o processo envolvido. As falhas são cometidas por erros humanos, dos quais 53% são relativos a erros de projeto e 27% relativos a erros de construção em sito. Os erros humanos dividem-se em 3 categorias, que são: erros de conhecimento (treino inadequado em relação às tarefas) – melhorar treino e educação; erros de desempenho (falta de profissionalismo e de cuidado) – mais eficiência, qualidade e garantia (QA); erros de intenção (realizar pequenos corte conscientemente e assumir riscos para poupar tempo e dinheiro) – mais eficiência, garantia de qualidade. Comparando as causas de falhas em construções de madeira, aço e betão, verifica-se que estas tem causas em comum, como o comportamento inadequado das ligações e contraventamento inadequado do sistema estrutural. São difíceis comparações das diferentes categorias com o número de casos, para estruturas de

madeira, aço, e betão. Coloca-se então a questão: Serão os engenheiros melhores a projetar estruturas de aço e de betão? Os tipos de edifícios (públicos, industriais, agrícolas, privados, outros), em percentagem de casos de falha analisados, indicam que serão necessárias mais investigações em edifícios públicos comparativamente com edifícios privados. Serão necessárias mais investigações também em estruturas de grande vão (principalmente nas estruturas publicas e industriais). As estruturas com vão superior a 10 metros são as mais afetadas, sendo que a partir de vão superior a 25 metros os casos de falhas observados sobem exponencialmente. Concluiu-se que as falhas ocorrem principalmente no 1º e 2º ano do período de vida da construção. Os elementos mais afetados são as vigas, de seguida as treliças, depois o contraventamento, as ligações (mais propriamente as do tipo cavilha), depois os arcos, pilares, e por ultimo os quadros. Os modos de rotura/falha por ordem decrescente em percentagem dos casos analisados são: Instabilidade (30); Rotura por flexão (15); Rotura por tensão perpendiculares às fibras (11); rotura por corte (9); fendas de secagem (9); deslocamentos excessivos (7), rotura à tração (5); corrosão dos elementos fixadores/ degradação ao longo do tempo (4); resistência ao arrancamentos dos fixadores (3); compressão/encurvadura (2); outros casos/desconhecidos (21). As causas mais comuns de falhas nas investigações dos casos é má concepção ou falta de projeto de resistência (41%). Outra causa importante de falha são princípios pobres durante a montagem (14.1%), alterações em sito (11.4%). Num total, cerca de metade das falhas foram relatadas ao projeto. Cerca de um quarto das falhas foram causadas no local de construção (alterações em sito, pobres princípios durante a montagem). Isto significa que a qualidade da madeira, métodos de produção e princípios, apenas causam uma pequena parte (juntas de cerca de 11%) de falhas. O problema não é portanto da madeira como material, mas dos engenheiros e trabalhadores no processo de montagem, que foram também encontradas em investigações similares realizadas em outros materiais.

3.1.3 Armazenamento de dados de falhas em estruturas de madeira

Como temos vindo a observar até agora, os casos discutidos na literatura são simples avaliações de falhas, e por isso, não foi possível realizar estatísticas integrais e reflexões sistemáticas de falhas relativamente a estruturas de grande vão (estruturas de cobertura de madeira). O principal objetivo da investigação de falhas e análise em estruturas de madeira na Alemanha (Blaß & Frese, 2007), era criar as bases para um reflexão integral. Primeiramente, seria necessário elaborar uma base de dados relativa a estruturas de grande vão. A base de dados resulta de relatórios de falhas em estruturas de madeira. Posteriormente, seria elaborado um sistema adequado ao qual se pudesse aceder, analisar e representar os dados, podendo-se desta forma obter respostas a diferentes questões de pesquisas orientadas para um dado problema, teria também de ser um sistema fiável e de rápido armazenamento dos dados, como é o caso de uma

folha de Excel. O sistema de armazenamento de dados foi programado de tal forma, que a representação e a avaliação seja facilmente possível. Este sistema tem particular vantagem de se poder alargar a base de dados, à entrada de casos futuros. O sistema armazenamento de dados é composto por parâmetros que apenas podem assumir diferentes palavras-chave, sendo que as palavras-chaves podem ser repetidas em diferentes parâmetros. O esquema relativo a este sistema de armazenamento pode ser visto em (Blaß & Frese, 2007, Fig. 2), para além de uma descrição compreensiva e detalhada da investigação levada a cabo por Blaß & Frese (2007). Quanto mais a base de dados for alargada através de mais avaliações de casos, melhor será a diferenciação da análise de dados de falhas, resultado numa profunda compreensão de danos em estruturas de madeira de um determinado sistema estrutural (por ex. estruturas de grande vão de madeira), do seu mau funcionamento e da sua sistematologia. As avaliações de casos têm vários benefícios práticos, tais como: alargar o conhecimento de defeitos típicos de estruturas, o reconhecimento atempado de falhas iniciais durante a inspeção, evitar colapsos, aumentar o período de vida das construções e fazer uso da experiência acumulada em novas estruturas de madeira. Deste modo a posição das estruturas de madeira em relação à sua segurança, não só em caso de danos, e sustentabilidade sairá fortalecida. O conhecimento adquirido pode ser usado para desenvolver métodos para monitorizar as construções existentes de madeira e para criticar as construções existentes, bem como os princípios construtivos que estiveram na sua origem. Este é um sistema mais abrangente e flexível, que permite mostrar várias relações mútuas típicas entre os parâmetros e suas palavras-chaves, permitindo estatísticas mais integrais e reflexões sistemáticas de falhas, ou contrário do sistema caracterização utilizado por (Frühwald, 2007), com apenas 9 categorias de causas de falhas. Trata-se de um sistema capaz de localizar e representar dados com desempenho.

3.1.4 Avaliação e análise de dados estatísticos de falhas e danos

Dando seguimento a 3.1.3, através deste sistema, foi possível ter uma perspetiva sobre danos e falhas em estruturas de madeira de grande vão, mais abrangente, flexível e integrante do que a realizada na secção 3.1.2. Agora, se irá proceder à análise das estatísticas, obtidas por aplicação do sistema de análise e recorrendo à representação 144 registos (140 explicáveis) de casos de danos primários, repartidos por 92 edifícios construídos nos anos de 1965 a 2006, no Velho Oeste da Alemanha, onde para a qual quase não existiam dados. Poder-se-à afirmar que estruturas de grande vão, não estão livres de falhas. Este número demonstra ser adequado para mostrar as várias relações mútuas e típicas entre os parâmetros analisados. A análise terá como base a descrição das construções e das suas falhas, realizada por Blaß & Frese (2007). Importa sublinhar que no contexto dos dados analisados, estes não refletem uma imagem representativa de todas as estruturas de grande vão. A análise permitiu concluir que as estruturas de grande

vão de pavilhões desportivos ou desportos de gelo são os que têm vindo a ser mais afetados por danos, ver Figs. 2.26 e 2.24. Os danos, foram maioritariamente observados em vigas de suporte simples e contínuas. Os elementos danificados, são na maioria constituídos de MLC, da classe de resistência Guteklass II e I (comparáveis com GL24 e GL28). Os vãos dos sistemas de suporte variam entre 6 a 48 metros. Os grandes vãos são raros. *Fendas na direção de crescimento das fibras representam 70% dos danos (onde as variações climáticas tem muita importância)*, enquanto as falhas por corte apenas representam 6% dos danos. As falhas ocorrem principalmente nos meses de Janeiro e Março. De acordo com as avaliações de estabilidade realizadas pelos peritos, 1/3 das construções encontram-se em risco, e pouco menos de 1/3 colapsaram ou falharam, e 1/4 apresentavam estabilidade assegurada. O fator de 1/3 das construções se encontraram em risco, dá-nos uma relação próxima de como olhar a “vida” de uma construção, devendo-se por isto, proceder à inspeção destas construções com o objetivo de detetar sinais de risco, e posteriormente se proceder à tomada de decisões/ medidas, para que seja assegurada a estabilidade e o tempo de vida útil da estrutura. Se não existissem estruturas em risco, seria um grande problema, porque significaria que as construções perderiam a sua estabilidade, isto é, colapsavam sem qualquer aviso prévio. Neste contexto, as inspeções e a manutenção preventiva (restauro dos danos) assumem extrema importância. *Os movimentos de retração restringidos, vigas curvas ou conexões das secções transversais de elementos individuais são as principais causas de falhas.* A influência da secagem, do inchamento, das causas de falhas relativamente à fase de projeto, das propriedades físicas, do carregamento, do fabrico, e da qualidade do material é moderada (Blaß & Frese, 2007).

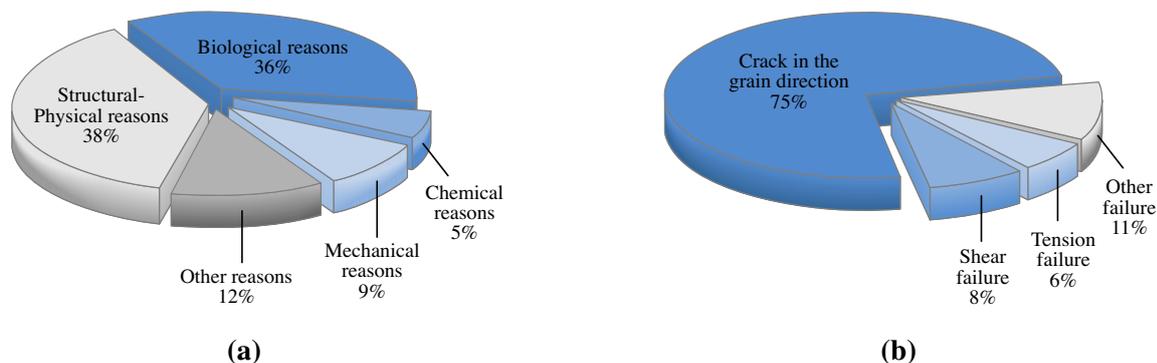


Figura 3.8: (a) Causas de danos; (b) Tipos de falhas, (Blaß & Frese, 2010, 2011).

A análise de falhas em estruturas de madeira na Alemanha levado a cabo por Blaß & Frese (2010, 2011), dá-nos uma boa perceção da distribuição dos principais tipos de falhas classificadas de acordo com a construção, uso e região. Em 75% dos casos de falha poderiam ser detetadas fendas. Razões típicas e tipos de falhas são sumariados na Fig. 3.8. Elementos sujeitos à flexão são os que apresentam 80% dos casos de falha, seguidos por 8% os que se encontram à compressão. As razões biológicas e físicas são as causas de dano que influenciam mais a

capacidade resistente e o comportamento em serviço de elementos individuais ou da construção completa. A forma e o material do elemento estrutural também são importantes de analisar do ponto de vista da frequência em que danos e falhas ocorrem neste. As fendas são comuns a todas as formas, embora as vigas curvas tenham maior tendência a apresentar fendas na direção das fibras e mais profundas (ver também Tabs. 1-3 [S. Franke et al., 2015](#)).

A ocorrência de danos e falhas nas secções transversais de madeira (p.ex. fendas, ataques biológicos), obriga à reavaliação da área efetiva e da classe do material das próprias, atribuídas aquando a realização do projeto de estrutura, onde no qual, foi assumida uma área sem menores danos e uma correta classe de resistência. O impacto na resistência destes danos e falhas, não deve exceder o limite de resistência de cálculo e os limites de deformação.

3.2 Fendas em MLC

A ocorrência de fendas na direção das fibras, é o tipo de falha mais comum observado em elementos de MLC, sendo as causas para este tipo de dano, maioritariamente relativas a razões estruturais e físicas, ver Fig. 3.8.

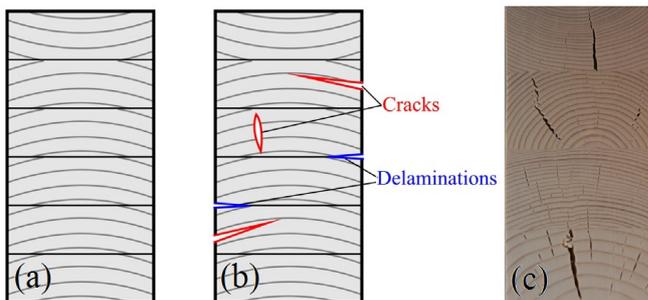


Figura 3.9: Rascunhos e imagem real de secções de MLC; (a) não danificada com 100% capacidade, (b) com alguns danos possíveis e capacidade desconhecida, (c) fendas internas às lamelas, ([S. Franke et al., 2015](#), Fig. 3).

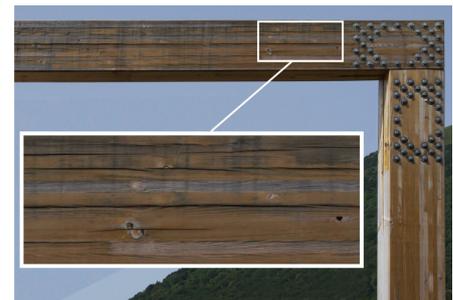


Figura 3.10: Fendas na direção das fibras em elementos de MLC ([S. Franke et al., 2015](#), Fig. 4).

As razões físicas estão relacionada com a variação climática do ambiente circundante de um elemento de madeira, como por exemplo uma viga, que altera o seu teor em água e leva à retração ou ao inchamento da secção transversal. A distribuição não uniforme do teor em água ao longo da secção transversal e/ou deformações restringidas resultam em tensões internas e, se a resistência do material for excedida, surgem fendas na secção transversal que podem reduzir de certo modo a capacidade resistente do elemento ou da ligação entre ambos, Fig. 3.9 e 3.10. Um aspeto importante, passa por saber qual a causa destas fendas, as suas características (comprimento, profundidade e espessura) e a sua localização no elemento, bem como saber em que casos é que estas ocorrem com maior frequência. Tal informação pode ser consultada na Tab. 4 em [S. Franke et al. \(2015\)](#), onde se constata que a concentração de tensões (retrações

restringidas, entalhes, e forças transversais, entre outros) é a causa com maior percentagem de casos observados, seguidamente das relativas às variações sazonais do clima. Por fim, a qualidade do elemento, mais propriamente da linha de colagem ou das juntas de topo dentadas “finger-joints” e o sobrecarregamento (ao corte e à flexão), também apresentam uma percentagem de ocorrência significativa, embora seja cerca de metade das anteriormente mencionadas. Adicionalmente, a quantidade e a distribuição das fendas depende também de outros fatores, tais como a espécie de madeira, defeitos, tipo de carregamento, forma da viga e qualidade da junta colada interlamelar dos elementos. Contudo, surge a necessidade de primeiramente, identificar técnicas especiais e específicas com vista o mapeamento e a classificação das fendas segundo as suas características geométricas e as causas que levaram ao seu aparecimento. Relativamente à classificação da delaminação, podem ser encontradas técnicas específicas em (B. Franke et al., 2013). Posteriormente, surge a necessidade de determinar qual a influência que as fendas têm na capacidade resistente ou na rigidez residual dos elementos. Constatou-se que não existiam métodos compreensivos neste campo, por conseguinte, na Bern University of Applied Sciences, estão correntemente a ser desenvolvidos métodos e guias para a sua avaliação, ver Magnière et al. (2014). De seguida, devem-se identificar quais os métodos de reparação/ restauro da integridade dos elementos afetados por fendas, e quais os métodos de reforço ou de apenas restauro da capacidade resistente perdida, e respetivas técnicas e metodologias de aplicação. Por fim, é importante ressaltar que as falhas/ fendas ocorridas sob tensão de tração perpendicular às fibras em elementos de MLC devem e têm de ser distinguidas das falhas relativas à delaminação da junta colada, a todos os níveis.

3.3 Avaliação da capacidade de carga residual de vigas com fendas

3.3.1 Largura efetiva e fator de modificação, EC5

Quando uma viga é carregada superiormente ela fica sujeita a flexão e ao corte. De acordo com a teoria da elasticidade da flexão, as tensões de corte surgem paralelamente ao eixo da viga, e por equilíbrio, surgem também tensões de corte de igual valor perpendicularmente ao eixo da viga, como mostra a Fig.3.12(a).

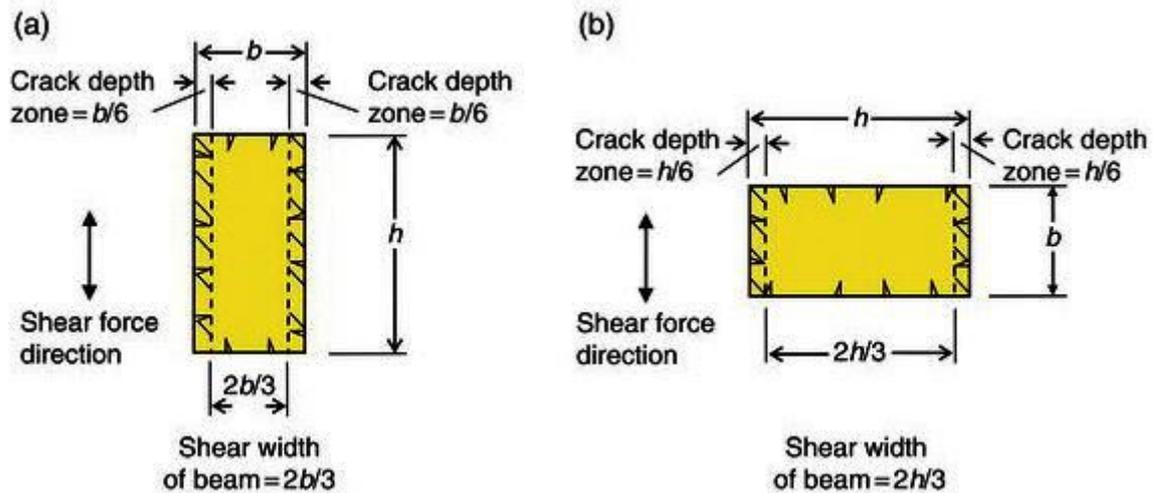


Figura 3.11: Largura de corte de uma viga de MM ou MLC quando sujeita a tensões de corte na direção considerada (Porteous & Kermani, 2013b, Fig. 4.9).

O valor da tensão de corte para uma dada posição da altura da secção transversal de uma viga retangular, de acordo com a teoria da elasticidade, é:

$$\tau = \frac{VS}{Ib} \quad (3.1)$$

Onde, τ é a tensão de corte para o nível considerado, V a força de corte para a posição considerada, S o momento estático acima do nível das tensões de corte em relação ao eixo neutro, I o momento de inércia da secção transversal para o nível da tensão de corte e b a largura da secção transversal para o nível da tensão de corte.

No caso de MM e MLC, tem-se verificado o aparecimento de fendas de secagem no elemento, que por consequência, reduzem a largura efetiva resistente ao corte do elemento. Este fator é tido em consideração no EC5, pela introdução do fator de modificação k_{cr} , que reduz a largura inicial b do elemento, para uma largura efetiva ou eficaz b_{ef} , calculada pela seguinte expressão:

$$b_{ef} = k_{cr}b \quad (EC5, eq.6.13(a)) \quad (3.2)$$

A Eq.3.2 é baseada no fator da possibilidade da ocorrência de fendas de secagem (face externa) em elementos de MM e MLC com uma profundidade de 1/6 da largura da secção transversal, resultando na diminuição da largura efetiva capaz de transferir as tensões de corte, como mostra a Fig. 3.11.

De acordo com a Fig. 3.11 a largura b da viga capaz de transferir as tensões de corte é a largura não fendilhada, sendo dada por: (a) $k_{cr}b = 2b/3$, quando a força de corte atua transversalmente à largura da viga, ou dada por; (b) $k_{cr}h = 2h/3$ quando esta mesma força atua paralelamente à

largura da viga. Em ambos os casos a altura h da viga é toda ela efetiva ao corte, embora no caso (b) a altura da viga é b .

O fator de modificação k_{cr} foi introduzido após as investigações de falhas em estruturas de madeira na Alemanha causadas por uma grande quantidade de queda de neve em 2006, onde se concluiu que a incidência de fendas de secagem (face externa) tinham contribuído para a ocorrência de falhas por corte. Verificou-se ainda que apenas os elementos de MM e MLC se enquadravam neste contexto, e portanto "wood-based panels" ou LVL, não tiveram este problema. Note-se ainda que a descoberta, não faz referência a qualquer classe de serviço das secções transversais que têm sido projetadas para funcionar em interiores, logo é aplicável a qualquer classe de serviço.

Tabela 3.1: Valores do fator de modificação k_{cr} (Based on Table NA.4 in the UKNA to EC5).

Material	Value for k_{cr}
Solid Timber	0.67
Glued-laminated timber	0.67
Laminated venner lumber	1.0
Wood-based panels	1.0

Nem todos os países aceitaram a introdução deste fator, por isso este fator pode ser negligenciado em alguns países ou tomar valores distintos noutros, sendo estes especificados nos anexos nacionais dos respetivos países. Por exemplo, no Reino Unido, a utilização do fator de modificação foi aceite e os valores recomendados são dados na "Table NA.4 in the UK NA" e sumariado na Tab.3.1. Note-se ainda que os valores apresentados na Tab. 3.1 para "wood-based panels" e LVL, o fator de modificação k_{cr} é 1.0, o que significa que não há risco de aparecimento de fendas de secagem para estes materiais.

Em qualquer posição ao longo da viga as tensões de corte nas faces superior e inferior da secção transversal será zero e o valor máximo de tensão de corte surge na posição do eixo neutro, onde o momento estático é máximo. Para secções retangulares com largura b e altura h , como mostra na Fig. 3.12(a), o valor máximo de tensão de corte ocorre a meia altura e é dado por:

$$\tau_{\max} = \frac{V(b_{ef}(h/2)(h/4))}{(b_{ef}h^3/12)b_{ef}} = \frac{3V}{2b_{ef}h} = \frac{3V}{2(k_{cr}b)h} \quad (3.3)$$

A verificação dos elementos ao corte segundo o EC5 é feita para os ULS, para ambas as situações

da Fig.3.12, é dada por:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (EC5, eq.6.13) \quad (3.4)$$

$$\frac{3V_d}{2(k_{cr}b)h} \leq \frac{k_{mod}k_{sys}f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (3.5)$$

Onde $f_{v,d}$ é a resistência ao corte de cálculo para a condição analisada, i.e Fig. 3.12(a) ou 3.12(b).

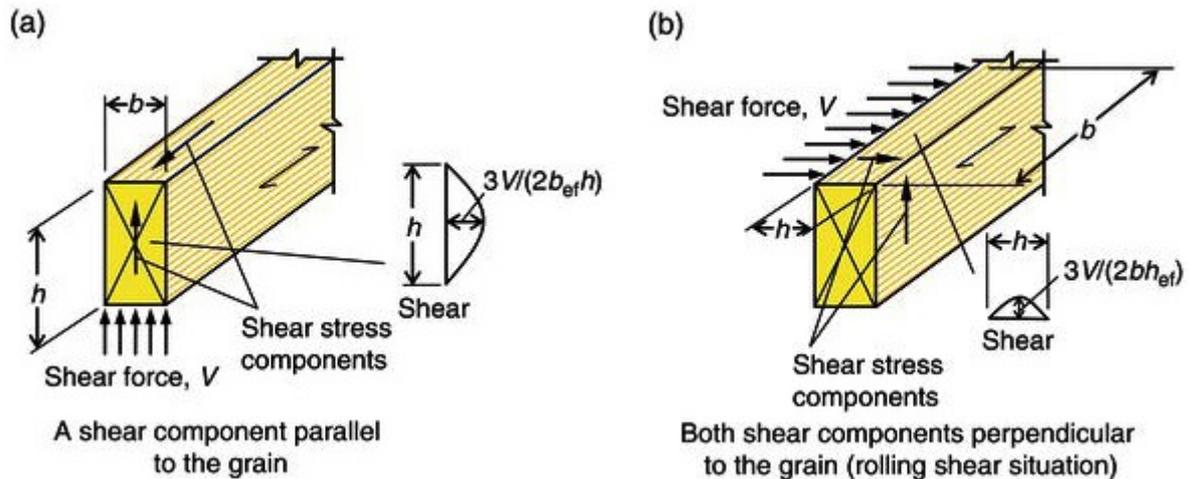


Figura 3.12: Componentes da tensão de corte mais as tensões de corte em um elemento: (a) uma componente de corte paralela às fibras; (b) ambas as componentes perpendiculares às fibras (corte por enrolamento), (Porteous & Kermani, 2013b, Fig. 10).

Pela observação do primeiro termo da Eq. 3.5, entende-se que o fator k_{cr} sendo este menor que 1.0 e estando em denominador, irá reduzir a capacidade resistente ao corte da MM ou MLC por diminuição da largura efetiva, resultando no aumento da tensão atuante. Já olhando o segundo termo, observa-se a diminuição do valor resistente de cálculo através da multiplicação do valor resistente ao corte característico pelo fator k_{mod} inferior a 1.0 e pela divisão do fator γ_M superior a 1.0. A classe de serviço e de duração das ações é incluída pelo fator k_{mod} e os defeitos naturais do material é tido em conta pelo fator γ_M , e ambos têm impacto no valor da resistência ao corte do material, segundo termo. Já o fator k_{cr} apenas tem impacto na tensão atuante, não tendo na sua essência qualquer relação com a classe de serviço, como se tem vindo a afirmar, primeiro termo. No entanto, como a condição normal de calculo das tensões de corte usando estes materiais será a mostrada na Fig. 3.12 (a), uma forma de compensar a introdução do fator k_{cr} especialmente em vigas de madeira de baixa classe de resistência é através da escolha de uma classe de resistência maior por forma a obter um aumento da resistência ao corte, em BS EN 338:2009 sobre os valores dados na revisão de 2003 desta norma, sem ser necessário sacrificar as dimensões do elemento. Através da validação da Eq. 3.4 consideração que o elemento, se encontra de acordo

com os critérios de segurança definidos no EC5.

3.3.2 Avaliação das consequências das fendas

Para avaliar a consequência das fendas na integridade estrutural de elementos de madeira, são necessárias informações à cerca das dimensões das fendas (comprimento, largura e profundidade) e especialmente a sua posição no elemento estrutural, ver Fig.3.13 e Fig.3.14.

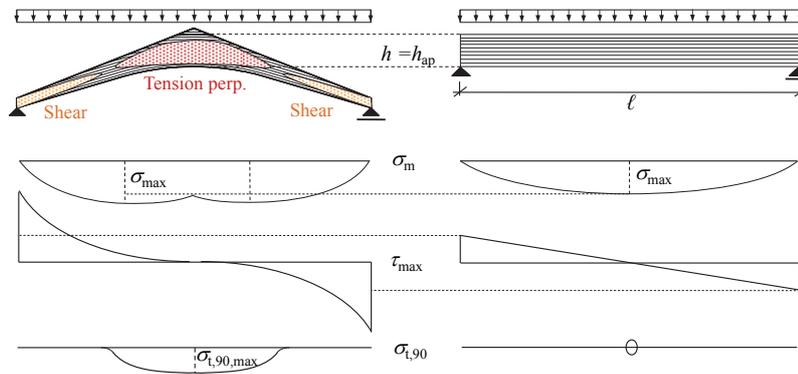


Figura 3.13: Consequência das fendas - Ilustração esquemática da distribuição das tensões de flexão, tensões de corte e tensões de tração perpendiculares às fibras numa viga estreita e numa viga curva, (Dietsch et al., 2013, Fig. 1).

A medição das dimensões das fendas e sua localização, têm de ser avaliadas individualmente para cada estrutura. Isto inclui o sistema estrutural, a relevância do elemento estrutural, utilização do edifício e as condições ambientais circundantes para a determinação da causa e possíveis consequências das fendas. No contexto das condições circundantes da estrutura deve-se fazer a diferenciação de fendas localizadas em áreas de tensões de corte elevadas e em áreas de tensões de tração perpendiculares às fibras elevadas, ver Fig.3.13 e Fig.3.14

Alguns autores indicam a permissibilidade de fendas com certas profundidades para tais áreas, (Frech, 1987, Erler, 2004, Radovic & Wiegand, 2005, Blaß et al., 2006). Também é relevante se as fendas aparecem predominantemente ou com uma certa frequência na madeira ou na junta colada. Uma fenda na vizinhança e na direção de uma junta colada não é em todos os casos indicação de problemas de adesão ou coesão. A madeira que se encontra na vizinhança da junta colada é a parte mais fraca da lamela devido ao corte das fibras durante o processo de serração. Em adição, existe uma descontinuidade entre a densidade das lamelas e por isso, também entre os movimentos de retração de ambos os lados. Na maioria das vezes as fendas ocorrem na madeira que se situa na vizinhança da junta colada. A fenda deve ser portanto investigada atentamente antes de serem retiradas conclusões sobre o mecanismo de rotura (Brüninghoff, 2010).

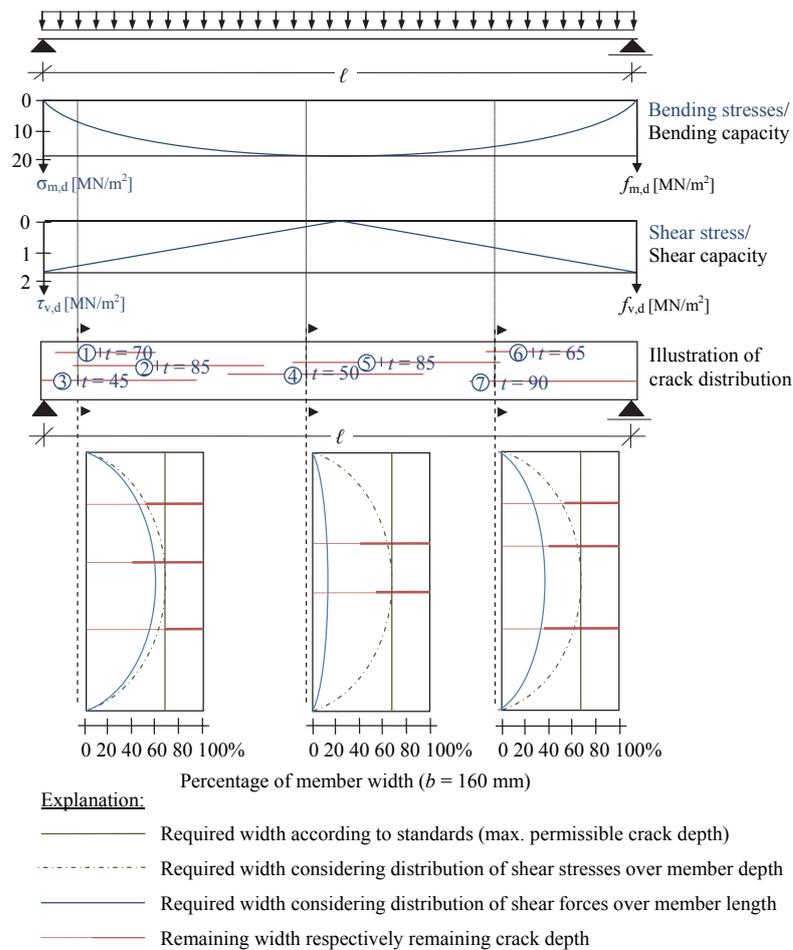


Figura 3.14: Esquema da largura restante do elemento em dependência da localização e da profundidade das fendas em comparação com a largura requerida para transferir as tensões existentes, aqui as tensões de corte, (Dietsch, 2012, Dietsch & Schänzlin, 2010).

3.3.3 Resistência ao corte de vigas de MLC com fendas

A presença de fendas em vigas de madeira, reduz a área efetiva de corte, conseqüentemente essa redução traduz-se na diminuição da resistência ao corte. O coeficiente k_{cr} introduzido no EC5 (EN 1995:1-1), toma valores de 0.67 para MM e MLC, e 1.0 para os restantes produtos derivados, e é multiplicado pela largura de corte da secção transversal. Em termos de cálculo da capacidade resistente ao corte de secções de madeira, com este fator, está-se a considerar que a secção apresenta uma fenda com profundidade de 1/3 da largura de corte, situada à altura para a qual as tensões são máximas, sendo em secções retangulares a meia altura, e em pontos críticos do elemento relativamente a esforços cortantes, onde é necessário se proceder à verificação da resistência ao corte dos elementos estruturais.

Um texto sobre pesquisas anteriores, é apresentado por Pousette & Ekevad (2012) no ponto 1.2. Neste texto são apresentadas recomendações de como determinar a resistência ou corte, qual

o procedimento de ensaio mais adequado e a respetiva norma a adotar (1 carga a meio vão, 3 pontos de flexão, [EN 408, 2010b](#)). Afirma-se que a madeira estrutural (MM) é mais apropriada que a MLC para ensaios deste género, por ser mais propícia ao surgimento de fendas, quando o objetivo é avaliar o efeito que estas têm na resistência ao corte. De seguida serão sumariadas algumas conclusões e observações de estudos e experiências levadas a cabo por autores neste texto citados ([Pousette & Ekevad, 2012](#), 1.2).

Soltis & Gerhardt (1988)

- a resistência ao corte é dependente da profundidade da fenda quando esta é maior que 30%;
- a resistência ao corte poderá ser influenciada pelo fenómeno designado por *efeito de volume* (a resistência diminui com o aumento de volume);

Schickhofer & Obermayr (1998)

- a resistência ao corte parece ser independente da qualidade da MLC (refletido nos trabalhos de Estandarização do EC5 e da EN 1194);

Klapp & Brüninghoff (2005):

- demonstrou existir, com recurso a um modelo de simulação desenvolvido, que existe efeito de volume na resistência ao corte;

Steiger & Gehri (2011):

- estudou a interação entre as tensões de corte e as tensões de tração perpendiculares às fibras, por meio de ensaios de vigas reforçadas ao corte no apoios com varões embutidos em cola;

Sundström et al (2010):

- demonstrou por meio de ensaio de vigas de secção retangular, que não existe efeito, na resistência ao corte, devido a gradientes de teor em água nem das fendas que estes promovem;

Barrett & Foschi (1980):

- constatou, por meio do estudo da resistência ao corte de vigas com fendas nas extremidades, que estas podem estar posicionadas sobre os apoios e por essa razão não constituem um risco quando carregadas;
- reforça a importância das linhas de colagem no comportamento ao corte de vigas de MLC, e que são feitos testes regulares de delaminação durante o controlo de qualidade do processo de fabrico;

Steiger and Gehri (2010):

- propuseram novos métodos de teste das linhas de colagem para uma maior consistência dos resultados obtidos e boas práticas de teste.

No entanto, constata-se que existem muitos poucos artigos acerca da influência das fendas na resistência ao corte de vigas de madeira.

Nem todos os países fazem uso do fator k_{cr} para o cálculo da resistência ao corte. Na indústria sueca de fabrico de MLC, não se observaram quaisquer problemas de falhas por corte devido a fendas, em cujos elementos, este fator foi aplicado. Estes valores têm se mostrado adequados ao longo de muitos anos de experiência. Por isso, é necessário e de maior interesse obter mais conhecimento acerca de vigas de MLC com fendas, ou se há algum motivo para adotar valores diferentes deste coeficiente na Europa, visto a aplicação deste coeficiente poder ter impacto direto na competitividade apresentada pela MLC, por ter como consequência o aumento da largura da secção transversal, resultando obviamente em custos acrescentados indesejados.

O efeito das fendas na resistência ao corte, é uma questão importante, por não ser ainda muito claro. Além disso, não apenas a presença de fendas deve ser estudada, mas também as suas características geométricas e posição relativa, em termos do seu impacto na resistência ao corte de vigas de MLC. O objetivo do projeto levado a cabo por [Pousette & Ekevad \(2012\)](#) é precisamente este, no qual foram testadas vigas de MLC com vários tipos de fendas, criadas artificialmente, ver Fig. 3.15. Este estudo proporcionou uma base para a escolha do valor do coeficiente k_{cr} , dependendo de várias condições.

Para induzir fendas artificiais foi utilizada uma serra, já no caso das “fendas naturais” estas foram originadas por ciclos de humedecimento e secagem, ao longo dos quais foram feitas medições da temperatura, da humidade relativa, do teor em água e claro das propriedades geométricas das fendas, que devido a este processo foram ocorrendo. Provou-se que a indução de “fendas naturais” em vigas de MLC é bastante difícil, e requer procedimentos especiais, para provocar fendas de dimensões consideráveis. Atente-se, que as vigas de MLC foram especialmente desenvolvidas para que tais fendas sejam difíceis de ocorrer. Contudo devem-se testar vigas de MLC ao corte com fendas provocadas por ciclos de secagem e humedecimento que simulem as condições climáticas mais desfavoráveis, como é o caso das condições húmidas durante a montagem, e a posterior secagem a que as vigas são sujeitas quando montadas em ambientes internos e muito secos. Outro aspeto importante passa por estudar a influência de tratamentos superficiais com produtos preservadores, no tipo de fendas e no seu desenvolvimento, que poderão ocorrer sob as condições anteriormente mencionadas. Tais estudos foram realizados em próximas séries de teste, de acordo com [Pousette & Ekevad \(2012\)](#).

Constatou-se que as maiores “fendas naturais” ocorreram maioritariamente nas superfícies tangenciais da lamela com a medula localizada ao centro da lamela, embora essas fendas não tenham causado falhas por corte. A fratura toma o caminho mais direto ao longo da largura da secção transversal. Foram observadas ainda um certo número de fendas nas redondezas da linha interlamelar, principalmente no caso de não haverem lamelas com superfícies tangenciais. A

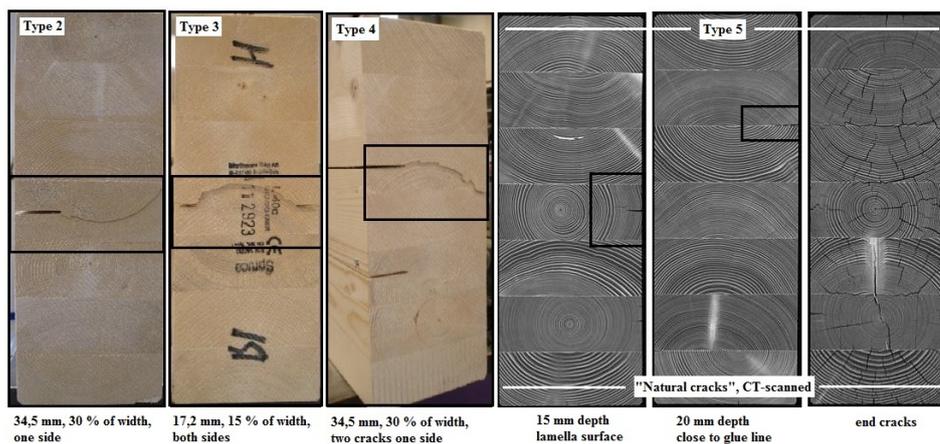


Figura 3.15: Configurações testadas e falhas típicas de corte para diferentes posições de fendas artificiais testadas (Pousette & Ekevad, 2012, Fig. 2-3).*

* Vigas testadas: Tipo 1 - sem fendas (10); Tipo 2 a 5 - (5) para cada tipo; Dimensões das vigas: 115 mm x 315 mm x 2600 mm; Vigas fabricadas na Suécia e de acordo com as regulamentações lá vigentes (CE L40c), retiradas diretamente do processo de produção; ensaiadas ao corte de acordo com a EN 408 (2010b). Nota: falhas por flexão significa que a resistência ao corte foi pelo menos o valor de cálculo ($3.5 / \gamma_M$ MPa).

localização das fendas demonstrou ser dependente da orientação das lamelas (padrão da secção transversal). As fendas causaram por vezes falhas por corte. Fendas nas extremidades ocorreram, prolongando-se até 70 mm da extremidade (Pousette & Ekevad, 2012).

Quanto às fendas realizados por corte, por exemplo, no caso das vigas do tipo 2 (ver Fig. 3.15), houve uma que falhou a uma carga muito inferior que as outras, e a explicação para tal acontecimento, está relacionada com a largura dos anéis de crescimento da lamela que continha a fenda, por serem muito largos e diferentes das outras lamelas. Em uma viga do tipo 3 (ver Fig. 3.15), a falha por corte ocorreu na lamela inferior à lamela que continha a fenda artificial (corte de serra). A falha por corte seguiu mais frequentemente o anel de crescimento imediatamente à ponta de corte, só em alguns casos é que esta se propagou até à lamela adjacente. A falha por corte ocorreu na interface entre o lenho Primavera e o lenho Outonal. Anéis de crescimento estreitos resultaram em alta resistência ao corte. A orientação das lamelas conjuntamente com a curvatura dos anéis anuais de crescimento, determinaram a forma e tamanho da área de corte. Os cortes atravessaram as fibras dos anéis de crescimento, o que é irrealista em comparação a fendas reais na madeira (Pousette & Ekevad, 2012).

Concluindo de forma resumida, que as vigas sem fendas falharam principalmente à flexão, o valor característico da resistência ao corte foi cerca de 3.5 MPa. Vigas com fendas entalhadas obtiveram menores valores característicos de resistência ao corte, e isto significou que, uma redução da secção transversal deve ser admitida para o caso de fendas entalhadas ao longo da viga. As vigas com fendas de secagem obtiveram mais falhas por corte, mas o valor característico

da resistência ao corte das vigas foi semelhante à das vigas sem fendas (ver, [Pousette & Ekevad, 2012](#)).

3.3.4 Investigações numéricas

As atuais normas de cálculo de estruturas de madeira, em particular o Eurocódigo 5 (EC5), permitem a ocorrência de fendas superficiais nas zonas de suportes de vigas, pela introdução do fator k_{cr} , ver 3.3.1. Por isso, não existem ou são escassos métodos compreensivos capazes de determinar a influência que as fendas têm na capacidade resistente ou na rigidez de elementos estruturais de madeira. No entanto, o desenvolvimento destes métodos, para vigas com fendas repassadas é um problema atual, que não é apenas relativo à avaliação do estado técnico das estruturas existentes, mas também ao desenvolvimento de técnicas de reforço.

[Naychuk \(2013\)](#), propôs um método analítico, com base em estudos teóricos (técnicas numéricas, MEF, mecanismos de fratura, vetor de fluxo de energia ao longo da ponta da fenda, fatores de intensidade de tensões (Stress intensity factors - SIF), e em ensaios experimentais de vigas reais, para a avaliação da capacidade resistente e rigidez de vigas de madeira com fendas repassadas. Este método pode ainda ser aplicado para avaliar o estado técnico de estruturas existentes. Neste estudo foi feita uma análise paramétrica da mudança do estado de tensão extensão, dos fatores de intensidade de tensão relativos às pontas das fendas, das deformações e da capacidade de carga de vigas de madeira dependendo do comprimento v a altura da secção transversal, do comprimento da fenda v comprimento do vão, da localização da fenda em relação à altura da viga. Este método de análise é bastante útil quando se pretende determinar a relação entre os parâmetros analisados, e por conseguinte, quando se pretende mais detalhadamente identificar a influência de um dado conjunto de parâmetros, p.ex. propriedades geométricas das fendas e sua posição relativa na viga, têm na sua resistência e rigidez. Entende-se à priori, que a capacidade resistente e a rigidez de vigas de madeira com fendas repassadas dependem não só do comprimento da fenda, mas também da sua localização relativa à altura da secção transversal. As conclusões gerais que se podem retirar do estudo levado a cabo [Naychuk \(2013\)](#), e considerando a pobre resistência ao corte da madeira e o seu comportamento frágil a esta ação, não é recomendável usar madeira com fendas nestas zonas de alto esforço cortante, como é o caso de zonas de apoio e meia altura da secção (tensões de corte máximas para secções retangulares). [Naychuk \(2013\)](#) recomenda, no caso de tais fendas ocorrerem posteriormente às recomendações relativas a este propósito, o uso de parafusos para evitar a propagação da fenda por todo o comprimento da viga, pelo fato de ser difícil garantir a sua estabilidade com o tempo. Outro aspeto importante, é que neste caso (uso de parafusos), a resistência da viga com fendas deve ser determinada não apenas em termos da resistência da conexão madeira-parafusos, mas também da resistência ao corte da madeira na ponta da fenda.

Correntemente na “[Bern University of Applied Sciences](#)” estão a ser desenvolvidos métodos e guias, levados a cabo por [Magnière et al. \(2014\)](#), para a avaliação do estado técnico de estruturas existentes, que consistem em investigações numéricas da capacidade resistente residual de vigas de madeira com fendas. [Magnière et al. \(2014\)](#) propõem um modelo de cálculo analítico para estimar a redução da rigidez de vigas de madeira com fendas. O modelo é proposto apenas para calcular a redução da rigidez de vigas com fendas repassadas, pelo que foi concluído que apenas neste caso, se verificaram reduções significativas da rigidez. Por outro lado, constatou-se que a capacidade resistente é influenciada significativamente por ambos os tipos de fendas (repassadas ou não). Os resultados obtidos, mostraram que estes dois tipos de fendas, devem ser distinguidas do ponto de vista da sua influência nos parâmetros de resistência e rigidez de vigas de madeira. As principais questões investigadas, neste estudo, passa por saber até que ponto as fendas são suficientemente pequenas para o seu efeito ser negligenciado, e no caso de não o poderem ser, se existe alguma forma de prever o comportamento de vigas com fendas em função das suas características. O estudo teve como ideia fundamental comparar o comportamento de vigas de MLC sem fendas com as mesmas vigas com fendas. O desenvolvimento de um modelo de elementos finitos, foi o método utilizado para se proceder a esta comparação. Foram analisadas neste estudo vigas estreitas com consideráveis vãos por serem aquelas onde foram encontradas um maior número de fendas (ver [S. Franke & Magnière, 2014](#)). O modelo numérico utiliza elementos com comportamento linear elástico, as direções fundamentais de crescimentos foram aproximadas aos eixos cartesianos ortogonais de referência. A fenda inicial e a sua possível propagação foram simuladas com recurso a elementos de contacto, que seguem leis coesivas bilineares. Foram definidos parâmetros geométricos das fendas de modo a se poder simular o comportamento da viga para várias posições das fendas e dimensões. As vigas foram testadas à flexão com carga a meio vão, até a propagação da fenda inicial ou do início de uma nova fenda, ponto para o qual, se considera que a viga falhou, e para o qual também corresponde uma dada rigidez, força e deslocamento críticos (parâmetros obtidos do gráfico força-deslocamento do ensaio simulado). O rácio entre os valores críticos e os correspondentes relativos à mesma simulação com ausência de fenda, são uma forma de quantificar de que modo a presença de fendas em vigas reduzem o seu desempenho. As simulações mostraram que apenas as fendas repassadas resultam numa redução da rigidez das vigas. No entanto, relativamente à capacidade de carga, os resultados são menos claros. Apenas uma tendência aparece: quanto mais inferiormente estiver situada em relação à altura da secção transversal, mais profunda poderá ser, sem influenciar a sua resistência. Informações mais detalhadas à cerca do modelo proposto e a correlação entre as características das fendas e o comportamento das vigas podem ser consultadas em [Magnière et al. \(2014\)](#). A investigação levada a cabo por [Magnière et al. \(2014\)](#), onde aqui se falou de forma muito simplificada, continua em colaboração com o “[Swiss Federal Laboratories for](#)

[Materials Science and Technology](#)”. Estão a ser conduzidas experiências com o objetivo de validar com mais veemência os modelos de elementos finitos que foram desenvolvidos. Aliás, simulações numéricas serão calculadas dando foco à correlação entre a capacidade de carga e as características das fendas no caso de fendas não repassadas.

Capítulo 4

Reparação de fendas de delaminação e de retração em vigas

4.1 Reparação de fendas

A presença de fendas de secagem é um fenómeno natural e uma característica intrínseca e incontornável em estruturas antigas de madeira, nas quais não foram tomadas medidas nem tidos em consideração todos os aspetos que influenciam o seu surgimento. São vários os fatores que promovem a ocorrência de fendas de forma mais ou menos grave ou intensa. De tais fatores destaca-se principalmente as grandes amplitudes higrotérmicas a que os elementos de madeira foram sujeitos, a utilização de espécies de madeira com elevado coeficiente anisotrópico (quociente entre a retração tangencial e radial), isto é, madeiras nervosas, a colocação da madeira em obra ainda em estado verde ou no decorrer do seu processo de secagem, ou mesmo após este processo ter ocorrido, quando esta apresenta um teor em água de equilíbrio bastante desfasado daquele que irá obter no local de aplicação. As fendas em elementos de madeira são uma enorme fonte de preocupação. O conhecimento mais aprofundado acerca do comportamento e origem das fendas, é de extrema importância, pelo fato de que a sua presença são um forte indicador da estabilidade estrutural, do nível de solicitação a que um dado elemento está sujeito e da sua resistência.

Devem ser feitas várias distinções quando se trata de fendas (ver também secção 2.5):

Causa: resultantes de processos físicos (fendas de secagem ou de humedecimento, grandes amplitudes higrotérmicas), mecânicos (roturas mecânicas, alterações das condições de carregamento ou do sistema estrutural) ou combinação destes com processos de biodegradação (ataque de agentes xilófagos);

Forma: se são superficiais (requerem menor atenção), fendas profundas ou repassadas (requerem maior atenção);

Localização relativa no elemento: se estão ao não em zonas de tensões máximas de corte ou sujeitas a trações perpendiculares às fibras de madeira (zonas críticas);

Idade: se são fendas recentes (aparência fresca, interior com cor mais clara que a envolvente) ou antigas (cor escura, com acumulação de resíduos/ poeiras);

São também vários os fatores dos quais as consequências das fendas dependem, como por exemplo a sua forma e dimensão, a qualidade da madeira, a associação com outros defeitos, o tipo e função estrutural que o elemento que as contém desempenha, isto é, do tipo de esforço e nível de tensão instalada. As fendas profundas e as repassadas são as mais preocupantes, por terem maior influência na diminuição da resistência ao corte, que ocorre por consequência da diminuição da largura efetiva ao corte do elemento de madeira, principalmente quando localizadas em zonas de esforços de corte máximos, como é o caso das zonas de ligação entre elementos por meio de ligadores, cuja resistência é assim afetada. Carregamentos aplicados diretamente segundo a direção perpendicular às fibras são fortemente desaconselháveis ou mesmo considerado um erro grave quando este provoca tensões diretas nesta direção e sentido, para a qual a madeira apresenta uma resistência bastante baixa em comparação com a resistência à flexão. Por consequência das fendas de secagem que surgem contidas em planos tangenciais às fibras, a resistência à tração perpendicular às fibras vê-se ainda mais diminuída por diminuição da área efetiva à tração transversal às fibras. No caso de fendas que estejam associadas a outros defeitos como nós e fio inclinado, quando as zonas dos elementos que as contêm são sujeitas a tensões de tração por flexão ou tração simples, surgem tensões de tração perpendicular às fibras destes defeitos, que poderão resultar em fendas, que também são alvo de preocupação. Este tipo de fendas dão-nos indicação do nível de carregamento a que o elemento está sujeito, e quando estas são intensas, podem ser interpretadas como um aviso acerca da capacidade de carga do elemento, mais propriamente que esta, está próxima do limite. A distinção das fendas de acordo com a sua idade também é importante. As mais recentes apresentam uma aparência fresca e um interior de cor mais clara que a sua envolvente. As fendas recentes são alvo de maior preocupação do que as fendas antigas, no que concerne a estabilidade estrutural do elemento, isto porque estas podem indicar situações em evolução, como é o caso de mudanças de utilização ou exploração do edifício (p.ex. introdução de sistemas de ar condicionado/ aquecimento ou outros equipamentos que alteram o clima interior do edifício), que tenham resultado na alteração das condições higrotérmicas do ambiente circundante, ou no caso de um aumento do carregamento de forma direta ou resultado de uma alteração do sistema estrutural. As fendas de secagem surgem maioritariamente em elementos sujeitos a condições microclimáticas circundantes que provocam grandes variações do teor em água ao longo da secção transversal dos elementos, e assim elevados gradientes do mesmo, induzindo tensões internas transversais às fibras que, quando atingem a resistência do material, se libertam em forma de fenda. Verões secos e invernos

húmidos proporcionam tais condições principalmente em elementos expostos ao exterior, por outro lado, em climas interiores, tais condições são proporcionadas como anteriormente se referiu por mudanças de utilização ou exploração do edifício. Todo o conhecimento adquirido, tem como objetivo entender as razões pelas quais as fendas surgem em elementos de madeira, para que se possa posteriormente adotar medidas preventivas a todos os níveis possíveis de modo a evitar a sua ocorrência e dos seus efeitos indesejados. Nos casos em que tais medidas não foram aplicadas por falta de conhecimento, como é o caso de estruturas antigas de madeira, a abordagem passa em primeiro lugar por identificar as causas diretas ou indiretas que levaram ao seu aparecimento, e com base na análise atenta destas causas, proceder a medidas que alterem as circunstâncias desfavoráveis no que respeita ao surgimento de fendas, e por fim reparar as fendas. A reparação das fendas tem como principais objetivos, a sua estabilização, relativamente à sua forma, desenvolvimento e propagação. Elas devem ser colmatas por razões de durabilidade, pelo fato deste tipo de defeito natural da madeira ser potenciador do aumento da capacidade de retenção de água e infiltrações, aumentando o risco de degradação biológica, e quando sujeitas a ciclos de secagem e humedecimento intensos, se agravam com o tempo. Normalmente os elementos das estruturas de madeira, durante o seu período de vida, já foram de alguma forma sujeitos a medidas ou processos de preservação com vista o aumento da sua durabilidade. Por este motivo, no caso do surgimento de fendas e em elementos tratados apenas superficialmente, é necessário se proceder ao tratamento do interior da fenda com um produto inseticida, pela razão que a fendas irão expor camadas interiores da madeira não tratada. Contudo, por vezes não é suficiente apenas se proceder à reparação das fendas, sendo necessário tomar medidas adicionais de restauro ou reforço dos vários parâmetros resistentes e de rigidez do elemento afetado pelas fendas. Tais medidas de reparação e reforço, podem ser feitas de diversas formas e com vários meios, dependendo de cada caso e do efeito pretendido (Dashöfer, 2015).

4.1.1 Métodos tradicionais

A reparação de elementos estruturais de madeira afetados por fendas, é uma necessidade que deve ser ponderada em função da finalidade de intervenção, do custo, do grau de degradação, das características do edifício, e claro, das vantagens e desvantagens inerentes ao seu uso (Serino, 2014). Os métodos tradicionais consistem na aplicação de cintas metálicas como apresentado na Fig. 4.1, na pregagem direta dos elementos atravessando a fenda, ou na colocação de empalmes laterais que podem ser metálicos, de madeira ou derivados (ex. contraplacado ou equivalente), por forma a envolver a zona afetada pela fenda. Todos estes métodos tradicionais são limitados, na medida em que, não fecham a fenda propriamente, mas no entanto, como efeito benéfico, impedem a sua progressão. Mesmo após a aplicação destes métodos, os elementos, devem ser monitorizados periodicamente, para avaliar a eficácia da reparação mais no que concerne

à evolução da fenda (propagação das suas dimensões). No caso da colocação de empalmes laterais, a monitorização é impedida, porque estes não permitem a visualização direta das fendas, sendo uma desvantagem deste método de reparação. No caso dos restantes métodos tradicionais mencionados, todos eles apresentam intervenções que têm bastante impacto visual, algo que não é muito conveniente (Dashöfer, 2015). Sublinhe-se que tais intervenções devem ser realizadas durante o Verão ou quando a madeira atinge o seu ponto mais baixo de teor em água de equilíbrio. Esta sugestão, tem como objetivo impedir que a subsequente retração da madeira comprometa o aperto e a eficácia das cintas, ou no caso da utilização indevida ou não adequada de parafusos para efeito, levem a que estes se comportem como cunha, afastando as extremidades da fenda, e por consequência, leve esta a abrir ainda mais (Dashöfer, 2015).

Por cintagem



Figura 4.1: Reparação de fendas por métodos tradicionais (cintagem) (Dashöfer, 2015).

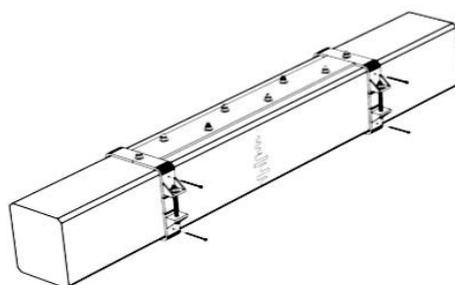
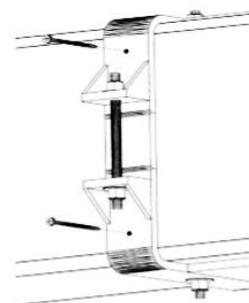


Figura 4.2: Pormenor de reforço com recurso a chapas e cintas metálicas (Mariani, 2004).



A utilização de tiras metálicas (cintas), para fechar as fendas, por mero aperto, e recorrendo a pregos eletrozincados ou de aço para as fixar ao elemento, é uma das soluções mais utilizadas em vigas de madeira com fendas de topo ou com fendas interiores longitudinais, ver Fig. 4.1. Outra solução possível de intervenção com recurso a cintas metálicas consiste na colocação de chapas metálicas nas faces superior e inferior, fixadas ao elemento com braçadeiras metálicas com aperto regulável (cintas) e por conetores espaçados longitudinalmente, p.ex. pregos, como se pode observar na Fig. 4.2. A desvantagem de ambas as soluções, é o inconveniente de serem visíveis e de serem esteticamente e materialmente distintas da situação original do elemento intervencionado. Outra desvantagem, diz respeito à dificuldade de implementação destas soluções, no caso de alguma das faces do elemento ser inacessível, obrigando por vezes a retirar tudo que esteja sobre essa face para posterior colocação das cintas, chapas metálicas e conetores. Quanto às vantagens de uma intervenção usando cintas, passa principalmente pelo fato de estas serem de fácil aplicação, rápida execução da intervenção, não carece de mão-de-obra especializada,

é pouco invasiva, de custo relativamente barato e promove o reaproveitamento do material existente. A colocação das chapas metálicas, para além das cintas, permite um aumento da resistência mecânica de um elemento sujeitos a esforços de flexão, visto que as chapas irão trabalhar tanto à compressão como à tração, e desta forma, a solução conjunta se apresenta como uma vantagem relativamente à utilização de apenas cintas (Serino, 2014). O “efeito de cintagem” promovido pelas cintas, em termos funcionais é a principal vantagem destas intervenções, por permitirem o fecho das fendas e por evitarem ou pelo menos dificultarem a sua propagação.

Com parafusos

Em intervenções de reparação de elementos de madeira, neste caso, de elementos de madeira com fendas de secagem ou humedecimento, um dos aspetos mais importantes é o nível de intrusividade, tanto estética como mecânica, provocada pelos elementos de reparação, que se pretende que seja a mínima possível, mas que ao mesmo tempo, a eficácia da intervenção por aplicação desses elementos, não deixe de surtir efeito. As soluções apresentadas anteriormente usando cintas, não estão em conformidade com estes aspetos, contudo existe uma que está. Esta técnica tem como objetivo criar uma restrição aos movimentos ortogonais ao plano que contem a fenda, e desta forma evitar a sua propagação e por consequência a sua desintegração, fazendo com que este deixe de funcionar como um todo. Para além disto, esta técnica proporciona um restauro da capacidade resistente às tensões de cisalhamento, na zona danificada pela presença das fendas, e também um enrijecimento desta zona. A Fig. 4.3, representa de forma esquemática, precisamente o resultado da implementação desta técnica de intervenção de reparação de um elemento com fendas de topo. O processo de execução consiste na criação de furos ortogonais à fenda, para posterior colocação de parafusos de porca ou de rosca parcial e anilhas, que deverão estar espaçados de 5 a 8 cm do topo da peça. As porcas deverão ser apertadas por forma a criar uma força de aperto transversal ao plano que contem as fendas e assim reduzir a sua abertura. Os diâmetro dos furos devem ser maiores do que o dos parafusos para evitar o “efeito de cunha”. Os parafusos requerem aperto periódico, que pode ser efetuado nas próprias inspeções periódicas ao elemento. Existe igualmente no mercado parafusos longos autoperfurantes com rosca pardal, que podem ser utilizados para este fim, tendo como vantagem, não ser necessário pré-furação para a sua colocação e por limitar problemas relacionados com a retração (Dashöfer, 2015, Serino, 2014). A força de fecho da fenda é efetuada pela parte roscada do parafuso situada em um dos lados da fenda e pelo aperto da cabeça contra uma anilha devidamente dimensionada e intercalada entre esta e a madeira, ficando o parafuso à

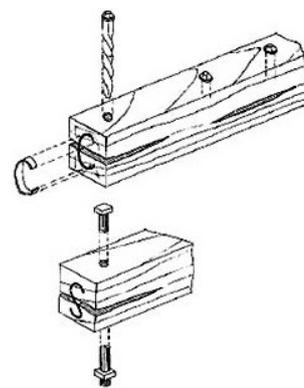


Figura 4.3: Introdução de parafusos em fenda de secagem (Johnson, 1980).

tração. Um inconveniente que se tem, quando é necessário fazer pré-furações, é a redução da largura da secção transversal equivalente ao diâmetro de furação, que no caso de este ser grande e a secção ser estreita, pode afetar a resistência do elemento (Duarte ,2004, citado em, [Serino, 2014](#)). Por conseguinte, a segurança do elemento é satisfeita se a área da secção transversal removida pelo furo não exceder a área transversal do maior nó da viga de madeira permitido pela classificação visual (Cruz, 1993, citado em, [Serino, 2014](#)).

4.1.2 Reparação e colmatação de fendas por colagem

A reparação de fendas por colagem é um método mais subtil, de invasividade mínima ou quase nula e bastante estético, que recorre à utilização de colas epoxídicas, ver Figs. 4.4 e 4.5. Estas colas ou adesivos estruturais próprios são injetados nas fendas preenchendo todo o seu interior, por meio de equipamentos e técnicas específicas. Antes da sua colocação, o interior da fenda deve ser limpo, para maximizar a aderência do adesivo às superfícies da fenda, e para que a secção se torne assim mais efetiva e mais homogénea. O preenchimento das fendas com adesivos, para além de ser uma solução estética ainda tem o benefício de limitar a retenção de água, que se irá espelhar num aumento da durabilidade do elemento. Questões relacionadas com as propriedades do adesivo (mecânicas, de aderência e viscosidade) são sempre alvo de preocupação, por estarem intimamente interligadas com o desempenho deste método de reparação no que respeita ao comportamento da interface adesivo-madeira quando sujeita a tensões derivadas das variações dimensionais da madeira, que poderão levar a roturas coesivas em forma de novas fendas ou fissuras, na madeira, no próprio adesivo ou na interface adesivo-madeira (mais comum). Quando tais roturas acontecem, o adesivo injetado na fenda, passa a ter um “efeito de cunha”, que é indesejado, e surge novamente o problema da capacidade de limitar a retenção de água, que se perde com o surgimento destas novas fissuras. Portanto, esta solução não é muito apropriada para elementos expostos às condições atmosféricas exteriores, uma vez que sob tais condições existe um risco mais elevado de delaminação, devido a variações dimensionais mais acentuadas da madeira, tendo como consequência maiores deslocamentos parciais entre os bordos das fendas, e também por propiciar um maior nível de retenção de água por contacto direto com a humidade do ambiente exterior ou até mesmo com a água das chuvas. Dever-se-à ter em atenção que esta técnica não deve ser aplicada, por si só, com o objetivo de recuperar a resistência de elementos com rotura mecânica (fraturados), dada a reduzida fiabilidade alcançada nesses casos, sendo portanto mais apropriada para reparação de fendas de secagem ou de humedecimento que possam surgir em elementos de madeira. Constate-se ainda que a influência das fendas de secagem e de humedecimento na resistência mecânica dos elementos fendilhados é mal conhecida, bem como da sua reparação com técnicas de colagem. Esta técnica, implica uma cuidadosa seleção dos materiais, requer mão-de-obra especializada e controlo de qualidade. Recomenda-se que tais

intervenções sejam feitas com a madeira no seu estado seco, de modo a evitar o risco que poderá surgir da cola vir a atuar como cunha devido ao seu endurecimento, e como já referido, forçando ainda mais a fenda em resultado da subsequente secagem e retração da madeira. Por este motivo, a cola não deverá ser excessivamente rígida, para que possa deformar-se com os movimentos da madeira sem se descolar desta e sem entrar em rotura (Dashöfer, 2015).

Injeção de fendas com cola

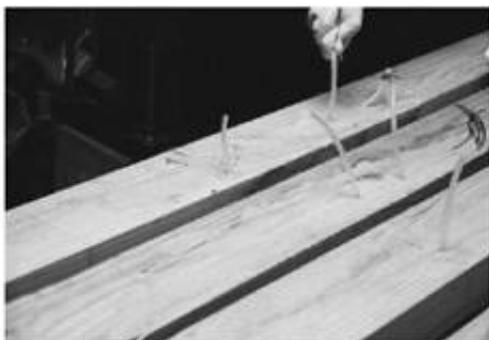


Figura 4.4: Injeção de fendas com cola (Dashöfer, 2015).

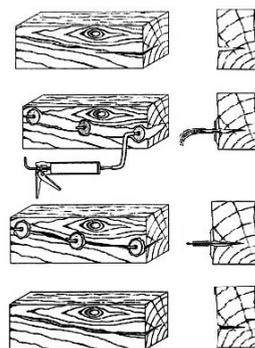


Figura 4.5: Injeção de colas epoxídicas em selagem de fissuras (Rotafix, 2007).

A injeção de fendas com cola (Figs. 4.4 e 4.5), é uma técnica que tem como objetivo colmatar as fendas, para que estas não se propaguem e não se tornem em casos mais graves (fendas de topo e repassadas), que poderiam comprometer a capacidade resistente do elemento estrutural de madeira que as contém, e também limitar a retenção de água. Assim sendo, é uma medida que deve ser tomada previamente à ocorrência de fendas de secagem ou de humedecimento mais graves. É importante referir que esta técnica de reparação de fendas não aumenta a capacidade resistente do elemento, apenas reinstala a sua integridade inicial. Por outro lado, esta técnica aumenta a resistência aos agentes atmosféricos, por limitação da retenção de água, e por funcionar como uma barreira ao transporte de água no interior da secção. A principal desvantagem desta técnica é necessitar de mão-de-obra especializada, por causa da utilização de adesivos estruturais para madeira, que requer conhecimento avançado no que respeita à sua preparação e adequabilidade, normalmente de colas epoxídicas, porque são as normalmente utilizadas para efeito. Adicionalmente, ainda se tem que considerar que este tipo de colas têm uma certa incerteza em relação ao seu comportamento a longo prazo e sob temperaturas elevadas. Como o adesivo deve penetrar em toda a profundidade da fenda e a preencher na totalidade, recomenda-se a utilização de uma cola tixotrópica com boa capacidade de penetração, devendo por isso esta apresentar baixa viscosidade. Todavia, devido à baixa viscosidade do adesivo este tende a sair das fendas, e por isso, dever-se-à selar a superfície da fenda devidamente para que tal não aconteça, e deixar pequenos orifícios para posterior injeção do adesivo de baixa viscosidade,

isto é, mais fluído, e para a drenagem do ar e do produto em excesso. A selagem da superfície da fenda, pode ser feita de várias formas, contudo, todas elas têm de ser capazes de suportar as pressões resultantes da injeção do adesivo, e claro ao mesmo tempo manter a estanquicidade da superfície da fenda. Normalmente para efeito, utiliza-se também uma cola epoxídica, mas neste caso de alta viscosidade, e de consistência adequada. Também se pode utilizar uma pequena cunha colada à superfície da fenda, que funciona como um eventual disfarce da superfície de cola. O procedimento envolve resumidamente, numa fase inicial, o avivamento dos bordos da fenda, para se obter uma superfície fresca e regular. De seguida, procede-se à limpeza da fenda por aspiração ou jato de ar e à seleção do adesivo adequado às condições microclimáticas circundantes ao elemento, que sob tais condições deverá ter boa aderência à madeira a longo prazo, recomendando-se também que este tenha um módulo de elasticidade próximo desta. Por último, procede-se ao estancamento da fenda e à injeção do adesivo. Algumas notas deverão ser atendidas no que respeita ao prazo de aplicação do adesivo após a preparação das superfícies da fenda. A colagem deverá ser efetuada num prazo de 24 horas após a preparação da superfície a colar, de forma a evitar a contaminação da zona de colagem e a consequente desativação da superfície da madeira, caso contrário, é conveniente proteger a fenda, por exemplo, cobrindo-a com um plástico, até que sejam aplicados os produtos de colagem (Dashöfer, 2015, Serino, 2014).

Colmatação de fendas com cunha de madeira colada



Figura 4.6: Colmatação de fendas com cunha de madeira colada.*

* Case Studies. Structural Timber Repair. Timber split and fissure injection method. Zootique, canada. Available. <http://www.rotafix.co.uk/case-timber-zootique.htm> [03/04/2009].

Na Fig. 4.6 é apresentada uma variante da solução anterior, que tem vindo a ser preferida. Nesta variante, procede-se a um avivamento mais acentuado, que pode ser realizado com uma serra de corte. O entalhe que fica depois da realização do corte, é preenchido com uma cunha de madeira feita à medida, por colagem, e usando adesivos próprios. Tal como a solução anterior, existem algumas recomendações a acrescentar, tais como: a cunha de madeira deve ser da mesma espécie do elemento, para uma melhor compatibilização do comportamento físico (retração), da cor e da textura da madeira (Dashöfer, 2015).

Reparação de fendas com cola epoxídica e varões de reforço

Outra forma possível de reparar fendas, passa pela conjugação das técnicas de colagem (injeção de fendas com cola - resinas epoxídicas) e o uso de parafusos ou varões (aço inox, materiais compósitos), colocados transversalmente às fendas, funcionando como reforço nesta direção, ver Fig. 4.7. Todas as recomendações mencionadas até então, são também válidas para esta solução conjunta.

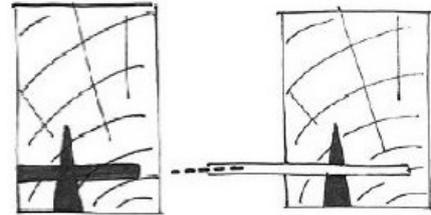


Figura 4.7: Reparação de fendas com cola epoxídica e varões de reforço (adaptado de Lopes (2009)).

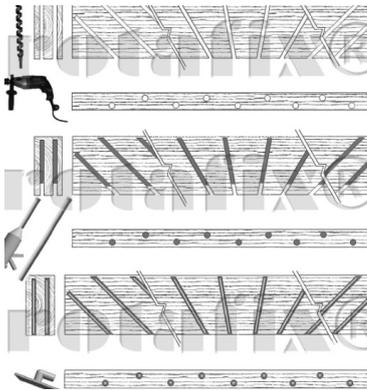


Figura 4.8: Procedimento*



Figura 4.9: Aplicação prática*

* Principal Repair Methods currently used on in-situ repair/restoration. Available: <http://www.rotafix.co.uk/presentations/index.htm> [03/04/2009].

Não obstante, no caso do elemento de madeira apresentar fendas profundas ou repassadas (ocorrem com maior frequência em MM), e delaminação significativa (refere-se à MLC), é necessário um aumento da resistência perpendicular às fibras do elemento, para restaurar a integridade do elemento, sua segurança e durabilidade. Este reforço pode ser feito através da colagem de varões metálicos ou de materiais compósitos de matriz polimérica com fibras sintéticas (PRF). É necessário ter prudência quando se menciona que o elemento foi reforçado, pois este reforço apenas aumenta a resistência do elemento ao corte e às tensões transversais às fibras (propriedades fracas da madeira). A nível do comportamento global do elemento, pode-se dizer que este é fortalecido com este reforço. Na Fig. 4.8 é apresentado o procedimento de forma simplificada e esquemática do reforço transversal de vigas de madeira com recurso a varões inclinados embutidos em cola. Na Fig. 4.9, é apresentada uma imagem de um pavilhão desportivo, cujo sistema de suporte da cobertura é composta por vigas arqueadas de grande vão, que têm sido alvo principal da aplicação prática deste reforço.

O sistema de reforço apresentado na Fig. 4.10 trata-se da solução proposta pela Rotafix® para

o fortalecimento e reforço transversal de uma viga de madeira, com varões de fibra de vidro embutidos em cola. Varões de fibra de vidro são normalmente utilizados neste tipo de aplicações, devido à sua elevada resistência e rigidez (resistência à tração e à flexão de 1000 MPa), o que os torna ideais como material de reforço e por demonstrar um bom comportamento quando sujeito a tensões de flexão, favorecendo a madeira a este tipo de ações. Além do mais, a natureza interior dos varões de fibra de vidro, oferece uma excelente resistência à corrosão, não provoca manchas na madeira, e não são afetados por solventes e tratamentos de preservação aquosos para a madeira.



Figura 4.10: (Rotafix, 2009)

Esta solução tem como objetivo principal a reparação da delaminação e o fortalecimento e melhoramento do comportamento global do elemento. Os adesivos utilizados devem ser compatíveis com a função que irão desempenhar, isto é, se são para fixar os varões de reforço ou para reparar fendas de delaminação. Os adesivos compatíveis apresentados pela Rotafix[®], para este tipo de soluções, são: TG6 (ancoragem), RSA (ancoragem e reparação de fendas), CB10T (reparação de delaminação) and Timberset[®] (ancoragem). Em 4.1.3,

será abordado mais detalhadamente a reparação da delaminação das juntas coladas em MLC e de fissuras, respetivas técnicas e adesivos existentes no mercado para efeito.

4.1.3 Reparação da delaminação das juntas coladas em MLC e de fissuras

À semelhança das vigas de MM, as vigas de MLC também estão propícias ao surgimento de fendas e fissuras. Contudo, a MLC surge como um avanço tecnológico da MM, tornando as secções com características mecânicas mais homogêneas e menos variáveis. Pequenas secções de MM são aglutinadas, com recurso a adesivos, constituindo a secção de MLC. O padrão constituinte das secções da MLC, propicia uma maior estabilidade dimensional, e por consequência, uma menor propensão ao surgimento de fendas e fissuras. No entanto, elas ocorrem, mas com menor intensidade e dimensões. As fendas inerentes às lamelas são reduzidas e pequenas, em comparação às que surgem em secções de MM. Embora o processo de fabrico da MLC esteja estandardizado e sujeito a controlo de qualidade (ex. testes laboratoriais), este não está livre da ocorrência de defeitos de produção, devido à natureza do mesmo. A deficiência mais comum, é a relativa ao processo de colagem que compromete a qualidade da junta interlamelar. Entretanto, é necessário identificar a natureza do fenómeno de delaminação da junta interlamelar, suas características e modos de rotura, quais as causas inerentes à sua ocorrência, quando e em que circunstâncias é que se evidencia com maior frequência, e quais os procedimentos estandardizados que devem ser adotado, caso possíveis, para reinstalar a integridade da linha de colagem e do elemento

estrutural que as contêm.

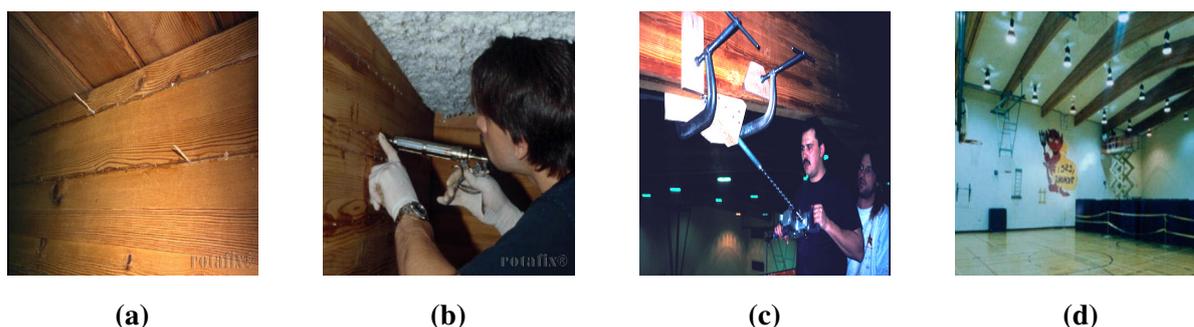


Figura 4.11: (a) Estrutura de MLC com dois meses com delaminação e fissuras; (b) Reparação da separação das lamelas por micro-injeção; (c&d) Preparação da reparação de vigas de MLC, por meio da realização de furos de 12 mm para a colocação de varões de reforço de GFRP; (Smedley, 2008, Fig. 7.7-8).

A delaminação consiste na separação parcial das lamelas, por rotura da junta interlamelar colada, em forma de fenda ou fissuras, na maioria dos casos. Também podem ocorrer no interior das lamelas devido ao processo de secagem. Fissuras com 0.3 a 3 mm de espessura e 100 mm de profundidade são típicas em estruturas de MLC após 3 a 4 semanas após montagem, ver Figs. 4.11a e 4.11b. Podem ocorrer dois modos de rotura por delaminação, sendo o mais comum, a falha adesiva do adesivo à superfície de madeira, ou muito raramente, a falha coesiva interna ao próprio adesivo. As causas inerentes à ocorrência de fendas e fissuras nas lamelas ou na junta interlamelar colada (delaminação), estão todas elas direta ou indiretamente relacionadas com a higroscopicidade associada à substância lenhosa e ao respetivo fenómeno de sorção, que esta apresenta sob condições termo-higrométricas do ambiente circundante, (ex. processo de secagem). No caso da delaminação esta pode ocorrer também devido a falhas ocorridas durante o processo de fabrico da MLC, que resultam, p.ex. da falta de adesivo, das más condições de cura, em geral devido a um deficiente processo de colagem “em fábrica”. As falhas interlamelares ocorrem relativamente rápido, mesmo durante o processo de montagem ou pouco tempo depois (semanas ou meses) do fecho da obra. Em elementos estruturais, eventualmente montados no interior dos edifícios, o inadequado armazenamento e proteção dos componentes, entre ter deixado o fabricante até à sua montagem no edifício, tem sido apontado como uma das causas da falha da junta interlamelar. Por restrições contratuais, estes elementos são deixados desprotegidos ao ar livre, e quando montados em ambientes interiores secos (ex. estruturas sujeitas a controlo ambiental tais como ar condicionado), vê-se desta forma intensificado o aumento das tensões internas, devido a acentuados gradientes de teor em água, maximizando a probabilidade da ocorrência destes fenómenos de fendimento da madeira, que no caso de temperaturas extremas pode até resultar em fissuras no interior das lamelas. É necessário atender que estas deficiências, normalmente só se tornam visíveis quando os elementos são carregados,

principalmente naqueles, em que a sua geometria ou as condições termo-higrométricas em que estão inseridos, se apresentam como aspetos desfavoráveis, como é o caso de vigas curvas de coberturas e de pontes. Se a deterioração interlamelar (ocorrência de fendas ou fissuras) for observada numa fase inicial, nas primeiras semanas ou meses após montagem dos elementos estruturais de MLC, então existem procedimentos estandardizados com vista a reinstalar a integridade da linha de colagem, que passa pela injeção de adesivos próprios, que necessitam de pouca pressão, com vista a selagem total da junta interlamelar. Posteriormente à total cura dos adesivos, utilizados no procedimento anteriormente mencionado, seguem-se operações secundárias e importantes de reforço. Estas consistem na realização de furações de diâmetro apropriado através de todo o conjunto de lamelas e depois disso injetando nos furos normalmente um adesivo epóxi, dentro dos quais são inseridos varões de reforço metálicos ou mais usuais, de GFRP (Fig. 4.11c). Um exemplo prático da aplicação desta metodologia de reforço e reparação é ilustrada na Fig. 4.11d, aplicada à zona dos apoios de um conjunto de vigas de cobertura de 18 metros de vão (1.2 metros de altura a meio vão e 0.75 metros nos apoios) de um pavilhão desportivo. As fissuras de delaminação foram injetadas primeiramente como descrito anteriormente e como ilustrado na Fig. 4.11b. A segunda operação passou por realizar uma série de furos de 16 mm de diâmetro centrados e espaçados de 300 mm atravessando todas as lamelas com um ângulo de 30 graus com a horizontal. Os furos realizados foram limpos, e injetados com um adesivo epóxi de duas componentes, e logo após, os varões de GFRP foram rotacionados pelas furações preenchidas por este adesivo. Esta reparação e reforço é muito mais económica e estética (reforço ocultado e esbelto), que a solução anteriormente adotada numa ação semelhante, que utilizava grandes placas de aço aparafusadas às faces laterais das vigas, e necessitava de substituir a cobertura existente (reforço com grande impacto visual e robusto),(ver p. ex. [Bell, 2007](#)),([Smedley, 2008](#)).

Técnicas de reparação de fendas de retração ou de delaminação

Vários sistemas de reparação da junta interlamelar são apresentados por [Lehringer & Salzgeber \(2014\)](#) em função da sua origem (País), viscosidade, tempo de cura e máxima espessura da linha de colagem (ver [Lehringer & Salzgeber, 2014](#), Tab. 1). São ainda feitas observações acerca dos regulamentos, requisitos e restrições atualmente vigentes (Europeias e Nacionais - Suíça, Alemanha e Áustria) relativas à aplicação de adesivos em estruturas de MLC e para reparação de fendas de retração e delaminações, que podem ocorrer neste tipo de estruturas. Isto tudo, deve-se ao crescente interesse e necessidade que se tem vindo a observar, a nível Europeu, pela procura deste tipo de tecnologia. Na Fig. 4.12 é apresentado o resultado final da aplicação de 3 destes sistemas de reparação, cuja metodologia pode ser consultada detalhadamente e passo a passo, em ([Lehringer & Salzgeber, 2014](#), 3.).



(a) GSA Resin n'H Lungern

(b) Purbond® RE 3040, RE 3064

(c) Jowat 692.30

Figura 4.12: Resultado de diferentes métodos de reparação (por derramamento ou injeção) usando diferentes adesivos (Lehringer & Salzgeber, 2014, Fig. 1).

Com base nos resultados de um programa extensivo de testes (Radovic & Goth, 1992a,b), na Alemanha foi recentemente certificado um sistema de resina epóxi para reparação de linhas de colagem abertas, e tem sido largamente usado. O estudo incluiu ambos os testes de resistência em vigas de grandes dimensões e testes à escala laboratorial usando parâmetros mecânicos e climáticos (Geidner, 2003). O adesivo WEVO EP 20/VP1 com endurecedor B20/1 foi testado positivamente pela MPA University of Stuttgart com o propósito de colagem de fendas em elementos de madeira. Em contraste com as técnicas de colagem da linha interlamelar mostradas na Figs. 4.11a e 4.11b e à operação de reforço com varões (Figs. 4.11c e 4.11d) onde nas quais foram utilizados adesivos de cura lenta, superior a 4-5 horas, o adesivo epóxi alifático de duas componentes, designado por Rotafix® CB10T, tem um módulo de elasticidade de 2.4 GPa (modo de rotura dúctil), comparativamente com o adesivo epóxi convencional de duas componentes 4.5-6 GPa. Este adesivo tixotrópico é de fácil aplicação, horizontal ou vertical ascendente, e é idealmente adequado para colar linhas de 1.5 a 6 mm de espessura (Smedley, 2008), para além de poder ser usado para ancorar varões. Atualmente tem sido produzido e marcado um adesivo de poliuretano de 2 componentes Purbond VN 3064 (ver Fig. 4.12b) para o uso na reparação de elementos de estruturas de madeira que apresentem fendas de retração ou delaminação (Smedley, 2008).

4.1.4 Reforço ao corte de vigas de MLC com varões colados

A maioria das falhas observadas em elementos e estruturas de MLC estão direta ou indiretamente relacionadas com duas propriedades resistentes clássicas, ditas fracas e de alta fragilidade, que a madeira apresenta, sendo elas a resistência a tensões normais às fibras e a resistência ao corte paralelo às fibras. Por conseguinte, surge a necessidade de se levar a cabo projetos de investigação com o objetivo de desenvolver técnicas capazes e viáveis de reparar e readaptar

estruturas de MLC que tenham sido afetadas pelo baixo rendimento destas propriedades, no que respeita à segurança estrutural. A [MPA University of Stuttgart](#) esteve envolvida em projetos desta natureza no ano de 2006. Por vezes não é suficiente reparar as fendas segundo as técnicas de reparação de fendas anteriormente mencionadas. Nestes casos, é necessário proceder-se a tarefas suplementares de reforço, principalmente nas zonas em que o elemento afetado pela presença de fendas apresente maior solicitação ao corte (caso dos apoios) e sujeita a trações transversais às fibras como resultado da forma do elemento (caso de vigas curvas).



Figura 4.13: Vista dos varões colados nos apoios ([Aicher & Schrank, 2006](#), Fig. 2).

Com base no estudo levado a cabo por [Aicher & Schrank \(2006\)](#) serão abordados alguns aspetos importantes da reparação de vigas de grande vão com fendas, que foram reforçadas ao corte, com varões colados transversalmente (ver Fig. 4.13), e conclusões inerentes. Neste estudo foi realizado um ensaio de uma viga de 12 metros de vão na qual, a largura da secção transversal (16 cm) foi reduzida na área de maior esforço de corte (apoios, meia altura da secção transversal), em ambas as faces laterais, por meio de um corte de serra até metade da largura bruta, com um comprimento de 2 metros. A restante largura efetiva, foi reforçada por 5

varões roscados de aço de 16 mm de diâmetro colados à madeira com uma resina epóxi especial de duas componentes, [WEVO EP 20/VP1](#) com endurecedor B20/1, centrados e espaçados de 20 cm, um na vertical perto do apoio e os restantes fazendo um ângulo de 55° com o eixo da viga e atravessando-a em toda a altura (60 cm) ([Aicher & Schrank, 2006](#), Fig. 1 - Geometria da viga/ reforço e esquema de ensaio). O adesivo foi testado positivamente pela [MPA University of Stuttgart](#) vários anos antes, com o propósito da colagem de fendas em elementos de madeira, por meio de vários ensaios em vários campos de aplicação, demonstrando ser altamente adequado para a colagem/ ancoragem de varões de aço em madeira, para temperaturas não superiores a 50°C . A viga assim reforçada, falhou por flexão, e a área reforçada com maior esforço cortante e cuja largura efetiva tinha sido diminuída pelos cortes, permaneceu intacta. Neste estudo foram ainda apresentados alguns resultados do modelo computacional de elementos finitos em áreas de tensões e forças relevantes na MLC e nos varões de aço, através dos quais se constatou que a distribuição de tensões estava de acordo com a avaliação qualitativa do engenheiro, isto é, como esperado. Segundo os cálculos, as tensões na linha de colagem do reforço, alcançou a resistência média ao corte da linha de colagem, para o mesmo nível de carga para a qual, a capacidade resistente à flexão do elemento foi atingida. Além disso, a análise revelou que a falha por corte da estrutura está bem abaixo do nível de carga dado pela capacidade resistente à flexão, e é improvável. Note-se que tudo isto foi avaliado e comprovado com testes à escala real. Está

em curso, o desenvolvimento de um modelo analítico apropriado para o projeto deste tipo de reforço. Concluindo, o estudo revelou que a aplicação de varões inclinados de aço, representam um método versátil e de fácil aplicação para o reforço de vigas de MLC com ou sem fendas (Aicher & Schrank, 2006).

4.2 Reparação de vigas com fendas

4.2.1 Sistema de armadura interna

O sistema de armadura interna, consiste em armar a viga segundo um sistema treliçado, que pode ser realizado com recurso a parafusos autoperfurantes ou varões, sejam eles roscados ou não, de materiais FRP's, ou de aço, embutidos em pré-furações e colados com resinas epoxídicas. Os elementos de reforço são colocados usualmente na diagonal para tirar proveito do efeito de tiragem. A utilização de parafusos autoperfurantes destaca-se, por serem de fácil e rápida aplicação ao contrário da utilização de varões, que obriga a uma maior quantidade de mão-de-obra especializada e de ferramentas específicas. A utilização de parafusos, obriga posteriormente, à reparação das fendas segundo os métodos anteriormente mencionados em 4.1, enquanto que a utilização de varões e resina epóxi, devido à sua metodologia de aplicação, repara de uma só vez as fendas e o elemento que as contêm, embora esta seja de difícil execução. O sistema de armadura interna, foi criado inicialmente com o objetivo de reparar vigas com graves fendas de secagem, que são inevitáveis em vigas de grandes secções esquadriadas de madeira maciça. Este sistema de reforço interno, tem como objetivo cozer as fendas, evitando a sua propagação, e para além disso, diminui a falta de homogeneidade característica da madeira, por aumento da resistência perpendicular às fibras e da resistência ao corte. Deste modo, este reforço confere à viga um certo enrijecimento, que resulta de um ligeiro aumento da rigidez ao corte, duma menor variabilidade das suas propriedades resistentes, da diminuição da probabilidade de ocorrência de possíveis roturas imprevistas, devido à presença de defeitos naturais na madeira, com maior influência na zona de fibras tracionadas. Contudo a adoção deste sistema de reforço, carece sempre de uma análise detalhada de custo-benefício, e apenas deve ser aplicado no caso de vigas que não apresentem madeira que tenha sido sujeita a ataques de fungos ou insetos xilófagos. De seguida serão abordadas mais detalhadamente as soluções de reforço de vigas com armadura interna, mencionando os respetivos estudos realizados e resultados experimentais obtidos.

Parafusos auto-perfurantes de dupla rosca inclinados

Devido ao forte desenvolvimento dos parafusos, que tem ocorrido nos últimos anos, observaram-se certas melhorias, sendo elas: o alargamento da gama de aplicações, o melhoramento das suas características resistentes, a facilidade de aplicação, entre outros. Tais melhorias, levam a que

estes sejam alvo de preferência e cada vez mais utilizados em construções de madeira, algo que se tem constatado. O forte interesse por este conector na realização de ligações entre elementos de madeira, levou à criação de parafusos com características melhoradas, comparativamente com os parafusos convencionais para madeira. Os parafusos autoperfurantes de rosca contínua, surgem como resultado do avanço tecnológico apresentado para este tipo de conector estrutural para madeira, fazendo com que o interesse e a procura por estes, se tenha intensificado ainda mais. A facilidade de aplicação, necessitando-se apenas de uma ferramenta elétrica portátil e auto-carregável para os aplicar, e ainda pela vasta gama de tamanhos (comprimentos e diâmetros) disponível no mercado, veio potenciar essa procura. Estes parafusos foram especialmente endurecidos por forma a alcançarem uma elevada resistência à tração de até 800 N/mm^2 , sendo assim capazes de suportar elevadas forças axiais, mesmo com pequenos diâmetros de secção interna. Estes parafusos apresentam rosca contínua e melhorada, o que permite uma grande transferência de forças de aderência (de corte), resultando numa elevada resistência ao arrancamento (Trautz & Koj, 2009).

Por conseguinte, devido à alta resistência e à aderência contínua que estes parafusos apresentam, surge inevitavelmente a ideia/ conceito de “madeira armada”, onde se utilizam parafusos autoperfurantes de rosca contínua como reforço interno de elementos de madeira e suas ligações, similarmente às estruturas de betão reforçado (betão armado) (Trautz & Koj, 2009).

No entanto, é necessário entender e defender a importância da necessidade da aplicação de reforço interno, em elementos de madeira, utilizando parafusos autoperfurantes de rosca contínua. Esta abordagem, resulta portanto, na sua maioria em estruturas especiais de madeira que apresentam anisotropia distinta. A necessidade de reforço interno, tem como objetivo essencial e prioritário, aumentar a resistência da madeira à tração perpendicular às fibras e ao corte. Estas duas propriedades mecânicas, são designadas como sendo as propriedades fracas da madeira. A baixa resistência à tração perpendicular às fibras é uma das causas do surgimento de fendas de secagem, que por sua vez tendem a diminuir a largura efetiva resistente ao corte dos elementos estruturais de madeira, adicionando-se o fato desta ser relativamente baixa comparativamente com a resistência longitudinal, vê-se deste modo aumentado o risco da ocorrência de roturas imprevistas. Portanto, revela-se por meio dos fatos mencionados, a necessidade do aumento do desempenho dos elementos de madeira relativamente às propriedades resistentes perpendiculares às fibras e ao corte. O aumento do desempenho, aumento da resistência e rigidez do elemento, pode ser alcançada por meio de um reforço sistemático, que pode ser total (por todo o elemento) ou localizado (zonas críticas, p.ex. zonas de corte máximo, de tensões de tração perpendiculares às fibras e de carregamentos concentrados), com parafusos de rosca contínua, colocados segundo estas direções. Os parafusos devem por isso, ser capazes de suportar tensões de tração e de compressão perpendicularmente às fibras e tensões de corte diagonais às fibras. O reforço interno

de elementos de madeira difere do reforço do betão, onde os varões de reforço são colocados para resistir às tensões de tração que o betão frágil não consegue resistir, enquanto que nos elementos de madeira estas tensões de tração paralelas às fibras são resistidas pela considerável resistência que estas apresentam nesta direção (Trautz & Koj, 2009).

A colocação de reforço interno, usando parafusos, reduz os efeitos negativos resultantes da presença de defeitos naturais e locais na madeira (fendas de secagem, nós, desvio do fio, etc.) e a defeitos artificiais (finger-joints) na MLC, que têm significativa influência no comportamento estrutural e na capacidade resistente dos elementos. A aplicação deste reforço traduz-se numa maior homogeneização do material (madeira), para além dessa melhoria já se ter verificado através do fabrico da MLC. Note-se que o reforço deve ter maior incidência na zona tracionada pelo fato de que a influência negativa dos defeitos se verificar na maioria quando estão sujeitos à tração simples ou à tração por flexão, comparativamente com provetes pequenos e sem defeitos. Por este motivo o reforço adicional na zona das fibras tracionada, pode ser uma medida efetiva com vista o aumento da capacidade resistente. Desde os elementos de MM até ao fabrico de elementos de MLC, teve-se preocupação em diminuir a variabilidade e a falta de homogeneidade, que são a causa da grande variação das propriedades de resistência e rigidez de elementos estruturais de madeira. O reforço interno com parafusos, demonstrou ser uma medida capaz de intensificar ainda mais a diminuição da variabilidade apresentada pelos elementos estruturais de madeira e trazer efeitos benéficos tanto em relação à resistência e rigidez destes, como à sua durabilidade (Trautz & Koj, 2009).

Na Fig. 4.14 são apresentados dois dos sistemas de treliças internas, usando parafusos autoperfurantes de rosca contínua, estudados por Trautz & Koj (2009), e seu efeito na rigidificação ao corte, comparado com a viga de madeira não reforçada. O maior aumento de enrijecimento ao corte verificou-se especialmente para o sistema que apresentava a treliça de escoras e tirantes diagonais, que permitia assim transferir de modo mais eficaz as forças de tração e compressão. O sistema treliçado constituído por tirantes diagonais e escoras idealizadas (madeira à compressão não reforçada), teve um menor desempenho à compressão devido à baixa rigidez à compressão transversalmente às fibras. Contudo, demonstrou um ligeiro enrijecimento comparativamente à viga não reforçada, muito devido ao efeito de tiragem e de fecho de junta provocado pelos parafusos que constituem os tirantes. O enrijecimento e os efeitos mencionados, resultado do reforço interno com parafusos, é ideal na reabilitação de estruturas, principalmente em vigas que apresentem fendas de secagem.

É apresentado por Dietsch et al. (2013), uma aproximação analítica para determinar a capacidade resistente de vigas de madeira intactas e em estado fraturado, caracterizando-se o reforço ao corte por varões roscados ou parafusos de rosca total.

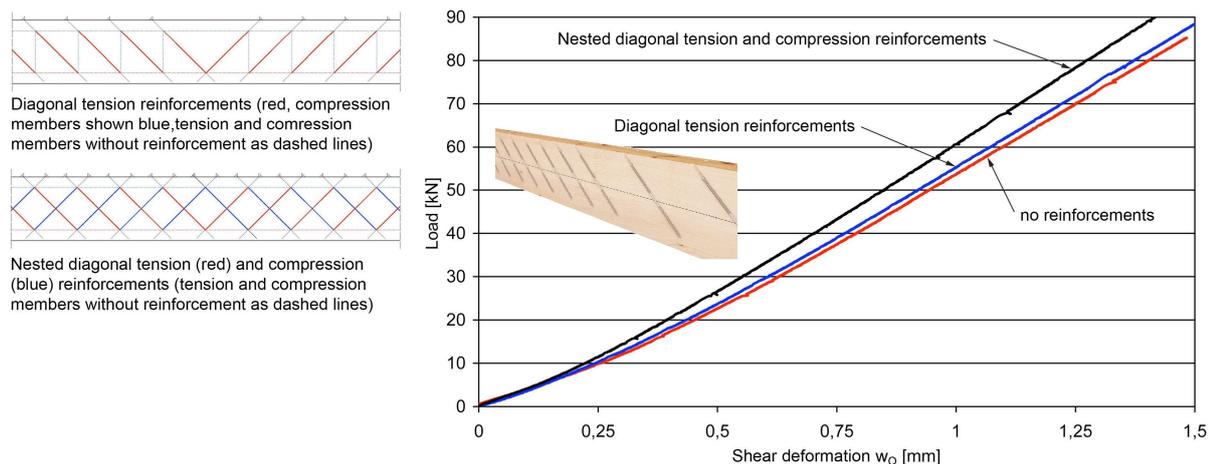


Figura 4.14: Efeito de diferentes sistemas de reforço para enrijecimento ao corte elementos de MLC, adaptado de (Trautz & Koj, 2009, Fig. 6), (Rothoblaas, 2015).*

* A configuração dos ensaios foi realizada de acordo com os métodos de medição da norma DIN EN 408 com vigas de MLC da CR: GL 24 e secção transversal de 16 x 32 cm.

Varões inclinados ou armadura triangular colados com resina epóxi

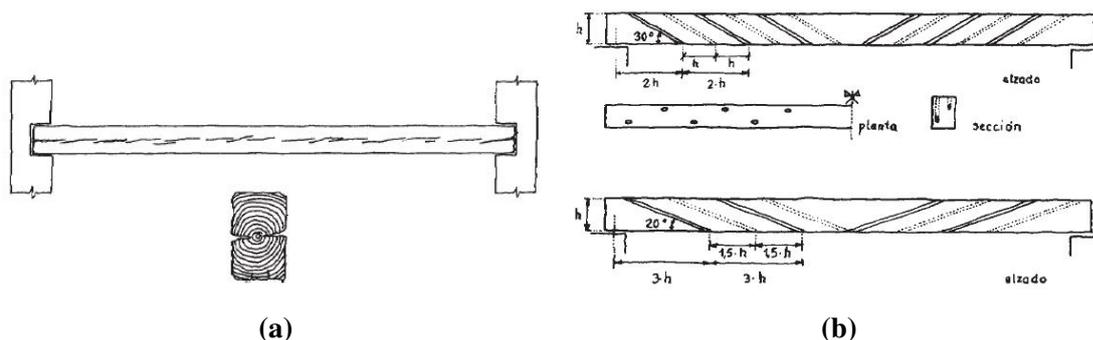
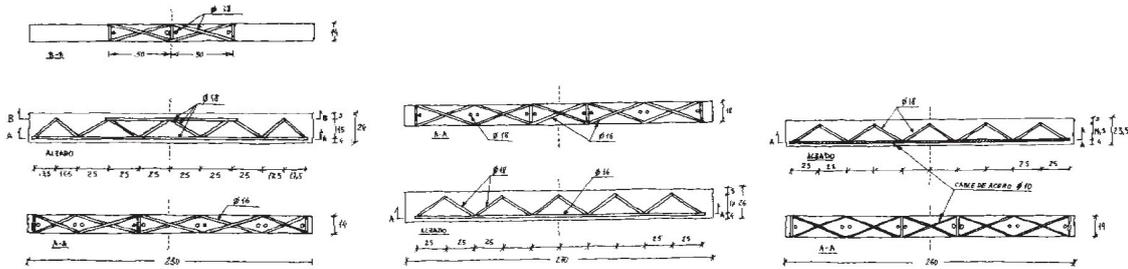


Figura 4.15: Reforço de vigas, (a), mediante uma armadura interior, cozimento das fendas com varões inclinados (sistema beta), (b), (Arriaga et al., 2002, Figs. 6.25-6.26).

Segundo Arriaga et al. (2002), o aparecimento de grandes fendas de secagem em secções esquadriadas é de certo modo inevitável e tendem a dividir a secção transversal em duas partes acopladas. Estas surgem como consequência da secagem da madeira e do surgimento de tensões associadas resultantes da retração diferencial, maior na direção tangencial do que na radial. Consequentemente as fendas, surgem no plano radial e na sua direção e afetam o plano médio da secção. No entanto, também podem surgir nas faces inferiores e superiores (Arriaga et al., 2002). Uma das formas de reforço, que tem sido aplicada para reforçar vigas de madeira com grandes fendas de secagem, consiste na realização de costura, com varões inclinados (ângulos compreendidos entre os 20 e os 30 °), ver Fig. 4.15, (Arriaga et al., 2002).



(a) Malha de varões de fibra de vidro (armadura de compressão e de tração); (b) Malha de varões de fibra de vidro (armadura de tração); (c) Malha de cabo de aço em tração e barras de fibra de vidro nas diagonais;

Figura 4.16: Reforço de vigas com armaduras internas (Cigni, 1981), retirado de [Arriaga et al.](#), Fig. 6.27.*

* 4 vigas (3 de abeto e 1 de castanho), 140 x 240 mm até 190 x 270 mm e 2000 a 2100 de comprimento.; as três de abeto se desdobraram com o fim de se poder comparar os resultados ensaiados da metade ao natural com a outra metade reforçada.

Procedimento: (1) Realizar furos escalonados e com a inclinação pretendida, a partir da face superior para a colocação dos varões de reforço; (2) Selar as fendas nas faces das vigas; (3) Colocar os varões de reforços nas furações realizadas; (4) Verter ou injetar uma formulação epóxi, normalmente sem cargas, nas furações realizadas.

Nota: A formulação epóxi deve penetrar nas cavidades, nos varões e nas fendas, para que desta forma se consiga que o elemento reforçado (viga com fendas de secagem), volte a ser uma só secção solidária.

Desvantagens: Processo de execução difícil e demorado (**Nota:** ver procedimento, tempo de cura da resina). A resina pode-se escapar por qualquer orifício que não tenha sido devidamente selado. Requer mão-de-obra especializada relativamente à utilização de resinas e pelo processo de injeção das mesmas ser complexo. É um reforço que requer de ante-mão uma análise detalhada de custo-benefício, antes de se tomar qualquer decisão, isto é, se a diminuição da deformação conjuntamente com a incerteza que vem com o fator de não se ser capaz de quantificar o seu efeito à priori, compensa em relação ao trabalho a realizar e seu custo.

Ensaio experimentais: [Arriaga et al. \(2002\)](#) cita um estudo levado a cabo por Cigni (1981), onde se comprova a eficácia deste tipo de reforço mediante a colocação de armadura interna, formando uma malha triangular fixa com resina epóxi injetada. As 3 soluções de reforço estudadas são as apresentadas na Fig. 4.16. As vigas foram ensaiadas à flexão com carga aplicada a meio vão. Os resultados obtidos dos ensaios demonstraram um efeito significativo na redução da flecha da viga, maioritariamente devido ao efeito de rigidificação que este reforço de armadura interna confere às vigas. As vigas apresentaram comportamento elástico, com um aumento da tensão de

rotura em cerca de 32 a 42% e uma diminuição da flecha em 59 a 76% em relação à viga não reforçada (viga de referência). Um aspeto importante, é que não se descreve se existia ou não continuidade entre as barras de reforço, o que poderá influenciar de certo modo os resultados obtidos e o modo de rotura final.

4.2.2 Sistema misto (armadura interna & armadura de flexão)

O reforço de elementos estruturais de madeira, recorrendo à colocação de uma armadura interna, como abordado em 4.2.1, tem como principais consequências: o enrijecimento do elemento, a distribuição mais uniforme das tensões internas, a uniformização e a diminuição da variabilidade apresentada pelas propriedades de resistência e rigidez da madeira por diminuição do risco de ocorrência de roturas “imprevistas” devido à presença de defeitos naturais situadas em zonas de fibras tracionadas, a melhoria na capacidade resistente ao corte e à tração perpendicular às fibras (propriedades fracas da madeira), a sua reparação, o restauro da sua integridade, e a diminuição do risco de propagação das fendas. Como é óbvio, este reforço conjuntamente com a reparação das fendas segundo os métodos descritos em 4.1, reflete-se numa maior durabilidade do elemento estrutural e por isso numa maior segurança a longo prazo. Embora o reforço por meio de uma armadura interna apresente muitos benefícios, este por si só, não aumentam a capacidade resistente à flexão do elemento estrutural. É necessário atender ao contexto em que este reforço se insere, isto é, se estamos perante uma reparação de uma viga danificada por fendas de secagem ou apenas de uma medida de prevenção, com o objetivo do aumento da segurança do elemento. Devido à influência negativa que os defeitos naturais da madeira têm na sua resistência à tração, e consequentemente na capacidade resistente do elemento estrutural à flexão, mostra-se útil, a aplicação de um reforço adicional na zona de fibras tracionadas, como uma medida efetiva e preventiva, com vista a mitigação deste efeito e o aumento da capacidade resistente. Mostra-se ainda mais útil a aplicação do reforço à flexão no contexto das vigas com fendas de secagem, que por consequência direta ou indireta das mesmas, estas tendem a provocar, de certo modo, uma diminuição da rigidez ou capacidade resistente das vigas, dependendo das suas posições relativas no elemento e forma. A presença de fendas em vigas, diminui o valor estético das mesmas, e ainda diminui a sua durabilidade. Por outro lado, o reforço à flexão, irá baixar o eixo neutro, o que aumentará a área sujeita à compressão, no caso de vigas fletidas. Esse aumento de área é particularmente benéfico, pelo fato de que a madeira se comporta bastante bem à compressão paralela às fibras e pelo fato de que os defeitos naturais da madeira situados em zonas comprimidas não apresentam influência negativa significativa. Vista a área de compressão aumentada, também a probabilidade de esta conter os defeitos naturais aumenta. Se as fendas de secagem passarem a estar contidas nesta área então, vê-se assim diminuída a sua influência negativa. As forças de tração passarão a ser maioritariamente transferidas pelo elemento de

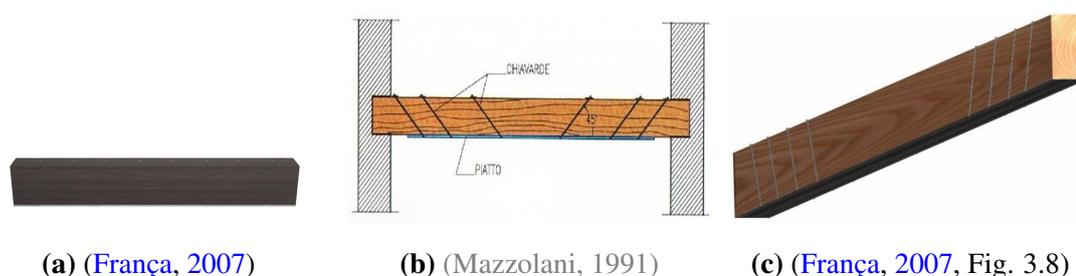
reforço devido à sua maior rigidez em relação à madeira. Neste caso, o reforço apresenta-se como uma forma de restaurar ou aumentar a capacidade resistente perdida por estes elementos. No caso de vigas intactas, sejam estas de MM ou MLC, o reforço à flexão apenas se justifica em vigas de grande importância (ex. vigas mestras, vigas fortemente solicitadas, ou vigas que por imposições geométricas e arquitetónicas, não seja possível adotar a altura de flexão resistente de cálculo necessária, etc.). Existem vários métodos de reforço de vigas à flexão com vista o aumento da sua capacidade resistentes e da sua rigidez, que podem ser consultados na literatura. No entanto qualquer que seja o método utilizado, existe sempre a necessidade de transferir as forças de tração existentes nas fibras de madeira tracionadas para o elemento de reforço que as irá absorver ou suportar na maior parte. Quer utilizando perfis metálicos, FRPs (mantas, laminados, varões) ou cabos de aço, a transferência de tensões das fibras mais tracionadas da madeira para o elemento de reforço, tem de ser realizada de algum modo, para que o reforço seja efetivo, caso contrário, o “reforço” não é nada mais que um elemento decorativo! A transferência de tensões é feita por meio de um conector, que como o próprio nome indica, serve para conectar o elemento de reforço à fibras de madeira tracionadas, e por meio deste, proceder-se à transferência que se dá do elemento de menor rigidez para o de maior rigidez. Por isso é imperativo que o elemento de reforço utilizado tenha uma rigidez elevada comparativamente à da madeira (12 GPa), como é o caso do aço (210 GPa) e dos FRPs (400 GPa-1200 GPa). Não só a rigidez do elemento de reforço importa, mas também a sua resistência e ductilidade. Ambas irão influenciar o comportamento global do elemento de madeira reforçado, quando carregado. Não basta ter o material de reforço ideal (comportamento dúctil, de alta resistência, e de baixo custo), mas também é necessário que o elemento de conexão utilizado seja de elevada qualidade (capaz de transferir as tensões de tração das fibras de madeira tracionadas para o elemento de reforço). O elemento de conexão, assume portante, elevada importância na resposta que o elemento estrutural possa dar quando carregado, pelo fato de ser este que determina a quantidade de tensões que é transferida. O reforço à flexão e o elemento de conexão, devem por isso, ser dimensionados de tal modo que, o rotura do elemento estrutural seja por esmagamento das fibras de compressão, e ao mesmo tempo confira à viga, quando carregada, um comportamento bastante dúctil e ao mesmo tempo resistente e rígido. A transferência das forças de tração entre a madeira e o reforço, é feita pelos elementos de conexão, maioritariamente por meio de forças de corte ou de ancoragem ou ambas, ver Figs. 4.18, 4.17 e 4.19a. As forças ou tensões de corte surgem devido à diferença de rigidez entre o material de reforço e a madeira. Se houver compatibilidade de extensões entre ambos, significa que o elemento de conexão foi capaz de transmitir na totalidade as forças de corte resultantes na interface entre ambos aos materiais. Desta forma o elemento mais rígido (reforço), é o que tende a absorver mais os esforços de tração, pelo que, para a mesma extensão, é o que está sujeito a maiores tensões. No entanto, na realidade, esta compatibilidade não ocorre de

forma perfeita, isto por consequência das deformações ocorridas no próprio conector quando solicitado, gerando deformações relativas entre o elemento de reforço e a madeira, o que por um lado, pode até ser vantajoso do ponto de vista de se poder aproveitar este fato para atribuir maior ductilidade ao elemento reforçado, em detrimento de uma menor capacidade resistente do elemento estrutural reforçado. O comportamento global de um elemento estrutural de madeira, sua resistência e rigidez, está intimamente relacionado com a rigidez e resistência do material do elemento de conexão, da madeira e do reforço. Trata-se de um jogo de partilha de tensões, que pode, ser manipulado, por forma a obter o comportamento desejado do elemento estrutural de madeira reforçado. Os elementos de conexão podem ser, p. ex., varões, parafusos, pregos, adesivos. Os adesivos são mais vantajoso, por permitirem uma distribuição mais uniforme das tensões de corte e por não provocarem qualquer dano às fibras de madeira tracionadas, enquanto que os pregos, os parafusos entre outros, pela quantidade necessária à obtenção de uma rigidez da conexão aceitável, provocam um forte dano às fibras tracionadas de madeira, tendo como consequência a diminuição da sua resistência à tração, e por consequência, também da rigidez do elemento à flexão. No entanto, a utilização de adesivos levanta sempre preocupações de durabilidade e da sua qualidade a longo prazo, principalmente quando os elementos estão expostos a climas severos. Por fim, e no contexto deste capítulo, e do já abordado nas secções 4.1 e 4.2.1, torna-se lógico o aproveitamento dos elementos utilizados para a realização da armadura interna, utilizando-os também como elementos de conexão, conferindo-lhes uma dupla função. Devido à elevada resistência ao arrancamento e à tração destes elementos e também pela inclinação com o elemento de reforço, quando ancorados a este devidamente, conferem à junta de ligação, uma rigidez significativa. Mais além, devido às forças de tração a que irão estar submetidos, fica aumentado o efeito de fecho das fendas de secagem, evitando ainda mais a sua propagação. Com a interação entre o sistema de armadura interna (abordado em 4.2.1), e o reforço à flexão, é possível, para além de reparar os elementos estruturais com fendas de secagem, também aumentar a capacidade resistente e a rigidez à flexão. De seguida serão apresentados exemplos de métodos de reforço, em que este conceito foi aplicado, e um exemplo moderno em que foram utilizados parafusos autoperfurantes e chapas metálicas no reforço de vigas de MLC à flexão, também usando este conceito, e respetivos resultados e conclusões dos ensaios experimentais realizados.

Chapa metálica na face inferior ligada com parafusos de porca

Segundo [França \(2007\)](#), quando a estrutura de um pavimento de madeira não é suficientemente resistente, podem-se adicionar novas peças de madeira ligadas aos elementos existentes estruturais constituintes do pavimento com vista o aumento da sua capacidade portante. Outra forma, passa por diminuir o vão entre as vigas existentes por colocação de novas entre estas. Esta

forma é eficaz, por diminuir a área de influência de cada viga, que por consequência, ficam menos solicitadas, logo deformam menos. E por fim, a colocação de elementos de reforço, de materiais distintos, p. ex. aço, em parte ou ao longo de toda a viga. Afirma ainda que, em peças de grandes dimensões é inevitável o surgimento de fendas de secagem, mas que no entanto, estas nem sempre comprometem a resistência da viga. Sugere a necessidade de realizar uma análise do quanto se pode reduzir a largura da secção transversal ao mínimo possível, para assim remover a largura que contem as fendas, no caso de vigas em que sua capacidade resistente foi comprometida devido à presença destas. Contudo, refere que para cada caso, deve ser estudado o método de intervenção que seja mais útil e rápido de aplicar, sendo que no caso de vigas com fendas de secagem, é usual utilizar varões de aço inclinados (ângulos de 20 a 30 graus), colados com cola epóxi, e as fendas preenchidas com a mesma cola, como método de reparação. Já no caso em que as fendas comprometam a capacidade resistência da viga, é necessário um aprofundamento à cerca da intervenção de reforço a realizar.



(a) (França, 2007)

(b) (Mazzolani, 1991)

(c) (França, 2007, Fig. 3.8)

Figura 4.17: Colocação de chapa metálica na face inferior da secção, ligada por parafusos de porcas a toda a altura (a) ; Exemplos de colocação de chapa metálica na face inferior, conectada mecanicamente por parafusos a 45° (b&c).

De acordo com Mazzolani (1991, citado em França, 2007), uma forma de reforçar vigas de pavimentos de madeira com fendas de secagem, que se observam com frequência em estruturas antigas, é utilizando elementos de aço, como se pode observar na Fig. 4.17. Nesta mesma figura observa-se que foi colocado um perfil ou chapa metálica na face inferior da viga, com objetivo de incrementar a sua resistência mecânica, por aumento da resistência à flexão. O elemento de reforço tem como função absorver grande parte dos esforços de tração a que será solicitado. Desta forma, o reforço irá baixar o eixo neutro da secção, colocando a madeira a trabalhar essencialmente à compressão. É necessário garantir que a viga não se encontre muito deteriorada, de modo a não provocar uma redução considerável da sua resistência, devido à grande importância da função mecânica que desempenhará no funcionamento misto da secção. Caso contrário, a solução não apresenta resultados satisfatórios, sendo necessário optar por uma espessura de chapa considerável, tornando assim a solução inviável economicamente e intrusiva (Carneiro, 2012). Para tornar o reforço efetivo, é necessário garantir o funcionamento da secção mista. Para isso, recorre-se a um conector, que irá fazer a ligação entre o reforço e a viga de

madeira. Geralmente utilizam-se conectores metálicos, introduzidos perpendicularmente à face inferior da viga. Recomenda-se que o conector deva dispor-se ao longo de toda a altura da viga, e apertado com uma anilha e porca na face superior da viga de madeira, ver Fig. 4.17a. Esta medida visa diminuir os deslocamentos de deslizamento entre o reforço e a viga, dotando a ligação de maior rigidez, e de um melhor funcionamento misto da secção. Caso não seja possível colocar um parafuso ao longo de toda a altura da viga, o seu comprimento deve cumprir as disposições mínimas apresentadas na regulamentação, ver EC5. Mazzolani (1991) e França (2007) apresentam uma solução bastante semelhante, através da colocação de uma chapa na face inferior da viga, ver Figs. 4.17b e 4.17c, onde se observa que a ligação do perfil metálico à viga de madeira é efetuada por um ligador introduzido com um ângulo de 45 graus ao longo de toda a altura. A inclinação dos conectores resulta numa resistência ao esmagamento localizado menor, mas em contra partida aumenta a resistência ao corte, e ainda melhora o comportamento da secção mista. Por este motivo, estes são aplicados com maior intensidade nas zonas de esforço transversal máximo (Carneiro, 2012). Esta solução tem como desvantagem a redução do pé direito, equivalente à espessura do elemento de reforço, aspeto que no entanto, pode ser contornado, com o embutimento do elemento de reforço no elemento reforçado, após a realização dum entalhe.

Chapa metálica na face inferior ligada com tirantes metálicos e esticadores de aço

Existem outras formas de intervenções de reforço de vigas à flexão. Contudo, todas elas têm o mesmo objetivo, que é o de aumentar a inércia dos elementos estruturais por meio de um reforço de elevada resistência à tração, situado na face inferior ou na face tracionada do elemento estrutural a reforçar. A utilização de tirantes metálicos como apresentado na Fig. 4.18a, é particularmente vantajoso, por possibilitar o aumento da altura de flexão, apenas pelo afastamento do cabo das fibras de madeira mais tracionadas, fazendo com que o eixo neutro baixe consideravelmente, ficando o tirante e a madeira, respetivamente à tração e à compressão quase pura, o que é particularmente benéfico, em termos do comportamento mecânico de ambos os materiais. Outra solução, seria o aumento da altura de flexão por colagem de novos elementos de madeira ou derivados na zona inferior ao lateral da secção da viga, ou por colocação de um perfil metálico ou material compósito, como demonstrado na Fig. 4.18b. Uma variante das soluções representadas na Fig. 4.17a e 4.17b, passa por em vez de utilizar parafusos de porca como elemento de conexão, utilizar tirantes metálicos com esticadores de aço para fixar a chapa à viga. Embora em ambos os casos, existe sempre o inconveniente da amarração aos extremos da peça, por vezes complicada, e por ser necessário aperto periódico (Rodrigues, 2004). Em todas as soluções apresentadas existe uma diminuição do pé-direito, que no caso do uso de tirantes é considerável e que poderá não ser muito prático, nem seguro, nem esteticamente aceitável.

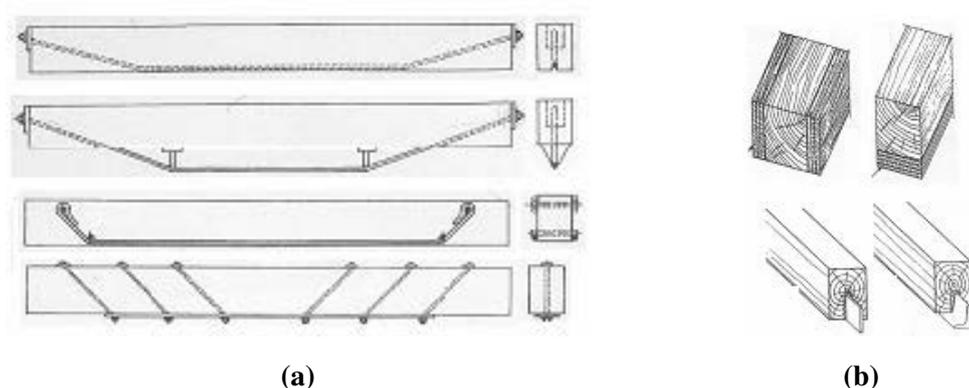
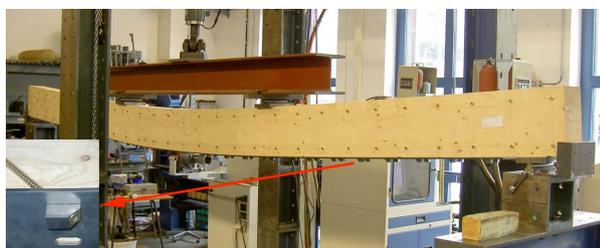


Figura 4.18: Reforço das vigas deformadas com auxílio de tirantes metálicos com esticadores de aço (a), ou por intermédio de lâminas de madeira coladas (b), ou ainda com chapa metálica ou de materiais compósitos colados (Rodrigues, 2004, Figura III.10).

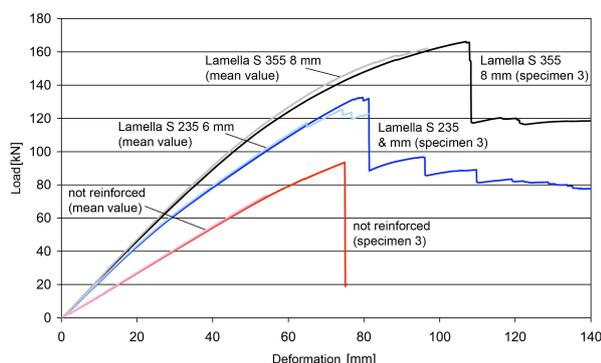
Reforço de vigas com chapa metálica e parafusos auto-perfurantes

Em certos casos de reparação de vigas com fendas, após se ter procedido ao reforço das “propriedades fracas da madeira” com um sistemas de armadura interna, é necessário por vezes, proceder-se a medidas de reforço à flexão, visto que as fendas, dependendo da seu tipo, gravidade e causa (ex. fendas recentes resultado da combinação de sobrecarregamento e variações dimensionais da madeira), podem ter afetado a resistência ou a rigidez do elemento à flexão. Nestes casos, uma medida lógica passa por complementar o reforço diagonal ou lateral ao corte com elementos de reforço longitudinal para aumentar a resistência e a rigidez à flexão do elemento. A primeira aproximação realizada por Trautz & Koj (2009) passou por instalar varões roscados, longos, paralelamente às fibras na face tracionada. Entretanto surgiram alguns inconvenientes relacionados com desvios apresentados pelas furações das aberturas para colocação dos varões, fazendo com que os varões tivessem de ser colocados com uma distância suficiente da superfície da viga, e também por questões de espaçamentos mínimos regulamentares. Com esta primeira aproximação, Trautz & Koj (2009) verificaram que o efeito pretendido relativo à melhoria da resistência e da rigidez da viga, não cumpriu com as expectativas. Assim sendo, decidiram usar elementos externos de aço como reforço à flexão. Lamelas de aço foram escolhidas em detrimento de outros produtos derivados da madeira, tais como o LVL, pela sua elevada resistência e modulo de elasticidade, e por ser um elemento eficiente de reforço à flexão de vigas de madeira mesmo com perfis pequenos. Uma particularidade desta solução, foi que neste caso as lamelas de aço de reforço foram fixadas à face tracionada da viga, aproveitando os parafusos que formam a armadura interna, por meio de um sistema de ancoragem, cujo pormenor pode ser visualizado na Fig. 4.19a. Desta forma tira-se proveito da elevada rigidez axial dos parafusos, que irá diminuir o deslizamento livre da interface da ligação madeira-aço (reforço), que é crucial

para o desempenho da viga reforçada, relativamente à sua capacidade resistente e à sua rigidez à flexão, formando assim um sistema composto flexível e de elevada rigidez.



(a) (Trautz & Koj, 2009, Fig. 7)



(b) (Trautz & Koj, 2009, Fig. 8)

Figura 4.19: (a) Viga de MLC ensaiada à flexão com reforço interno (parafusos autoperfurantes) e externo (reforço à flexão com lamela de aço), detalhe no canto inferior esquerdo do calço de ancoragem para fixar os parafusos à lamela; (b) Diagramas de Força-deslocamento (kN-mm) para as vigas reforçadas.

*

* Vigas de MLC; Dimensões: 0.16 x 0.32 x 5.67 m (B x H x L); (b) Configurações de reforço e resultados: não reforçada [F_u , E_m , rotura frágil], 6 mm (S 235) [$+45\%F_u$, $+39\%E_m$, > rotura dúctil], 8 mm (S355) [$+80\%F_u$, $+49\%E_m$, >> rotura dúctil].

O estudo levado a cabo por Trautz & Koj (2009) permite, com base em resultados obtidos experimentalmente, demonstrar o elevado desempenho apresentado por vigas ensaiadas à flexão, nas quais se procedeu a um reforço combinado: reforço interno em forma de treliça usando parafusos autoperfurantes e ancorados em elementos de metal de reforço à flexão (lamelas de aço), colocados exteriormente na face inferior tracionada. Este método de reforço combinado/misto demonstrou ser especialmente adequado para um reforço à posteriori de vigas principais/mestras em renovação e reabilitação de estruturas de madeira, muito por causa deste poder ser aplicado de forma fácil e prática em sito, e não necessitar de trabalhos adicionais de remoção de elementos sobrepostos ao elemento a reforçar, como é o caso de pavimentos ou coberturas. Outro aspeto positivo importante, é que este reforço combinado não é relativamente afetado pelo teor em água e pela qualidade da superfície da madeira e das condições climáticas externas.

O esquema de ensaio com a lamela de aço e os ancoradouros são mostrados na Fig. 4.19a. O comportamento estrutural das vigas reforçadas comparativamente com a viga de referência sem reforço pode ser visto na Fig. 4.19b. Os resultados obtidos (ver Fig. 4.19b e nota de rodapé), demonstraram um aumento significativo da carga última e da rigidez à flexão em comparação com a viga não reforçada, e um modo de rotura bastante dúctil caracterizado pelo comportamento dúctil das lamelas de aço e da zona comprimida da madeira, o que é uma grande vantagem relativamente ao modo de rotura frágil normal das vigas de madeira. Este sistema de reforço

combinado, tem a particular vantagem de prevenir delaminações de grande escala e fraturas por corte na viga de madeira ([Trautz & Koj, 2009](#)).

Capítulo 5

Trabalho Experimental

Neste capítulo, irá-se proceder à descrição dos ensaios de 6 vigas de MM de Pinho bravo (*Pinus pinaster*). Serão determinadas as suas propriedades de resistência e rigidez à flexão, respetivamente a resistência à flexão, o módulo de elasticidade local e o módulo de elasticidade global, determinados em conformidade com o descrito na [EN 408](#).

Anteriormente à realização dos ensaios, será necessário calcular a força máxima (F_u) e correspondente deslocamento (δ_u) estimado para cada viga, para que, deste modo, possam ser executados dentro dos limites de deslocamento, de carga e de velocidade, definidos nas normas inerentes.

Para esse efeito, as vigas serão classificadas visualmente de acordo com a ficha [M2/LNEC](#) e a [NP 4305](#). Estas normas definem as regras de medição dos defeitos naturais para a espécie de Pinho bravo, resultando na atribuição de uma classe de qualidade, E ou EE. No Quadro IV da ficha [M2/LNEC](#) (ver tabela D.3), são apresentados os valores resistentes que foram usados para a estimativa da carga e do deslocamento máximo relativos a cada classe de qualidade atribuída. Como se pretende estimar o comportamento real das vigas de Pinho bravo, é necessário recorrer aos valores médios das propriedades de flexão das vigas desta espécie. Os valores médios foram obtidos com auxílio ao estudo estatístico do comportamento à flexão de vigas de Pinho bravo realizado por [Simões et al. \(2011\)](#).

Duas das seis vigas foram classificadas como rejeitadas, e por isso foram reforçadas, uma à flexão e outra ao corte, por meio de tiras metálicas e parafusos auto-perfurantes.

As vigas foram carregadas até à rotura. Com a madeira destas vigas foram ainda produzidas 2 vigas de MLC. Uma foi reforçada ao corte com parafusos auto-perfurantes, e a outra foi reforçada também ao corte, mas só posteriormente de ter sido ensaiada sem reforço. Assim sendo, neste trabalho experimental foram totalizados 6 (MM) + 3 (MLC) ensaios, ver Tab. 5.1.

Na fase final deste capítulo, pretende-se em suma, validar a atribuição da classe de qualidade de cada viga por comparação dos valores definidos das propriedades de flexão para cada classe de qualidade com os obtidos experimentalmente, estudar a viabilidade do reforço das vigas

reforçadas, a influência da posição dos defeitos naturais existentes nas vigas nos valores obtidos das propriedades de flexão determinadas experimentalmente, comparar os valores destas propriedades estimadas com as calculadas experimentalmente, e comparar os resultados obtidos para as vigas de MM e as vigas de MLC. Posteriormente, serão apresentadas as respectivas conclusões.

Tabela 5.1: Campanha experimental.

NP 4305 & M2/LNEC	EN 338/1194	s/ reforço	c/ reforço		EN 408	
			Corte	Flexão	9.	10. & 19.
6 vigas de MM						
EE	C35	1	-	-	E_{ml}	$E_{mg}; f_m$
E	C18	3	-	-		
R	< C18	-	1	1		
2 vigas de MLC						
	C24h	1	-	-	E_{ml}	$E_{mg}; f_m$
	C24h	-	1	-		
	C24h	-	1	-		

5.1 Materiais

5.1.1 Inspeção e diagnóstico dos provetes de madeira

Fichas de classificação visual: A atribuição das classes de qualidade às 6 vigas de MM foi feita de acordo com os critérios definidos na [NP 4305 \(1995\)](#). Foram realizadas fichas de classificação visual, que posteriormente foram preenchidas, resultando na atribuição final da classe de qualidade e classe de resistência inerente a cada elemento desta espécie.

Na primeira página de cada ficha são descritas várias informações, tais como a designação atribuída a cada viga, as suas propriedades geométricas médias, a sua massa, a sua massa volúmica aparente e seu teor em água médio. Ainda nesta página é apresentado um modelo 3D do elemento realizado em AutoCAD, e várias vistas do mesmo, (frontal, posterior, inferior, superior e vista em perspetiva dos topos).

O modelo 3D consiste num modelo volumétrico em forma de paralelogramo, onde nas faces do qual foram colocadas imagens das faces correspondentes às da viga real. As imagens colocadas foram obtidas por meio de registo fotográfico, com uma máquina de alta resolução, e depois foram devidamente tratadas, para correção de distorções provocadas pela lente, e para eliminar erros de escala. Foram marcados pontos de referência longitudinais nas vigas espaçados de 10 cm para minimizar erros de medição no modelo 3D. Estas imagens foram ainda melhoradas em termos de cor (ex. luminosidade e contraste). Um dos benefícios desta ação foi a melhor distinção entre o cerne(escuro) e o borne(claro), para além de melhorar a nitidez e a observação de singularidades, tais como a orientação das fibras, o desenvolvimento do veio, nós, anéis de

crescimento entre outros. A cada uma destas faces é atribuída uma "layer", que ao ser ocultada permite visualizar o interior do modelo, que é oco. No entanto, através de uma análise visual cuidada e uma constante manipulação do modelo 3D, conseguiu-se, utilizando comandos de desenho geométrico em 3D, fazer a representação dos nós e do seu desenvolvimento interior, e ainda a representação do desenvolvimento da medula em 3D. Todo este processo, teve como base uma análise pessoal, sendo necessário recorrer à sensibilidade e ao conhecimento acerca da espécie, mais propriamente da sua estrutura anatómica e macroscópica, (ex. características dos seus defeitos).

A representação 3D dos nós, permitiu mais tarde, através de planos de projeção, medir as áreas inerentes ao KAR (total e marginal) e ainda distinguir os nós singulares dos agrupados. Ao recorrer à projeção frontal da medula, mediu-se a inclinação máxima do veio. Foram medidos e identificados os nós e as fendas. Com auxílio à visualização dos topos, determinou-se a taxa de crescimento. Foram desprezados os descaios e os empenos.

Toda esta análise foi útil para o preenchimento do quadro que se apresenta na segunda página de cada ficha (ver anexo A). A não conformidade de apenas um dos parâmetros desse quadro, obriga à atribuição de uma classe de qualidade inferior. Nesta mesma página foram efetuadas observações e comentários acerca das medições efetuadas.

Em suma, quer-se com a realização deste modelo afirmar a importância que este tem relativamente a vários aspetos e utilidades. Com este modelo é possível proceder à visualização e manipulação do elemento sem ser necessário um contacto físico. Este modelo serve como base de dados acerca das características da viga na data em que foi classificada. No presente caso será bastante útil, como modelo de comparação do estado da viga antes e após o ensaio destrutivo.

Atualmente, o processo de classificação de madeira serrada, é feita maioritariamente recorrendo a processos de classificação mecânica. Com recurso a equipamentos de alta tecnologia, é possível determinar propriedades físicas e mecânicas dos elementos, em 3D e espacialmente, criar base de dados dos mesmos, e através da medição de propriedades fundamentais, atribuir com mais rigor e mais detalhe, a classe de resistência correspondente.

Mapeamento e medição dos defeitos naturais da madeira: As medições realizadas de feitos naturais das vigas, mais propriamente das fendas/ bolsas de resina e nós, são apresentadas no anexo B.

Medição das propriedades geométricas

O teor em água das vigas foi assumido como constante, 12%, e considerado como o valor do estado de equilíbrio atingido pela madeira, tanto no local onde foram efetuadas as medições, como no local onde foram realizados os ensaios.

Devido à higroscopicidade da madeira, e à sua anisotropia, sabe-se que a madeira pode variar as

suas dimensões entre o intervalo de teor em água de 0 até ao PSF. Variações do teor em água na gama deste intervalo, resulta em fenómenos de retração, e por consequência, à instabilidade e variações dimensional da madeira ou do elemento estrutural de madeira. No entanto, como foi assumido e também tomadas todas as precauções para que o teor em água não se alterasse entre os diferentes locais, pode-se afirmar que não ocorreram quaisquer variações dimensionais relevantes, e que as medições mantiveram-se inalteradas, antes e após o ensaio.

As medições das dimensões das vigas foram realizadas em várias secções ao longo do comprimento da viga, e considerada a média das mesmas para cada uma. Realizou-se também a média das médias das dimensões de todas as vigas ensaiadas. As propriedades geométricas das vigas ensaiadas podem ser vistas na Tab. F.1 do anexo F.4.

Massa Volúmica Aparente

A massa volúmica aparente, neste trabalho experimental, foi determinada de acordo com a [NP 616 \(1973\)](#). As vigas foram pesadas numa balança comercial, obtendo-se a massa da viga. Dividindo a massa da viga pelo respetivo volume, obteve-se a massa volúmica aparente. Os resultados podem ser observados na Tab. F.1 do anexo F.4.

De acordo com o anexo E.1, para a madeira de Pinho bravo, existem dois valores de referência para a densidade, relativamente à proveniência da espécie a nível nacional.

O valor médio da massa volúmica determinado, ver F.1, para as 6 vigas de madeira maciça, foi de 650 kg/m^3 , o que remete a afirmar que o madeira de Pinho destas vigas poderá ser proveniente de Pinhais de Leiria (640 kg/m^3 , Tab. 5.2, [Sanz et al. \(2007\)*](#)).

Consultando a ficha [M2/LNEC \(1997, Quadro IV.\)](#), observa-se que a massa volúmica média para a madeira de Pinho bravo da classe de qualidade EE e E, é de 610 kg/m^3 e 580 kg/m^3 , respetivamente.

Tabela 5.2: Massa volúmica aparente - medido/ normas/ literatura.

Ref	M kg	V $\text{m}^3 \cdot 10^{-3}$	ρ kg/m^3	NP 4305	EN 338/1194	EN 338	Literatura*		
				CQ	CR	ρ_{mean}	ρ_{mean}	Leiria	Viana
						kg/m^3			
REF1	10.6	16.17	655.6	E	C18	580	380		
REF2	10.1	16.29	619.9	EE	C35	610	480		
FC	10.5	15.50	677.6	E	C18	580	380		
FT	10.1	15.61	647.1	E	C18	580	380	640	565
FTRCF	11.1	15.95	695.8	R	< C18		EN 1194		
FTRC	9.6	15.83	606.3	R	< C18		ρ_k		
FJs/p	10.75	15.91	675.6		C24h		380		
FJc/p	10.75	15.91	675.6		C24h		380		
JCc/p	11.25	15.91	707.0		C24h		380		

5.1.2 Materiais de reforço

Parafusos auto-perfurantes: C.1.1

Tiras metálicas perfuradas: C.1.2

5.2 Configurações usadas nos provetes, sistema de numeração

Na Tab. D.5 são apresentados as características das vigas ensaiadas designadamente o seu tipo, a orientação do cerne e do borne, a posição dos defeitos naturais que estas contêm, se estes se encontram na face tracionada, na zona de corte máximo (meia altura), ou se, se encontram na face comprimida. A numeração dos ensaios é também apresentada. Constate-se que o ensaio número 8 trata-se da repetição do ensaio 7 que corresponde à viga FJ, antes e após ter sido reforçada ao corte com parafusos auto-perfurantes. São ainda apresentadas algumas características do reforço adotado para as vigas da classe de qualidade R e também para as vigas de MLC, como é o caso da inclinação dos parafusos e se foram reforçadas à flexão com tiras metálicas. Por fim, são apresentadas também nesta tabela as designações atribuídas a cada uma das vigas ensaiadas e uma breve descrição do seu significado, sendo estas utilizadas para fazer referência às mesmas ao longo deste capítulo.

5.3 Análise estatística da resistência à flexão

Para avaliar estatisticamente o comportamento à flexão das vigas de Pinho bravo, recorreu-se ao estudo realizado por [Simões et al. \(2011\)](#), no qual se utilizou resultados de ensaios à flexão conduzidos em 1990 no âmbito de um projeto Europeu. Este estudo analisou o efeito nos valores característicos de resistência mecânica (módulo de elasticidade à flexão, tensão de rotura à flexão, e massa volúmica) da madeira de Pinho bravo, resultante do ajustamento de diferentes distribuições (normal, lognormal e Weibull bi-paramétrica), tendo também em consideração as classes de qualidade definidas na [NP 4305 \(1995\)](#) na mesma análise. Contudo, no presente trabalho será utilizada a distribuição normal, por, para efeito ser suficiente e também porque o erro relativamente às outras distribuições mencionadas ser relativamente pequeno.

Recorreu-se a este estudo também pela semelhança das dimensões dos provetes ensaiados, num total de 601, utilizados na campanha experimental, com largura, altura e comprimento de 40-50 mm, 100-150 mm e 2000-3000 mm.

Através da realização dos ensaios à flexão de acordo com a [EN 408](#) foram obtidas as propriedades ditas fundamentais (tensão de rotura à flexão, módulo de elasticidade à flexão e massa volúmica), obtendo-se valores médios. Os valores característicos destas propriedades e das restantes foram obtidos seguindo as recomendações para o tratamento de dados da [EN 384](#). O trabalho realizado por [Simões et al. \(2011\)](#), deu origem à publicação da [NP 4305](#), relativamente à classificação visual

de madeira de Pinho bravo para fins estruturais, sendo nela definidas duas classes de qualidade: EE - Especial para Estruturas e E - Estruturas. As classes de resistência correspondentes à grelha definida na [NP EN 338](#), foram obtidas a partir dos valores característicos determinados na [EN 384](#).

Na sequência do estudo levado a cabo por [Simões et al. \(2011\)](#), foi reconhecido, na [EN 1912](#), a equivalência entre a classe de qualidade E e a classe de resistência C18, definida na [NP EN 338](#). Os valores determinados para as propriedades fundamentais podem ser relacionados com a classe de qualidade, visto que os provetes ensaiados foram classificados segundo as classes de qualidade EE, E e R-Rejeitados.

Os resultados obtidos para as duas amostras foram analisados conjuntamente através da aplicação dos fatores k_h e k_l descritos na [EN 384](#), com o objetivo de analisar o efeito de volume dos provetes. No estudo foi comprovado o correto ajustamento da equação potencial, Eq. 5.1, proposta pela [EN 384](#).

$$k_h = \left(\frac{150}{h} \right)^{0.2} \quad (5.1)$$

A Tab. 5.3, apresenta o valor médio e o desvio padrão das propriedades mecânicas fundamentais para o Pinho bravo, e para as diversas classes de qualidade (EE, E e R). Estes valores serão utilizados para fazer o estudo analítico preliminar, da previsão dos resultados esperados.

Contudo, neste trabalho experimental, em termos de comparação e previsão dos resultados dos ensaios das vigas, estes são feitos pela análise dos valores médios. A comparação entre os resultados estimados e obtidos experimentalmente, será feita em relação aos valores médios. Na comparação final, para validação, utilizam-se valores característicos pois são estes os utilizados no cálculo de estruturas, afetados ou não por coeficientes de segurança.

O valor característico de uma propriedade, referente à resistência, define-se como sendo o percentil 5% de uma distribuição. Este valor indica que a probabilidade de encontrar peças com resistência inferior ao valor característico é de 5%, e obtém-se do valor médio admitindo que segue a **lei Normal de Gauss**, pela expressão:

$$f_k = \bar{f} - 1.64\sigma \Leftrightarrow \quad (5.2)$$

$$\bar{f} = f_k + 1.64\sigma \quad (5.3)$$

Sendo f_k o valor característico, \bar{f} o valor médio e σ o desvio padrão.

Tabela 5.3: Propriedades mecânicas do Pinho bravo (para as diversas classes de qualidade), [Simões et al. \(2011\)](#).

Classe	n	%	Massa Volúmica		Módulo de Elasticidade		Tensão de Rotura	
			kg/m ³		N/mm ²		N/mm ²	
			Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
EE	115	19	619	72	13857	3485	72	16.3
E	391	65	589	74	12157	3362	52	20.1
R	95	16	537	53	9411	3209	29.4	12.9

O coeficiente de correlação de Pearson, “ ρ de Pearson”, mede o grau da correlação e a direção dessa correlação (negativa ou positiva) entre duas variáveis de escala métrica (intervalar ou de rácio/razão). Este coeficiente assume valores entre -1 e 1. No caso de $\rho = 1$, a correlação entre as duas variáveis é perfeita e positiva, se $\rho = -1$ a correlação entre as duas variáveis é perfeita e negativa, isto é quando uma aumenta a outra sempre diminui e se $\rho = 0$ significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra e por isso o resultado deve ser investigado por outros meios. O valor do coeficiente de correlação de Pearson, é interpretado da seguinte forma: 0.7 para mais ou para menos, indica uma forte correlação, 0.3 a 0.7 positivo ou negativo, indica correlação moderada e de 0 a 0.3 fraca correlação.*

http://pt.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_correla%C3%A7%C3%A3o_de_Pearson

Os coeficiente de correlação obtidos por [Simões et al. \(2011\)](#) entre os parâmetros considerados (propriedades mecânicas fundamentais), estão indicados na Tab. 5.4.

Tabela 5.4: Coeficientes de Correlação, [Simões et al. \(2011\)](#).

Propriedades	Massa volúmica	Módulo de Elasticidade	Tensão de Rotura
Massa volúmica	1.0		
Módulo de Elasticidade	0.56	1.0	
Tensão de Rotura	0.59	0.62	1.0

Pela análise da Tab. 5.4 percebe-se que existe uma correlação moderada entre os parâmetros fundamentais. Valores de coeficiente de correlação, são apresentados em [JCSS \(2006, Tab. 4\)](#) para as propriedades mecânicas mais relevantes da madeira de Espruce-da-Noruega (*Picea abies*).

5.4 Instrumentos e medidores de dados

5.4.1 Detalhes do equipamento

Para instrumentação dos modelos recorreu-se a uma célula de carga com uma capacidade máxima de 500 kN, com um transdutor interno, e a dois transdutores de deslocamento do tipo "Linear Variable Displacement Transducer" (LVDT), para a medição do módulo de elasticidade local e global.



(a) LVDT, [5 cm].



(b) LVDT, [10 cm].

Figura 5.1: Equipamentos usados para medição dos deslocamento.

5.4.2 Configuração de teste e localização dos equipamentos de medição

Para a determinação do módulo de elasticidade à flexão global e local, a configuração de teste do ensaio bem como a localização dos equipamentos de medição devem estar de acordo com o descrito na [EN 408 \(2010c, Sec. 9 e 10\)](#) e podem ser observados na Fig. 5.4 e 5.5.

Assim sendo, os valores para os parâmetros definidos, são:

$h \approx 130 \text{ mm} \rightarrow$ altura da viga;

$L = 2550 \text{ mm}$

$l = 2400 \text{ mm} \in [18h \pm 3h] \rightarrow$ OK!;

$l_b = 50 \text{ mm} \rightarrow$ comprimento de contacto das cargas;

$l_2 = 6h = 780 \text{ mm} \rightarrow$ distância entre as cargas;

$l_1 = 5h = 650 \text{ mm} \rightarrow$ comprimento considerado para medição do $E_{m,l}$;

$a = 810 \text{ mm} \in [l_2 \pm 1.5h] \rightarrow$ distância entre a reação do apoio e a força aplicada mais próxima, OK!;

$75 \text{ mm (extremidades)} > 1.5h = 65 \text{ mm} \rightarrow$ OK!.

Na Fig. 5.2, são apresentadas as marcações das dimensões anteriormente definidas de forma anotativa, na imagem, da configuração de ensaio usada em laboratório. São ainda indicados, nesta mesma imagem, os componentes utilizados na montagem da configuração do ensaio, sua legenda, esquema de transferência de forças e condições de apoio e travamento necessários para a correta execução dos ensaios. Pode-se ainda observar a disposição dos equipamentos utilizados para medição dos deslocamentos e dos meios auxiliares a este sistema (suportes).

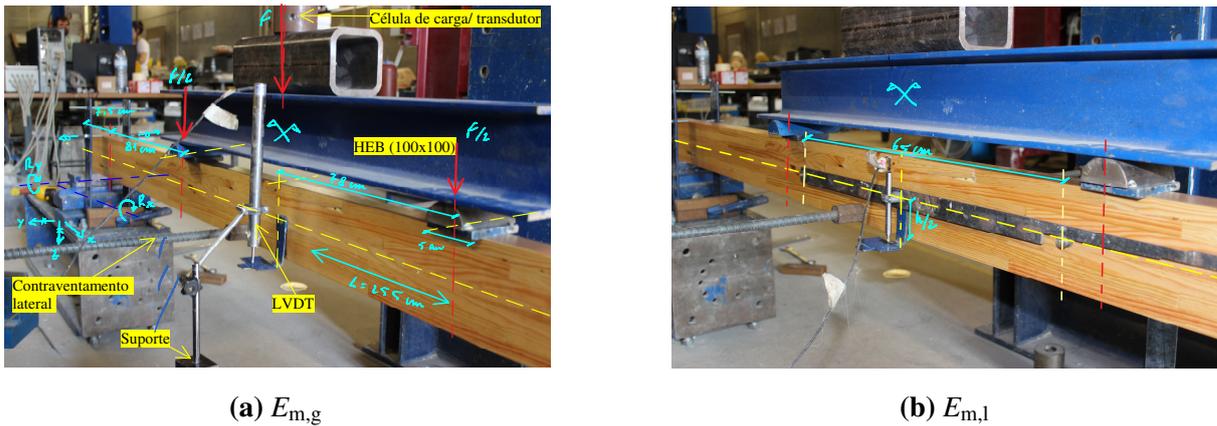


Figura 5.2: Apontamentos e medições da configuração de teste dos ensaios.

Relativamente às condições de apoio, a viga estará simplesmente apoiada. Um dos apoios tem deslocamento livre na direção x e rotação livre em torno dos eixos y e z , enquanto que o outro apoio apenas tem rotação livre em torno do eixo y . Foram ainda colocados travamentos nos apoios para evitar que a viga rodasse em torno do eixo x . Desta forma, a viga se considera-se em equilíbrio isostático, e os esforços podem ser retirados recorrendo às equações de equilíbrio.

Foram colocados dois varões roscados lateralmente como precaução, ver Fig. 5.2, com o objetivo de evitar deslocamento laterais devido à encurvadura lateral do elemento. No caso do ensaio ser montado de forma simétrica e as cargas estiverem segundo a vertical do eixo de gravidade da viga, são evitadas excentricidades que resultariam em momentos torsores. Cálculos preliminares demonstraram que mesmo no caso das cargas serem aplicadas na face superior da viga, situação mais desfavorável, não haveria risco de ocorrência de encurvadura lateral ou risco de atingir a carga crítica, que levasse à rotura da viga devido à mesma.

A transferência da carga proveniente da célula de carga, é realizada por meio de dois perfis metálicos de elevada rigidez, e posteriormente essa carga é transmitida por estes para a viga segundo duas “cargas pontuais”. São colocadas umas chapas na zona carregada para aumentar a área de transferência das forças para a viga, por forma a evitar deslocamentos localizados, por esmagamento da madeira.

Os equipamentos de medição das deformações foram de tal forma colocados, para medir o deslocamento de um ponto situado a meio vão e a meia altura da viga, como definido na norma. No caso da determinação do $E_{m,g}$, o comprimento analisado foi o comprimento total da viga, (ver Fig. 5.2a), já na determinação do $E_{m,l}$ o comprimento analisado foi o que se encontra entre as cargas, (ver Fig. 5.2b). Assim sendo, quando se considera o comprimento total da viga, a deformação medida inclui também deformações por corte, quando apenas se considera o comprimento entre as cargas, não está incluído a deformação por corte, visto que nesta zona não há esforços cortantes.

5.5 Expressões de resultados

5.5.1 Flexão

Intervalo de deformação elástica

Para a determinação do módulo de elasticidade local e global é necessário fazer uma análise de regressão linear para o intervalo do gráfico de força-deslocamento entre $0.1F_{\max,est}$ e $0.4F_{\max,est}$. O coeficiente de correlação deve ser de 0.99 ou melhor, caso não seja possível, o intervalo pode ser diminuído até $0.2F_{\max,est}$ e $0.3F_{\max,est}$, ajustando-se por forma a obter a melhor correlação.

Nota: Neste trabalho prático, coeficientes de correlação superiores a 0.95 foram considerados aceitáveis. Será necessário por isso, fazer um cálculo preliminar para determinar a força máxima estimada ($F_{\max,est}$) e o deslocamento correspondente.

Num primeiro ensaio, determina-se o módulo de elasticidade local usando uma força máxima estimada um pouco superior a $0.4F_{\max,est}$, como por exemplo $0.5F_{\max,est}$. O deslocamento correspondente é necessário para limitar o deslocamento e velocidade máxima do ensaio de modo a não danificar a viga, evitando comprometer as características mecânicas da mesma para ensaios futuros. Este ensaio é realizado com ciclos de carga e descarga, com limitação de deslocamento e velocidade.

Nota: Neste trabalho prático, foram realizados 4 ciclos de carga e descarga, sendo o 1º ciclo desprezado. No segundo ensaio, como se pretendia determinar a resistência à flexão da viga, a força máxima estimada passou a ser a força de rotura da viga à flexão ou a força máxima real. A regressão linear para efeito de determinação do módulo de elasticidade global passou a ser realizada, no gráfico força-deslocamento de rotura da viga, para o intervalo de $0.1F_{\max}$ e $0.4F_{\max}$, podendo este ser alterado como anteriormente referido, com objetivo de obter um melhor coeficiente de correlação.

A regressão linear tem como objetivo obter o declive da equação da reta que melhor se ajusta ao intervalo de regime linear da viga. A equação da reta será então do tipo, $y = m * x + b$, sendo m , o declive da reta, que corresponde ao parâmetro $\Delta F / \Delta w$ das equações 5.4 e 5.6.

A regressão linear e a correspondente equação da reta e o coeficiente de determinação, foram obtidos com recurso a um programa desenvolvido usando o **Guide-Matlab**, cuja interface gráfica se apresenta na Fig. F.1.

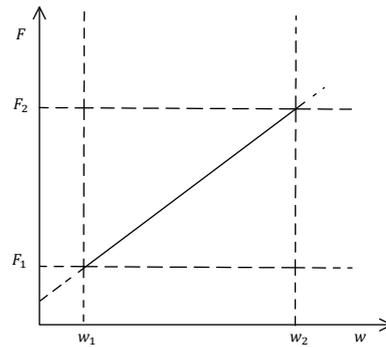


Figura 5.3: Gráfico de força-deslocamento no intervalo das deformações elásticas, EN 408 (2010c, Sec. 9, Fig.2).

Módulo de Elasticidade Local

O módulo de elasticidade local à flexão (N/mm²) é calculado a partir da seguinte equação:

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2 \Delta F}{16I \Delta w} \quad (5.4)$$

Sendo ΔF o incremento de carga em regime elástico (N), Δw o incremento do deslocamento vertical em regime elástico (mm), a a distância entre os pontos de aplicação da carga e o apoio (mm), l_1 o comprimento do dispositivo para determinação do módulo de elasticidade (mm) e I o Momento de Inércia (mm⁴).

A Inércia da secção transversal dos provetes é dada pela Eq. 5.5, na qual, b representa a largura da secção transversal e h a altura (mm).

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (5.5)$$

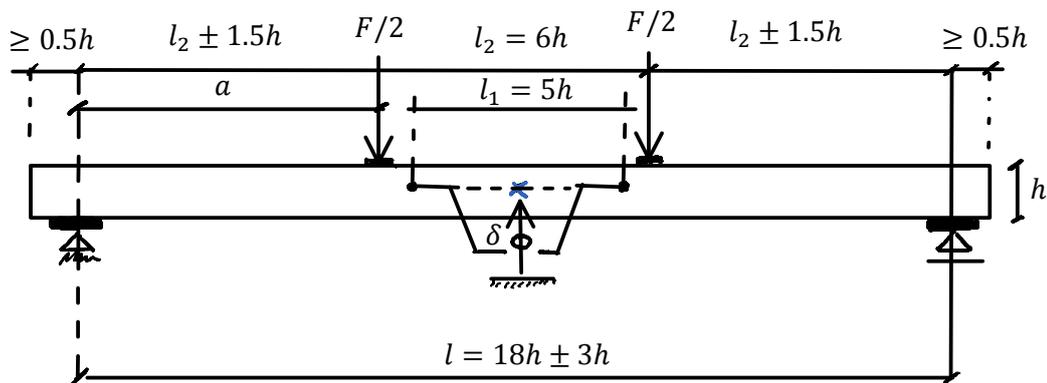


Figura 5.4: Configuração de teste para a determinação do módulo de elasticidade local, EN 408 (2010c, Sec. 9).

Módulo de Elasticidade Global

O módulo de elasticidade global (N/mm²) obtém-se a partir dos valores de deformação medidos a meio vão do provete a partir do seu eixo neutro, sendo calculado através da Eq. 5.6, onde G é o módulo de cisalhamento (N/mm²) que foi considerado igual a infinito (∞), e l a distância entre o centros geométricos dos apoios, ou vão efetivo da viga (mm), como anotado na Fig. 5.5.

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2\frac{\Delta F}{\Delta w} - \frac{6a}{5Gbh}\right)} = \frac{l^3 \Delta F}{bh^3 \Delta w} \left[\frac{3a}{4l} - \left(\frac{a}{l}\right)^3\right] \quad (5.6)$$

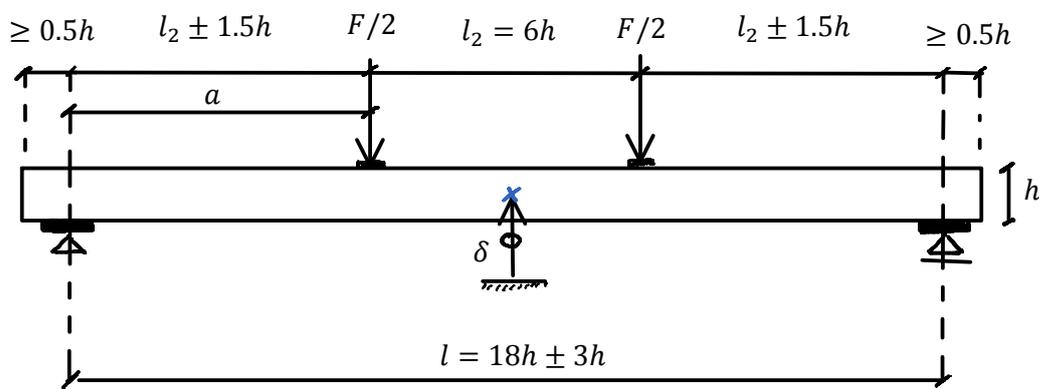


Figura 5.5: Configuração de teste para a determinação do módulo de elasticidade global, EN 408 (2010c, Sec. 10 ou 19).

Resistência à flexão

A resistência à flexão (N/mm²) de uma viga de secção retangular é dada pela Eq. 5.7, onde $F_u = F_{m\acute{a}x}$ é a carga última obtida (N) e W o módulo de flexão da secção transversal (mm³), obtido por intermédio da Eq. 5.8.

$$f_m = \frac{M_u}{I} * y_{max} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f_m = \frac{F_u/2 * a}{\frac{bh^3}{12}} * \frac{h}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f_m = \frac{3F_u a}{bh^2} \quad \text{ou} \quad \frac{aF_u}{2W} \quad (5.7)$$

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (5.8)$$

Esforços

São apresentados na Fig. 5.6 e 5.7 os diagramas de esforços relativos aos ensaios da EN 408 (2010c, Sec. 9,10 e 19). A carga F é a carga transmitida pela célula de carga ao provete a ensaiar, mas é necessário ter em atenção que esta é dividida em duas cargas pontuais, para estar de acordo com a configuração de ensaio da norma. Deste modo a carga F é transferida ao provete segundo duas cargas pontuais de igual valor, respetivamente $F/2$. Trata-se de uma estrutura isostática, e como não tem nenhum carregamento segundo o eixo da peça, o esforço axial N é nulo. Como a configuração de ensaio é simétrica o valor máximo do esforço cortante V e a reação nos apoios R é $F/2$. O valor do esforço cortante é nulo entre as cargas pontuais e de valor máximo e constante entre o apoio e a carga pontual mais próxima. O valor do momento fletor é nulo nos apoios, crescendo linearmente até à carga pontual mais próxima onde atinge o seu máximo, e constante entre as cargas pontuais. O momento máximo M é dado pelo valor da força de reação $F/2$ multiplicado pelo seu braço a , resultando em $F * a/2$.

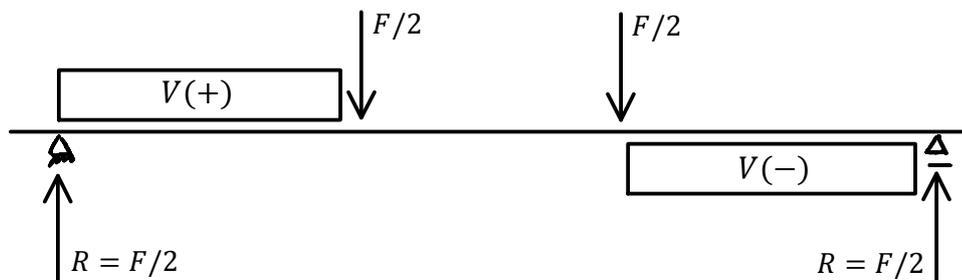


Figura 5.6: Diagrama de esforços transversos.

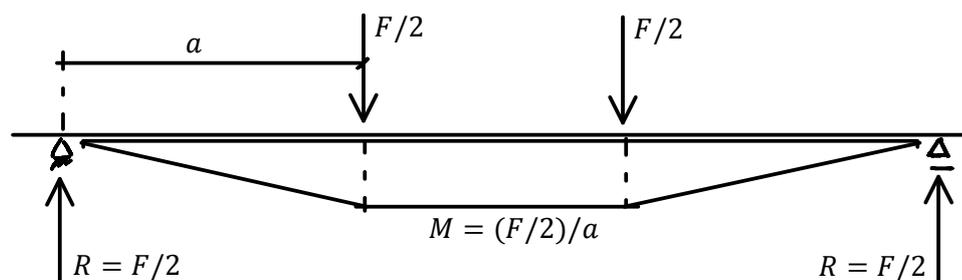


Figura 5.7: Diagrama de momentos fletores.

Coefficiente de Ductilidade Estática

O coeficiente de ductilidade estática, D , é obtido através do quociente entre o deslocamento último, D_u , correspondente ao valor da força máxima, e o deslocamento estático, D_y , correspondente ao limite elástico:

$$D = \frac{D_u}{D_y} \quad (5.9)$$

5.6 Estudo analítico/ pré avaliação dos resultados esperados

5.6.1 Vigas de Classe EE e E

Apenas 1 das 6 vigas de MM foi classificada como sendo da classe EE. A viga classificada como EE é a viga REF2.

Propriedades Geométricas e resistentes

A resistência à flexão média foi calculada pela Eq. 5.3, em que o valor da resistência a flexão característica é o apresentado na Tab. 5.5 e o desvios padrão na Tab. 5.3, correspondentes à respetiva classe de qualidade. O valor da resistência à flexão foi ainda corrigido para ter em consideração o efeito de volume, pela multiplicação deste, pelo fator k_h , calculado pela Eq. 5.1.

Tabela 5.5: Propriedades geométricas, de resistência e rigidez estimadas

CQ	CR	b	h	L	σ	k_h	A	W	I	$f_{m,k}$	$f_{m,mean}$	$E_{0,mean}^*$	ρ_{mean}^*
		mm					cm ²	cm ³	cm ⁴		MPa	GPa	kg/m ³
EE	C35				16.3					35	63.2	14	610
E	C18	47	133	2552	20.1	1.02	62.5	138.6	921.4	18	52.2	12	580
R	C18				12.9					18	40.1	9	580

* M2/LNEC (1997)

Esforços e deslocamentos máximos estimados - ULS

O valor máximo da carga F_u foi calculado através da Eq. 5.7 e pelos valores fornecidos na Tab. 5.5. Deste modo, vem:

$$f_m = \frac{aF_u}{2W} \Leftrightarrow \Leftrightarrow F_u = \frac{f_m 2W}{a} \text{ ou } \frac{f_m b h^2}{3a} \quad (5.10)$$

O valor do deslocamento máximo $\delta_{m\acute{a}x}$, foi calculado através da força máxima calculada anteriormente pela Eq. 5.10, dos valores fornecidos pela Tab. 5.5 e pela Eq. 5.11, ver (Farinha & dos Reis, 1993, pág. 211 Tab. 6.3.2), que nos calcula o valor máximo do deslocamento elástico para esta situação de carregamento, que ocorre a meio vão. Assim sendo, temos:

$$\delta_u = \frac{(F_u/2)a(3l^2 - 4a^2)}{24EI} \quad (5.11)$$

Tabela 5.6: Esforços, tensões de corte e deslocamentos máximos estimados - ULS

CQ	a	F_u	V_u^*	M_u^{**}	δ_u	τ_u
	mm	kN	kN	kN.m	mm	MPa
EE		21.63	10.82	8.76	41.48	2.60
E	810	17.86	8.93	7.23	40.00	2.14
R		13.72	6.86	5.56	40.90	1.65
Média		17.74	8.87	7.18	40.80	2.13

* Ver Fig. 5.6 ** Ver Fig. 5.7

Esforços e deslocamentos máximos estimados - ULS considerando γ_w

Com o objetivo de estudar a influência dos defeitos do material na carga última estimada a que as vigas resistem, foram usadas as equações de segurança 6.11 e 6.12 aos ELU impostas pela EN 1995:1-1(6.1.6), para um elemento sujeito à flexão simples. Como se pretende apenas avaliar a influência do coeficiente parcial de segurança γ_w o coeficiente k_m e o coeficiente k_{mod} foram considerados igual a 1. O valor de k_m faz referência à distribuição de tensões e ao efeito da heterogeneidade da madeira na sua secção transversal. Para madeira maciça e secções retangulares este valor é de 0.7, sendo este um valor menor que a unidade, irá diminuir a tensão atuante de cálculo elástico, por outro lado, se for tomado como 1.0 o cálculo assume-se como conservativo. O valor de k_{mod} tem em consideração a classe de duração da ação e a classe de serviço ou de exposição ambiental. O coeficiente parcial de segurança do material é dado pela Tab. 2.3 da EN 1995:1-1 e para madeira maciça vale 1.3. Como se trata de forças e deslocamentos estimados iremos usar valores médios de resistência à flexão sendo então o valor de $f_{m,k} = f_{m,mean}$.

$$f_{m,Rd} > \sigma_{m,Ed} k_m \tag{5.12}$$

$$k_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} > \left(\frac{3F_u a}{bh^2} \right) k_m$$

$$\frac{f_{m,mea}}{1.3} > \frac{3F_u a}{bh^2}$$

$$F_u < \frac{f_{m,mean} b h^2}{3.9 a} \tag{5.13}$$

$$F_{u,C35:EE} < 16.63 \text{ kN}$$

$$F_{u,C18:E} < 13.74 \text{ kN}$$

$$F_{u,R} < 10.55 \text{ kN}$$

De acordo com a Eq. 5.11 os deslocamentos correspondentes são:

$$\delta_{u,C35:EE} < 31.9 \text{ mm}$$

$$\delta_{u,C18:E} < 30.7 \text{ mm}$$

$$\delta_{u,R} < 31.5 \text{ mm}$$

Sendo a média de 31 mm.

Esforços e deslocamentos máximos estimados - SLS

De acordo com a [EN 1995:1-1\(7.2\)](#), a deformação de uma viga está limitada pelas componentes de deflexão apresentadas na Fig. 7.1 da mesma. Os limites para essas componentes são apresentados na Tab. 7.2 da [EN 1995:1-1](#). Será então, importante saber qual a deformação máxima imposta para os ELS, para as vigas analisados por forma a realizar uma melhor análise dos resultados esperados e obtidos e do comportamento da viga em serviço, uma vez que o limite de deformação é um dos parâmetros limitadores do dimensionamento de elementos de estruturas de madeira. O limite de deformação em ELS para as vigas ensaiadas simplesmente apoiadas e sem aplicação de contra-flecha é dado pela Tab. 2 e tem o valor de $l/250$ e designa-se por $w_{net,fin}$. Esta deformação, considera a deformação instantânea (w_{inst}) após a aplicação da carga, mas também a deformação por fluência (w_{creep}). No entanto, como anteriormente não se considerou o fator $k_{mod} = 1$ o valor limite de deslocamento passa então a ser o valor de $w_{inst} = l/300 = 2400/300 = 8 \text{ mm}$ pelo que não se considera a deformação por fluência e também visto que o ensaio realizado não mede esse tipo de deformação, por ser um ensaio de curta duração ou instantâneo.

Velocidade do ensaio

Segundo a [EN 408 \(2010c\)](#), Sec. 9, 10 e 19), a carga deve ser aplicada a uma taxa constante. A taxa de movimento da cabeça da célula de carga não deve ser superior a $(0.003h) \text{ mm/s}$. Deste modo a velocidade máxima de carregamento é:

$$v_{m\acute{a}x} = 0.003h = 0.4 \text{ mm/s}$$

Sabendo que em média o deslocamento máximo estimado é de 40.8 mm (ver Tab. 5.6), temos

que a duração do ensaio seria de:

$$T = \delta_{\text{máx}}/v_{\text{máx}} = 40.8/0.4 = 102 \text{ seg} = 1 \text{ min } 42 \text{ seg}$$

No entanto, como um dos objetivos seria analisar a evolução das fendas, decidiu-se por um período de tempo longo de ensaio, para simular de certa forma uma carga de longa duração, mas também permitir acompanhar a evolução da propagação das fendas, dando assim mais tempo para registrar o ponto do diagrama de carga-deslocamento a que estas singularidades ocorreram. O tempo adotado foi então de 60 min . Então a velocidade de ensaio é dada por:

$$T = 60 \text{ min} \rightarrow v_{\text{máx}} = \delta_{\text{máx}}/T = 40.8/(60*60) = 0.011 \text{ mm/s}$$

Sabendo que os medidores de deslocamento (LVDT's), fazem 2 leituras por segundo, o número de medições é dado por:

$$N_{\text{leituras}} = T*2 = 60*60*2 = 7200 \text{ leituras}$$

Cálculo de tensões e extensões

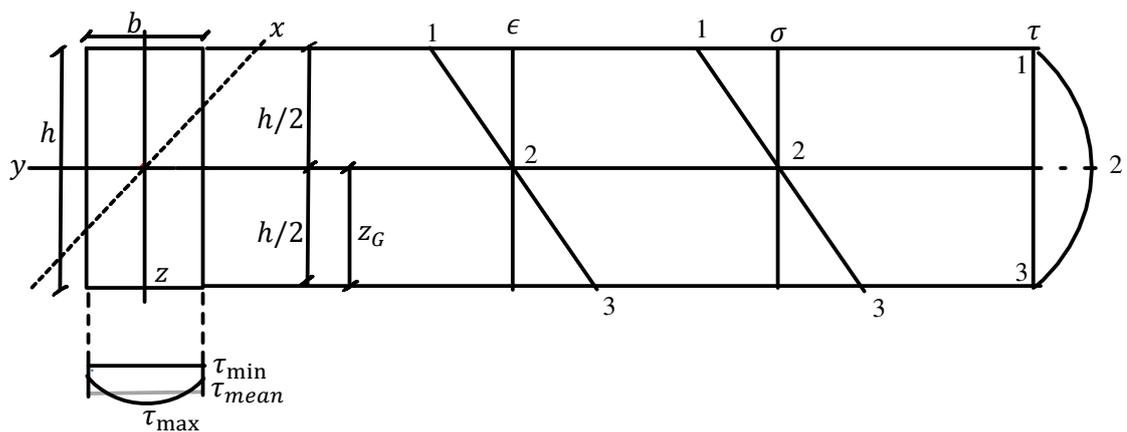


Figura 5.8: Esquema de tensões.

Centro de gravidade:

$$z_G = \frac{h}{2}$$

Tensões normais:

$$\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_c = \sigma_t = f_m$$

Extensões: Considerando que $f_m = f_{t,0} = f_{c,0}$ temos:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{c,y} = \frac{\sigma}{E} = \frac{f_{c,0}}{E_{\text{mean}}}$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{t,u} = \frac{\sigma}{E} = \frac{f_m}{E_{\text{mean}}}$$

Nota: No caso da ocorrência do esmagamento da madeira na face comprimida antes da rotura por tração das fibras da face tracionada, o diagrama de tensões e extensões da Fig. 5.8, já não é linear elástico, mas sim, linear-plástico. As equações da elástica deixam de ser válidas em regime plástico.

Tensões de corte:

$$\tau_2 = \tau_u = \frac{V_z S_z}{I_y e_2} \tag{5.14}$$

$$= \frac{V_u (bh(h/4))}{\frac{bh^3}{12} b} = \tag{5.15}$$

$$= \frac{3 V_u}{2 bh} \tag{5.16}$$

Tabela 5.7: Valor do rácio $\tau_{\text{máx}}/\tau_{\text{mean}}$ e o rácio entre b/h .

b/h	0.25	0.5	1	2	4	6	10	20	50
$\tau_{\text{máx}}/\tau_{\text{mean}}$	1.01	1.03	1.40	1.99	2.58	3.77	6.74	6.74	15.65
$\tau_{\text{min}}/\tau_{\text{mean}}$	1.00	0.98	0.94	0.86	0.81	0.80	0.80	0.80	0.80

Descrição da rotura: Rotura frágil por tração das fibras tracionadas.

5.6.2 Vigas de Classe R: C.4.1

Reforçada ao corte: C.4.1

Reforçada ao corte e flexão: C.4.1

5.7 Apresentação, discussão e análise dos resultados

A apresentação dos resultados dos ensaios serão realizados em forma de tabela e gráfica. As tabelas serão colocadas em anexo ao contrário dos gráficos, que por permitirem uma fácil visualização dos resultados, serão usados para a discussão e análise individual dos resultados obtidos de cada viga.

A apresentação, discussão e análise dos resultados estará dividida em 3 fases:

- Análise Global, (5.7.1);
Apresentação do módulo de elasticidade local, global e resistência à flexão.
- Análise detalhada individual, (5.7.2);
Análise detalhada dos resultados obtidos individualmente para cada viga ensaiada.
- Análise comparativa, (5.8).
Análise comparativa dos resultados obtidos, e análise comparativa das diferentes variáveis: Classe de qualidade, presença de fendas, posição das fendas, posição do cerne e do borne, vigas reforçadas e não reforçadas, vigas de MM e MLC.

Numa primeira fase, serão apresentados os resultados dos parâmetros medidos através dos ensaios preconizados na [EN 408 \(2010c, 9,10 e 19\)](#), por intermédio de gráficos de barras. O gráfico da Fig. 5.9 apresentará os parâmetros de rigidez medidos experimentalmente, e o gráfico da Fig. 5.10 a resistência à flexão.

Na Segunda fase, serão comentados detalhadamente os resultados obtidos para cada viga ensaiada, através da análise do gráfico de Força-Deslocamento, p.ex. ver gráfico da Fig. 5.11, obtido no ensaio da determinação da resistência à flexão, [EN 408 \(2010c, 19\)](#).

Note-se que este gráfico de Força-Deslocamento foi trabalhado de tal forma, a apresentar ao invés do diagrama dos resultados obtidos diretamente do ensaio, uma aproximação feita através de sucessivas regressões lineares cujo erro não fosse inferior a 95%.

O gráfico de Força-Descolamento foi ainda sujeito a uma transladação com o objetivo de eliminar deslocamentos residuais.

Da primeira regressão, representada por traço contínuo, feita de acordo com o descrito na sec. 5.5.1, foi obtido o declive da reta, designado por k_i , que corresponde ao parâmetro $\Delta F/\Delta w$ da Eq. 5.6. O respetivo erro e a equação da reta são também apresentados no gráfico. Os restantes declives das sucessivas regressões são designadas por k_{ji} , que são nada mais que tangentes ao

gráfico de Força-Deslocamento e são representadas por tracejado. São ainda apresentados os declives das retas secantes aos pontos de interseção das sucessivas retas, designados por k_{si} , e representados por traço-pronto.

Com o objetivo de avaliar e comparar o gráfico de Força-Deslocamento obtidos e estimados, foi apresentado em conjunto o gráfico de Força-Deslocamento estimado relativamente à classe de qualidade definida para cada viga ensaiada e o respetivo declive da reta, designado por k_{EE} ou E ou R , e representada por tracejado.

Ainda neste gráfico, são apresentadas duas retas verticais representadas por traço-ponto relativas aos deslocamentos estimados nas análises feitas na sec. 5.6.1 para ELU, ELU considerando γ_w e ELS.

Por fim, serão apresentadas figuras das roturas locais e da rotura global para cada viga ensaiada, para auxílio da análise detalhada e explicação da rotura respetiva de cada viga.

5.7.1 Determinação do módulo de elasticidade local, global e resistência à flexão

O módulo de elasticidade local, foi determinado segundo a (EN 408, 2010c, Sec. 9). O esquema de ensaio está apresentado na Fig. 5.4. O valor do módulo de elasticidade local é determinado recorrendo à Eq. 5.4. O gráfico Força-Deslocamento do respetivo ensaio para cada viga ensaiada é apresentado na Fig. F.2. Cada gráfico apresenta a equação da reta da regressão linear, pela qual se obteve o valor do declive e do coeficiente de determinação. Note-se que o deslocamento máximo destes gráficos não vai além dos 10 mm, o que se apresenta bastante inferior ao deslocamento obtido para $0.4F_{m\acute{a}x,est}$. Por este fato a determinação do módulo de elasticidade local não está de acordo com a norma, mas por outro lado, os resultados dos ensaios da determinação do módulo de elasticidade global e resistência à flexão serão bastante menos influenciados por deformações que possam ter danificado a estrutura interna das vigas de madeira. Para além disso, apesar da força $0.4F_{m\acute{a}x,est}$ já ser uma força que garante à partida que até à qual não ocorrerá nenhuma deformação permanente, isto é garante que o ensaio será realizado para um patamar totalmente em regime elástico, o deslocamento de 10 mm é um deslocamento de serviço e por isso estas deformações permanentes não ocorrerão ou serão bastante minimizadas. Sendo assim, pode-se afirmar que o valor do módulo de elasticidade local foi determinado para deformações de serviço. Por consequência, é esperado um valor do módulo de elasticidade local mais elevado, pelo motivo que a rigidez de uma viga de madeira nos primeiros milímetros de deformação ser maior. A deformação obtida neste ensaio, não tem em conta deformações por corte, pelo fator do diagrama de esforços no vão analisado l_1 , não apresentar esforços de corte, ver Fig. 5.6.

A determinação do módulo de elasticidade global e da resistência à flexão foi feita por meio de

um só ensaio, estando este de acordo com o especificado pela EN 408 (2010c, sec. 10 e 19). O esquema utilizado está apresentado na Fig. 5.5. O valor do módulo de elasticidade global é determinado recorrendo à Eq. 5.6, enquanto que o valor da resistência à flexão é determinado recorrendo à Eq. 5.7.

Sabendo as propriedades geométricas e as dimensões da configuração do ensaio, para determinação do módulo de elasticidade global é necessário determinar o parâmetro $\Delta F/\Delta w$ e para a determinação da resistência à flexão é necessário determinar o valor da carga máxima $F_{m\acute{a}x}$.

Através do gráfico Força-Deslocamento deste ensaio, é possível obter estes dois valores, visto que segundo EN 408 (2010c, sec. 19), a viga tem de ser levada até à rotura. O valor da carga $F_{m\acute{a}x}$, como o nome indica é o valor máximo de carga atingida aquando a rotura da viga, podendo ser esta designada, no caso de vigas de madeira à flexão, por F_u . O parâmetro $\Delta F/\Delta w$ corresponde ao declive da reta feita para o intervalo $0.1F_{m\acute{a}x}$ a $0.4F_{m\acute{a}x}$, se possível.

Informações mais detalhadas da determinação destes valores é favor consultar a Sec. 5.5.

De seguida segue-se a apresentação por meio de gráficos de barras das propriedades de rigidez, $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$, na Fig 5.9, e da resistência à flexão, f_m , na Fig. 5.10, das vigas ensaiadas.

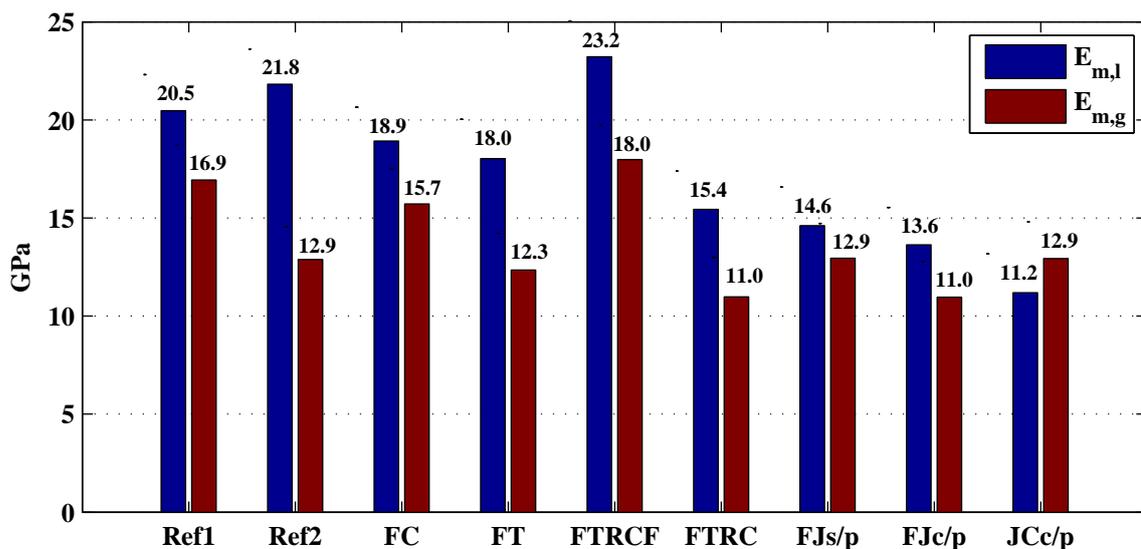


Figura 5.9: Módulo de elasticidade local e global obtidos.

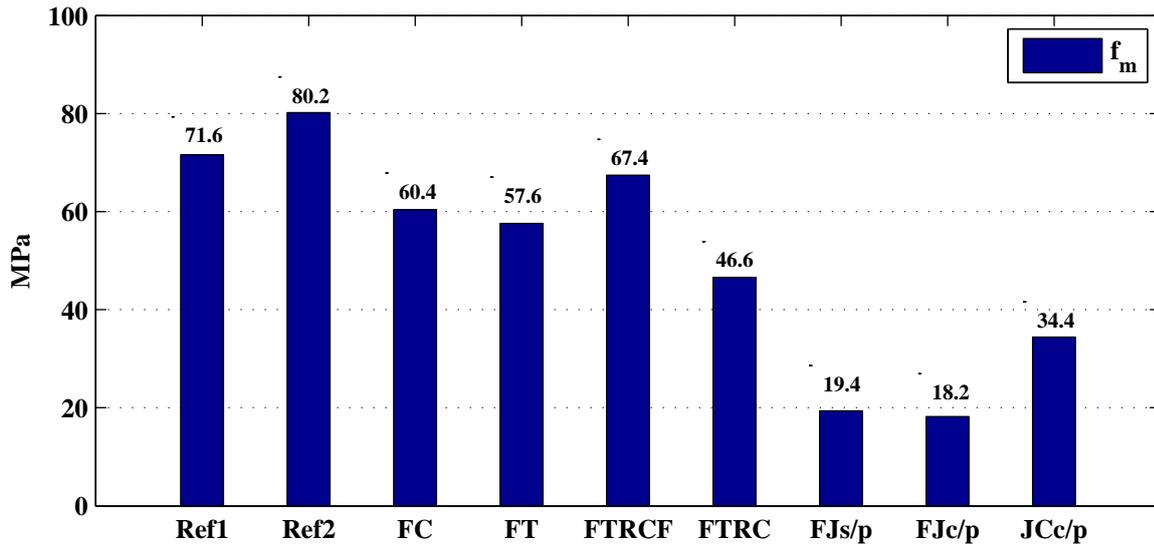


Figura 5.10: Resistência à flexão.

5.7.2 Comentários dos ensaios

(MM) Viga Ref1

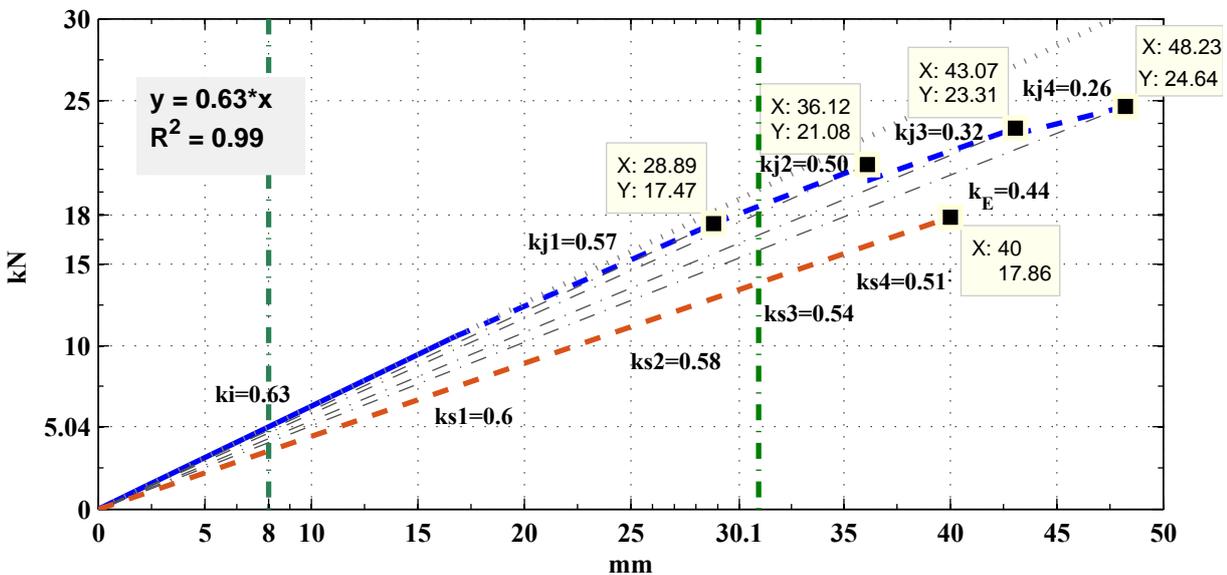


Figura 5.11: Resultados obtidos e estimados para a viga Ref1.

A viga Ref1 é da classe E, ver anexo A, apresenta um $k_i = 0.63$, diminuindo gradualmente para $k_j = 0.57$, até à cedência localizada das fibras inferiores, devido ao desvio do fio das fibras situadas junto da face tracionada (zona 3), para o deslocamento de 29 mm, ver Fig. 5.12a. A cedência localizada da viga mantém-se constante, até atingir o ponto de deslocamento de 36 mm, onde no qual, ocorre um agravamento instantâneo, que resultou numa ligeira queda da carga

e da alteração de um $k_{j2} = 0.5$ para $k_{j3} = 0.32$, ver Fig.5.12b . Deste o deslocamento anterior até ao 48 mm a viga vai perdendo rigidez passando a ter um $k_{j4} = 0.26$, e é para este mesmo deslocamento que ocorre um agravamento exagerado da cedência das fibras localizadas, levando à rotura global da viga para uma carga de 24.6 kN, ver Fig. 5.12c.

O declive da reta do diagrama estimado, $k_E = 0.44$, corresponde a um módulo de elasticidade global igual a 12 GPa, sendo este inferior ao correspondente obtido experimentalmente, $k_i = 0.63$, e ao declive secante aquando a rotura da viga, $k_{s4} = 0.51$.

Adotando o diagrama estimado, e olhando para a respetiva força e deslocamento obtidos da interseção da reta que tem em consideração os defeitos naturais do material, fator γ_M , repare-se que o mesmo valor de força no diagrama experimental, ocorre para níveis de deslocamento de cerca de metade, 15 a 20 mm, e aproximadamente para um patamar de rigidez onde a viga apresenta ainda a sua rigidez inicial, $k_i = 0.63$.

A carga máxima do diagrama estimado, 17.8 kN, é próxima da carga obtida para o diagrama experimental aquando o surgimento da primeira rotura localizada visível, ver Fig. 5.12a.

Fica então demonstrado, que a simples adoção do diagrama estimado, para cálculo, mostra-se adequada e conservativa, pelo ponto de vista que este limitaria a carga ao surgimento da primeira rotura visível e que pela aplicação do fator γ_M , empurraria a carga máxima para o patamar elástico.

Para níveis de deslocamento de serviço, pode-se observar que a viga apresenta uma carga máxima de aproximadamente de 3 kN para o diagrama estimado, enquanto que para o diagrama experimental, temos uma carga de cerca de 5 kN, sendo a diferença de 2 kN, o que torna a adoção do diagrama estimado para cálculo, bastante conservativo.

A localização do defeito natural, desvio do fio localizado, na zona tracionada da viga, deve ser evitado, porque este tipo de defeito resulta na rotura localizada da viga como é apresentado nas Figs. 5.12a, 5.12b e 5.12c, devido a tensões transversais de tração às fibras tracionadas que apresentem desvio do fio.

A presença deste defeito tem como consequência a diminuição gradual da rigidez da viga. A simples colocação da face que contem este defeito a funcionar à compressão, resultaria na ausência das consequências deste defeito ilustradas anteriormente, por neste caso, as fibras passarem a estar comprimidas e por consequência já não apresentariam tensões de tração transversais às mesmas.

Por outro lado, como a ocorrência deste tipo de defeito para esta viga verificou-se para níveis de deslocamento bastante superiores aos de serviço e para níveis na ordem dos 60% a 70% da carga de rotura, estes podem ser usados como um indicador do estado de tensão a que a viga está sujeita.

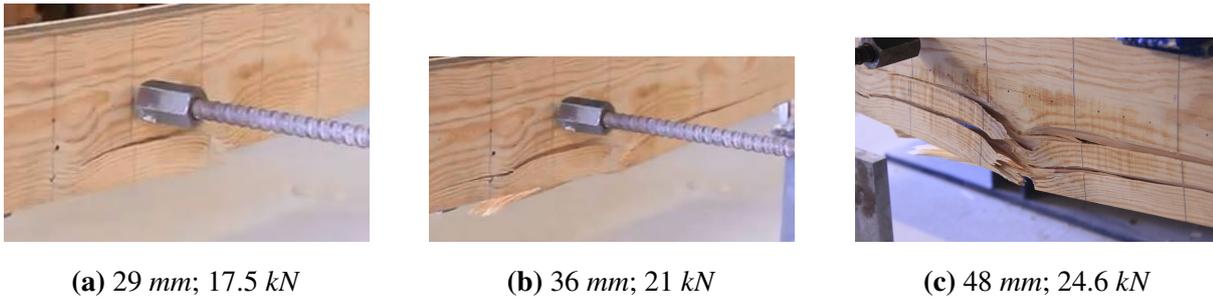


Figura 5.12: (a) início da rotura localizada devido ao desvio das fibras na zona tracionada; (b&c) Propagação de (a).

(MM) Viga Ref2

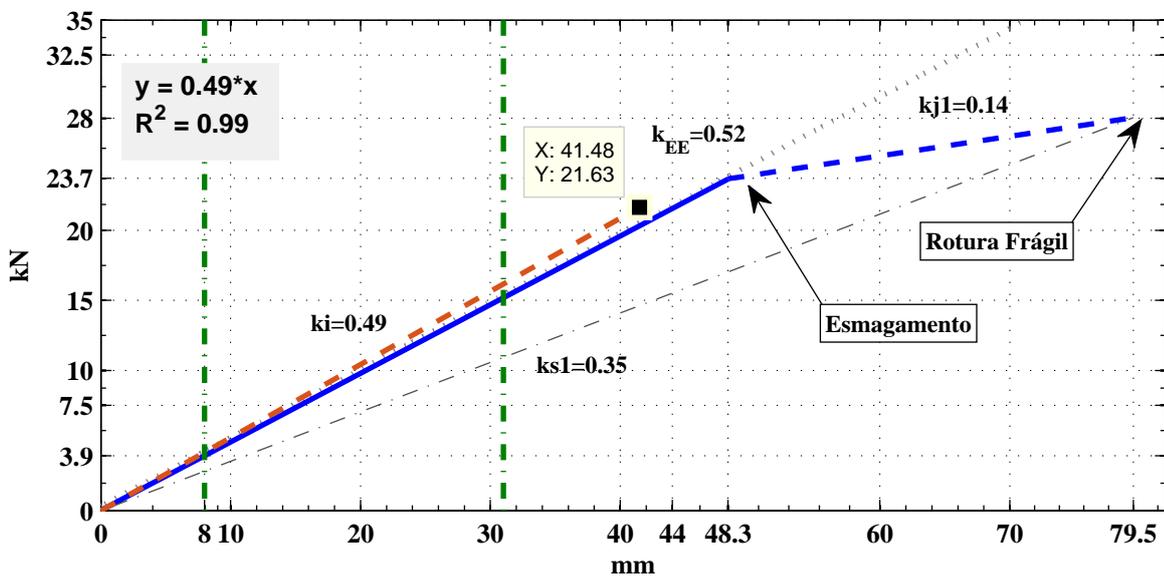


Figura 5.13: Resultados obtidos e estimados para a viga Ref2.

A viga Ref2 é da classe de qualidade EE, ver anexo A. Esta viga, apresenta um $k_i = 0.49$. Ao deslocamento 48 mm, ver Fig. 5.14a, as fibras da zona comprimida cedem por esmagamento, após este ponto a rigidez da viga desce consideravelmente, apresentando um $k_j = 0.14$. A rigidez secante aquando a rotura global da viga é de $k_{s1} = 0.35$.

As fibras comprimidas para cargas superiores às de esmagamento, trabalham em regime plástico, e apresentam uma rigidez negativa, de acordo com o comportamento ideal da madeira à compressão após esmagamento. O patamar de esmagamento observado foi cerca de 30 mm com um ganho de força de cerca de 4 kN.

Quando o limite da resistência à tração das fibras tracionadas é atingido, dá-se a rotura frágil global da viga, ver Fig. 5.14b, que ocorreu para o deslocamento de 80 mm.

O declive da reta do diagrama estimado, $K_{EE} = 0.52$, corresponde a um módulo de elasticidade

global de 14 GPa, sendo este ligeiramente superior ao obtido experimentalmente com o valor de $k_i = 0.49$, e bastante superior à rigidez secante aquando a rotura, $k_{s1} = 0.35$.

No entanto, como o cálculo da estimativa do comportamento à flexão da viga foi baseado na teoria da elasticidade, o patamar plástico não pode ser utilizado para termos de comparação entre o gráfico estimado e o obtido experimentalmente.

As forças e deslocamentos máximos obtidos experimentalmente, para comparação com os obtidos analiticamente, são os relativos ao ponto de esmagamento das fibras comprimidas, deslocamento a partir do qual a viga deixa de se comportar em regime elástico e passa a regime plástico, sendo que, as forças e os deslocamentos estimados e obtidos experimentalmente variam entre 21.5-23.7 kN e de 51.5-48.3 mm respetivamente, sendo por isso o gráfico estimado uma boa aproximação do comportamento real da viga em questão.

A força e o deslocamento resultantes da aplicação do fator γ_M , ao gráfico experimental, calham no patamar em que a viga se comporta em regime elástico, e interseta o gráfico estimado, o que demonstra que o fator γ_M , no caso de vigas que não contenham defeitos, evita que não sejam também considerados os deslocamentos relativos ao comportamento plástico da viga, caso este ocorra.

À semelhança da viga Ref1, para deslocamentos de serviço a viga apenas suporta uma carga de aproximadamente 4 kN.

A atribuição da classe de qualidade EE, fica deste modo verificada, embora a atribuição da classe E fosse mais conservativa.

É importante destacar, que a viga apresentou um diagrama de carga-deslocamento ideal, para uma viga da classe EE (sem defeitos), ver gráfico da Fig. 5.13.



(a) 48-80 mm; 23.7-28 kN



(b) 80 mm; 28 kN

Figura 5.14: (a) Esmagamento localizado das fibras comprimidas; (b) Rotura frágil por tração das fibras tracionadas.

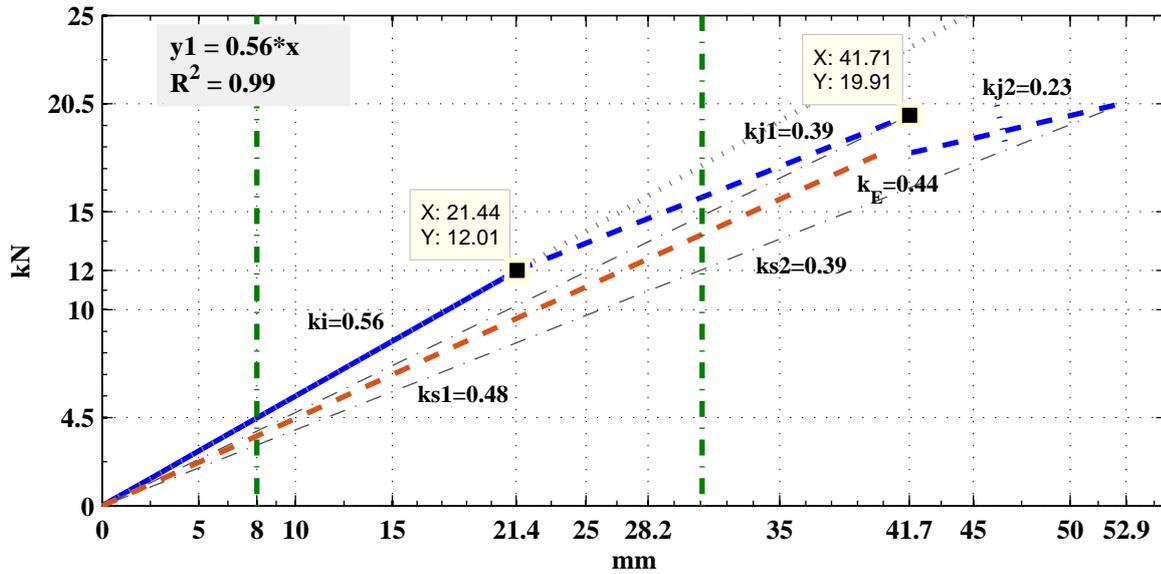
(MM) Viga FC

Figura 5.15: Resultados obtidos e estimados para a viga FC.

A viga FC, é da classe E, ver anexo A, e apresenta um $k_i = 0.56$. A cedência da viga ocorre por rotura localizada das fibras de tração ao deslocamento de 21 mm, começando num pequeno desvio do fio na face inferior, ver Fig. 5.16a. A rotura localizada prolonga-se no sentido das fibras até ao deslocamento de 42 mm. Por efeito da diminuição da altura efetiva ocorre a diminuição da rigidez para $k_{j1} = 0.39$. Do deslocamento 42 ao 53 mm volta a ocorrer o mesmo tipo de rotura localizada, ver Fig.5.16b, só que em sentido contrário, fazendo com que a altura efetiva diminuísse ainda mais, resultando na diminuição da rigidez para $k_{j2} = 0.23$.

A face que continha as fendas desta viga foi colocada a funcionar à compressão, minimizando a influência que estas pudessem ter na rigidez da viga, esperando-se à partida que tivessem influência negativa. Normalmente as fendas de secagem surgem maioritariamente quando as vigas contêm o núcleo, e surgem na zona do cerne, onde a madeira é menos resistente relativamente ao borne. Nestas circunstâncias o borne deve ser, portanto colocado a funcionar à tração para maximizar a resistência e rigidez da viga, mas como se verificou, um pequeno desvio do fio na proximidade da face tracionada pode conduzir ao desfibramento das fibras, comprometendo a altura efetiva de flexão bem como a própria estética da viga.

Como a viga FC foi classificada com a CQ:E, o declive da reta do gráfico $F(\delta)$ esperado, apresenta um declive igual a, $k_E = 0.44$ (12 GPa), à semelhança da viga Ref1. Este valor é inferior ao declive inicial obtido experimentalmente, $k_i = 0.56$, e ao secante, $k_{s1} = 0.48$, correspondente à carga e máxima obtida para o deslocamento de 42 mm, validando-se desde logo a correta atribuição da classe E.

A carga e o deslocamento máximo obtidos, tanto para o gráfico estimado, como para o obtido experimentalmente são bastante próximos, variando entre os valores seguintes de carga e deslocamento, 17.8-20 kN e 40-42 mm.

Neste caso a aplicação do fator γ_M , não inclui o aparecimento da primeira rotura localizada devido a um defeito natural da madeira, mais propriamente o desvio localizado do fio, mas considerando o deslocamento obtido no gráfico de carga experimental correspondente à força de intersecção com o diagrama estimado, este é bastante mais próximo do aparecimento da primeira rotura localizada, sendo por isso mais uma vez, a atribuição da classe de qualidade E, um fator que garante essa margem de erro, fazendo com que a utilização do diagrama estimado seja conservativo.

Para deslocamento de serviço, voltaram-se a obter cargas na gama dos 3 a 5 kN.



(a) 21-42 mm; 12-20 kN



(b) 42-53 mm; 20-20.5 kN

Figura 5.16: (a) Rotura local devido ao desvio localizado das fibras; (b) Nova rotura local devido a um desvio localizado das fibras.

(MM) Viga FT

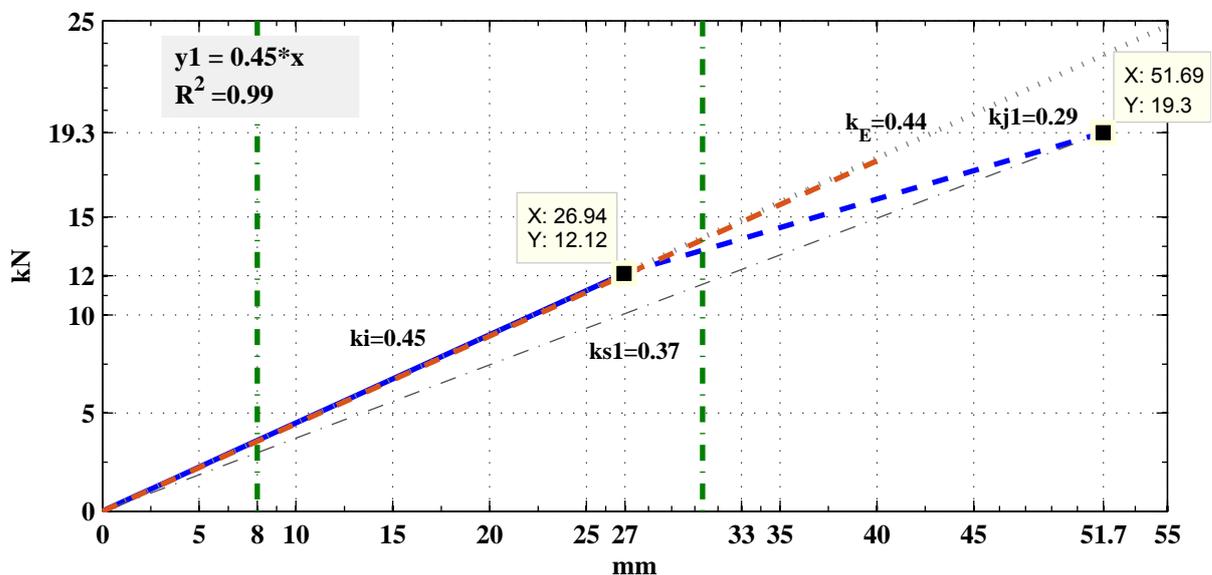


Figura 5.17: Resultados obtidos e estimados para a viga FT.

A viga FT é da classe E, ver anexo A, e está orientada com as fendas na zona tracionada. Apresenta um $k_i = 0.45$ até aos 27 mm. Posteriormente apresenta um $k_{j1} = 0.29$, uma parte devido à presença das fendas. Ao deslocamento de 52 mm ocorre a rotura global e frágil da viga,

com se pode observar nas figuras 5.18a e 5.18b. A rotura tem início no nó solto nº2 situado na face inferior tracionada, ver anexo A.

Note-se que o caminho da rotura, inicia-se no nó, propagando-se diagonalmente com um ângulo de aproximadamente 30 graus (ângulo que a linha que une a zona mais comprimida, ao nó onde se iniciou a rotura, faz com a face inferior tracionada da viga), em direção ao alinhamento das fendas, seguindo caminho sobre o mesmo, até novamente seguir em direção diagonal até à zona mais comprimida da peça, ver Fig. 5.18a.

Poder-se-á considerar este tipo de rotura, como sendo uma rotura típica de vigas de MM que apresentem fendas situadas na face tracionada, em que a rotura poderá ter início num nó ou numa zona onde haja desvio do fio localizado na face tracionada, à semelhança do ocorreu na viga FC. A viga classificada como sendo da classe E, apresenta um $k_E = 0.44$, que demonstrou ser praticamente coincidente com o $k_i = 0.45$, mas superior ao declive da reta secante aquando a rotura, $k_{s1} = 0.37$. Neste caso a aplicação do fator, γ_M , teve em consideração o ponto de viragem da rigidez devido à presença das fendas, e à presença do nó na face tracionada.

A reta vertical que representa o deslocamento relativo à aplicação do fator γ_M , intersesta o gráfico experimental para uma carga próxima da carga máxima onde a viga apresenta a sua rigidez inicial.

O valor máximo de carga estimado e obtido são bastante próximos, 17.8 e 19.3 kN, embora os deslocamentos respetivos sejam distintos, 40 e 52 mm.

A utilização da reta estimada de declive $k_E = 0.44$ é válida para representar o comportamento à flexão da viga mediante a aplicação do fator γ_M , que limita os deslocamentos ao intervalo dos 0 aos 30 mm, intervalo no qual a viga apresenta a sua rigidez inicial.

A carga para o deslocamento de serviço é de aproximadamente de 4 kN.



(a) 52 mm; 19.3 kN



(b) 52 mm; 19.3 kN

Figura 5.18: Rotura global das fibras tracionadas com início num nó

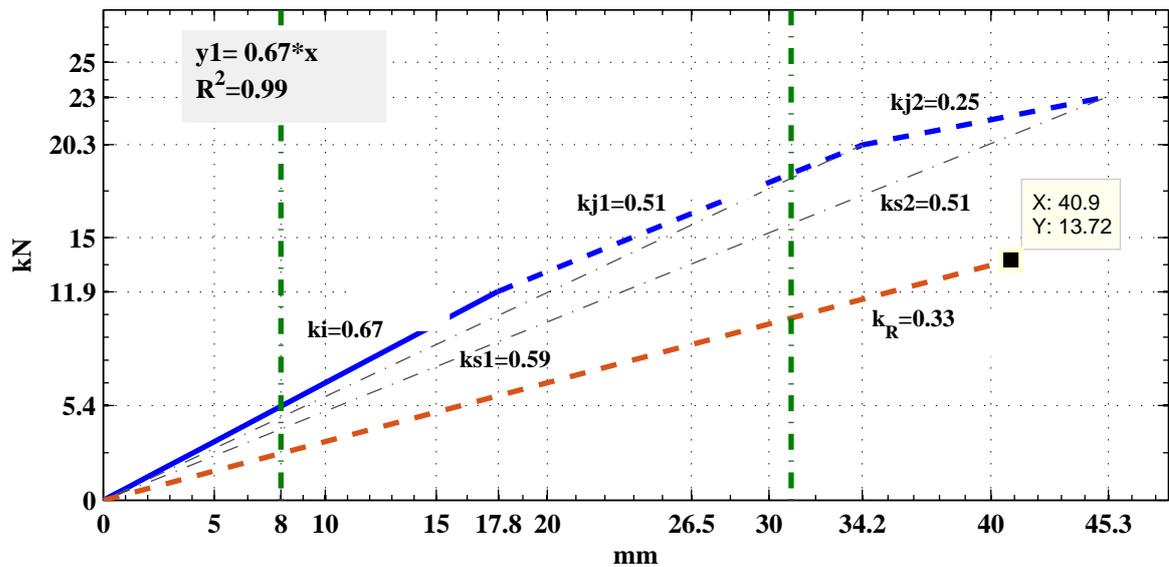
(MM) Viga FTRCF

Figura 5.19: Resultados obtidos e estimados para a viga FTRCF.

A viga FTRCF, é da classe de qualidade R, com forte presença de fendas na vizinhança do centro geométrico da viga, ver anexo A. A viga apresenta um $k_i = 0.67$.

Aos 18 mm de deslocamento, ocorre a rotura localizada das fibras tracionadas na zona 4, devido ao desvio das fibras junto à face tracionada, ver Fig.5.20a , propagando-se por entre os nós 3.1 e 3.2 desde o deslocamento 18 ao 34 mm, ver Fig. 5.20b.

Nesta fase o $k_{j1} = 0.51$ ainda é bastante elevado, por consequência da existência da tira metálica usada como reforço à flexão, ver C.2.2, que evita a propagação da rotura localizada e a rotura global precoce, e por outro lado, retarda a diminuição da perda de rigidez da viga à flexão.

A rotura localizada propaga-se por toda a zona central onde se encontram as fendas, ver Figs. 5.20c e 5.20d, durante a qual o valor de $k_{j2} = 0.25$, verificando-se uma queda drástica da rigidez, para cerca de 1/3 da rigidez inicial.

A diminuição da rigidez para estes níveis é justificada pelo forte dano ocorrido a meio vão, devido à presença das fendas e do núcleo da peça, diminuindo o módulo de cisalhamento, passando a viga a funcionar parcialmente em duas partes, sendo que as forças de tração da face tracionada já colapsada, são apenas transferidas pela tira metálica, a qual garante ainda o funcionamento da viga à flexão.

Para deslocamento superiores a 45 mm ocorreu a rotura da tira metálica por arrancamento dos elementos fixadores (pregos), e por consequência dá-se a rotura global da viga, ver Fig. 5.20f.

A viga classificada como sendo da classe R, apresenta um $k_R = 0.33$ (9 GPa). Repare-se que apesar da viga ter atingido uma carga máxima de 23 kN, a carga da ocorrência da primeira

rotura na madeira deu-se para níveis de carga bastante baixos, 12 kN, próximo da carga máxima estimada para esta viga não reforçada e da classe de qualidade R, o que demonstra, mesmo com o reforço à flexão, que uma viga classificada como sendo da classe de qualidade R, este reforço à flexão não surte qualquer efeito em termos práticos da possibilidade de utilização da viga como elemento estrutural.

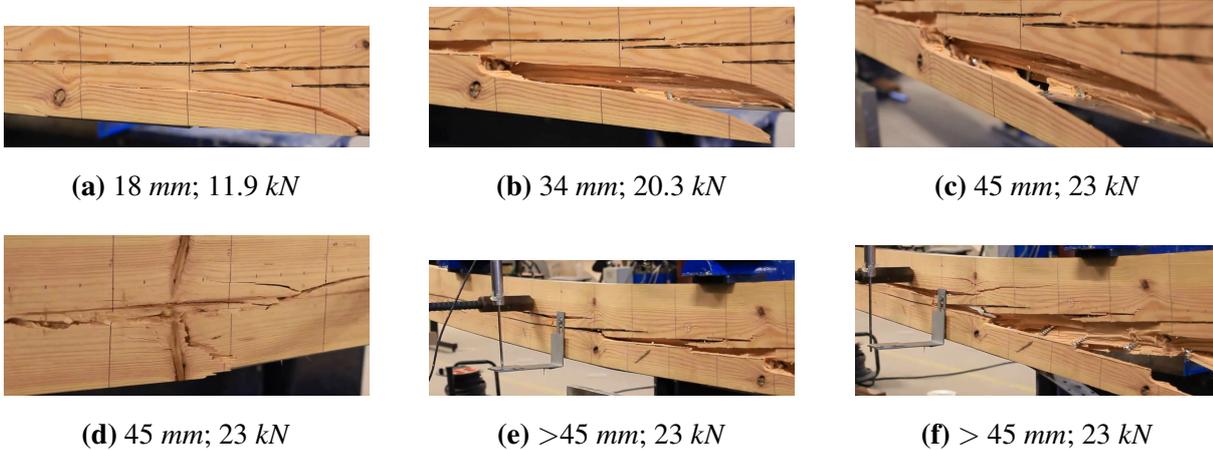


Figura 5.20: (a-e) Roturas locais; Rotura global (f).

(MM) Viga FTRC

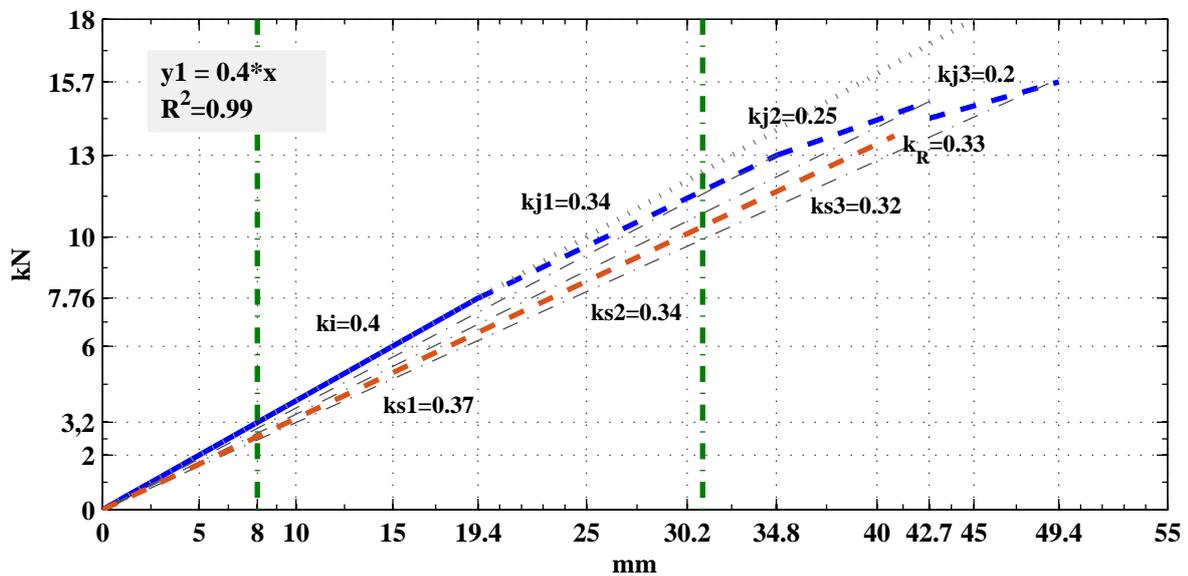


Figura 5.21: Resultados obtidos e estimados para a viga FTRC.

A viga FTRC, foi classificada como sendo da CQ:R, ver Anexo A, e reforçada ao “corte”, por meio de parafusos auto-perfurantes, ver C.2.1. Devido à incorreta colocação dos parafusos, estes conjuntamente com as fendas na face tracionada da peça, passaram a ter um efeito de dano, e como resultado, esta viga foi a que apresentou a menor rigidez à flexão inicial de todas as vigas

de MM ensaiadas, $k_i = 0.4$.

Outros fatores que contribuíram para a baixa rigidez à flexão da viga, foi o forte dano que a viga apresentava devido à presença do núcleo e de fendas de secagem acentuadas na sua vizinhança, na face tracionada, ver Fig. 5.22a.

Deve-se evitar a todo o custo a colocação do cerne a funcionar à tração, pois, como se pode observar na Fig. 5.22a, este contém o núcleo e como se tem observado na vizinhança do núcleo ocorrem sempre fendas de secagem para peças de Pinho bravo cortadas desta forma, e pelo fato do cerne apresentar menores características resistentes à tração que o borne.

Esta viga colocada com o cerne a funcionar a compressão poderia ter apresentado um comportamento à flexão melhorado, pelo fato de que a peça apresentava uma grande percentagem de borne sem defeitos e com baixa inclinação do fio, e por outro lado, poderia-se tirar proveito da contra flecha observada pela linha longitudinal de separação entre o borne e o cerne.

Relativamente à rotura da peça, esta teve início, como era de esperar, na zona danificada da face tracionada, para o deslocamento de 20 mm e carga de 7.8 kN, tendo-se propagado segundo o alinhamento das fendas até ao deslocamento 43 mm, ver Fig. 5.22a . Ao deslocamento 50 mm, ocorre a rotura global que pode ser observada na Fig. 5.22b.

A viga classificada com CQ:R, apresenta um $k_R = 0.33$ (9 GPa), que é superior à rigidez secante aquando a rotura, $k_{s3} = 0.32$ e inferior à rigidez inicial da viga, $k_i = 0.4$.

A aplicação do fator γ_M , não inclui o patamar de deslocamento relativo à propagação da rotura local devido aos defeitos naturais da viga. A carga de início de propagação da rotura local para o deslocamento de 20 mm no valor de 7.8 kN, foi bastante baixa relativamente às apresentadas pelas outras vigas de MM ensaias. O mesmo se observou para a carga de deslocamento de serviço, que apresentou um valor de aproximadamente de 3.2 kN.

Concluindo, a CQ atribuída a esta viga por classificação visual fica assim validada.



(a) 20-43 mm; 7.76-... kN



(b) 50 mm; 15.7 kN

Figura 5.22: (a) Rotura local, forte dano localizado a meio vão na face tracionada; (b) Rotura global.

(MLC) Viga FJs/p: C.5.1

(MLC) Viga FJc/p: C.5.1

(MLC) Viga JCc/p: C.5.1

5.8 Análise comparativa e conclusões

5.8.1 Módulo de elasticidade local, global e resistência à flexão

O gráfico de barras da Fig. 5.23, apresenta os valores obtidos para cada viga, do módulo de elasticidade local, global e da resistência à flexão relativamente aos mesmos valores referentes à viga Ref2. Por meio deste gráfico, é possível quantificar qual o ganho/ perda que as propriedades mecânicas de flexão, anteriormente mencionadas, para cada viga, tiveram relativamente à viga Ref2. A viga Ref2, assume portanto, um papel relevante, por ser a viga de referência.

A escolha da viga Ref2 como viga de referência, foi feita com base no comportamento que esta obteve em ensaio, isto é, por ter sido a única que apresentou plastificação das fibras de compressão antes da ocorrência da rotura por tração das fibras tracionadas, ou até mesmo, antes de ter ocorrido qualquer rotura localizada devido a defeitos naturais. Outro fator foi de ter sido a única classificada com classe de qualidade EE.

Comparados os valores analisados, com os da viga de referência Ref2, pretende-se perceber que vigas apresentaram melhores ou piores propriedades do que esta, permitindo avaliar o rendimento dos métodos de reforço ou até mesmo das variantes que existem nas propriedades naturais das vigas de madeira, como é o caso dos seus defeitos, localização destes e orientação/ colocação da viga no que concerne à posição do cerne e do borne, avaliando o impacto que estas tem no resultado dos valores das propriedades analisadas das restantes vigas. A ausência de defeitos naturais na viga Ref2, torna-se importante por este motivo.

Os aspetos a avaliar e comparar são:

- Resultados obtidos e estimados para as classe de qualidade E e EE, (5.8.2);
- Classe de qualidade E & EE, (5.8.3);
- Classe de qualidade E (posição das fendas), (5.8.4);
- Posição do cerne & borne (vigas não reforçadas de MM), (5.8.5);
- Classe R (vigas reforçadas) & Classe E e EE (não reforçadas), (C.6.1);
- Vigas de MM & MLC (reforço ao corte), (C.6.2).

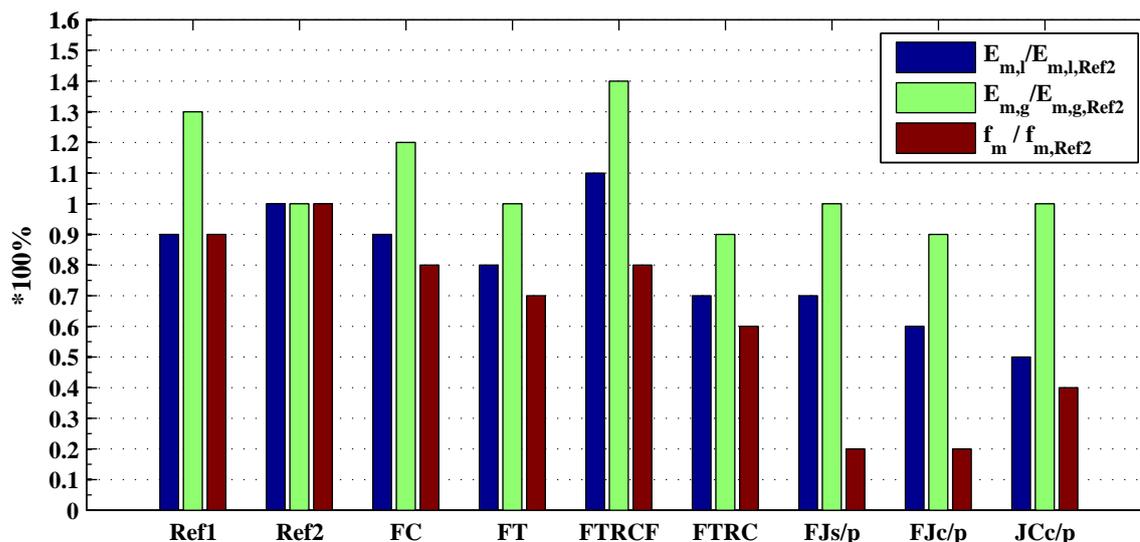


Figura 5.23: Coeficientes unitários.

5.8.2 Resultados obtidos e estimados para as classes E e EE

Uma outra forma de comparar os resultados obtidos por ensaio com os estimados analiticamente é através do cálculo do erro, usando a Eq. 5.17:

$$Erro(\%) = \frac{|Valor_{est} - Valor_{ens}|}{Valor_{ens}} * 100 \quad (5.17)$$

Os parâmetros analisados podem ser visualizados na Tab. 5.8 para as CQ, E e EE. Note-se que a única viga classificada com classe EE é a viga Ref2 e por isso o erro será calculado diretamente entre os resultados estimados e obtidos em relação a esta viga. Por outro lado, as vigas classificadas com classe de qualidade E são três, sendo elas as vigas Ref1, FC e a FT, e por isso o erro será calculado entre o resultado estimado para a classe de qualidade E e a média dos resultados obtidos por ensaio destas mesmas vigas.

O cálculo do erro servirá para entender a dispersão que existe entre os resultados obtidos por ensaio e os resultados estimados para cada CQ, e quais os motivos desta ocorrência. Pretende-se então, demonstrar por meio da aplicação da Eq. 5.17 aos resultados obtidos e estimados, que estes seguem pressupostos diferentes e por isso o erro é elevado, e ainda, analisar os resultados obtidos pela aplicação desta equação, quando os pressupostos são os mesmos, resultando na obtenção de um erro bastante menor.

Ao compararmos os resultados estimados com os resultados obtidos por ensaio para a carga última, não se está a proceder a uma correta análise comparativa, pois os pressupostos de comparação não são os mesmo. Assim sendo, entende-se que os resultados obtidos por ensaio têm em consideração o comportamento plástico do material e deformações relativas à ocorrência de roturas localizadas.

Tabela 5.8: Erros entre os valores estimados e obtidos por ensaio.

Ref.	CQ	f_m	τ	E_m	F	V	M	D
		MPa	MPa	GPa	kN	kN	kN.m	mm
Estimado								
Ref2	EE	63.2	2.60	14	21.63	10.82	8.76	41.48
Ref1; FT; FC	E	52.2	2.14	12	17.86	8.93	7.23	40
Obtido - $F_{est} F_u$ & $D_{est} D_u$								
Ref2	EE	80.2	3.29	12.9	28.04	14.02	11.36	79.5
	Erro	27%	27%	-8%	30%	30%	30%	92%
Ref1		71.6	2.92	16.90	24.64	12.32	9.98	48.23
FC	E	60.4	2.46	15.70	19.91	9.96	8.06	41.71
FT		57.6	2.37	12.30	19.30	9.65	7.82	51.69
	Média	63.2	2.58	14.97	21.28	10.64	8.62	47.21
	Erro	21%	20%	25%	19%	19%	19%	18%
Obtido - $F_{est} F_{ens}$ & $D_{est} = D_{ens}$								
Ref2	EE	59.4	2.44	12.9	20.3	10.16	8.23	41.48
	Erro	-6%	-6%	-8%	-6%	-6%	-6%	0%
Ref1		64.0	2.63	16.90	21.9	10.95	8.87	40
FC	E	56.2	2.31	15.70	19.2	9.62	7.79	40
FT		46.5	1.91	12.30	15.9	7.96	6.44	40
	Média	55.6	2.28	14.97	19.02	9.51	7.70	40
	Erro	6%	6%	25%	6%	6%	7%	0%

Em contraste, os resultados estimados foram obtidos de acordo com a teoria da elasticidade, e por conseguinte, esta não tem em consideração o comportamento plástico do material. Consequentemente os erros obtidos para os parâmetros em análise, são elevados na ordem dos 30%. Particular atenção deve ser dada ao erro do deslocamento da viga Ref2 da classe de qualidade EE. O erro do deslocamento desta viga foi bastante elevado com o valor de 92%. Observando o gráfico da Fig. 5.13, verifica-se que o deslocamento correspondente ao início da plastificação das fibras de compressão é de 42 mm, bastante próximo do estimado, bem como a carga correspondente com o valor de 23.7 kN, sendo neste caso, o valor do erro bastante inferior, pelo fator também de estarmos a comparar valores com o mesmo pressuposto, ambos são relativos ao regime elástico. Entretanto, como as fibras plastificaram com algum endurecimento, a carga última atingiu o valor de 28 kN e o deslocamento passou para o dobro, sendo de 80 mm, fazendo com que o erro do deslocamento aumenta-se para quase 100%.

A comparação dos resultados por meio da determinação do erro deve ser feita com o mesmo pressuposto. A forma de o fazer é comparar os resultados para o mesmo deslocamento estimado e posteriormente comparar as forças estimadas e as obtidas por ensaio, determinando se a previsão

para aquele nível de deslocamento é admissível, tendo noção que o diagrama da viga poderá ir mais além desse deslocamento. Feita assim a comparação, o erro obtido foi na ordem dos 6% apresentando-se bastante baixo. Por conseguinte, pode-se concluir que a estimativa dos resultados foi feita com sucesso.

Em suma, é importante ter sempre a noção que esta análise carece de uma certa subjetividade, devido à grande variabilidade das propriedades da madeira e também da sua grande heterogeneidade no que concerne à presença e localização de defeitos naturais.

5.8.3 Classe de qualidade E & EE

Em comparação com a viga Ref2 (CQ-EE), as vigas Ref1, FC e FT (CQ-E), apresentaram um módulo de elasticidade local menor, (10%, 10% e 20%), e uma resistência à flexão menor (10%, 20% e 30%). Em relação ao módulo de elasticidade global, verificou-se um aumento por parte das vigas Ref1 e FC, (30% e 20%), ver gráficos das Figs. 5.23, 5.9, 5.10.

5.8.4 Classe de qualidade E (posição das fendas)

As vigas que apresentavam fendas de secagem e classificadas visualmente com a CQ:E eram as vigas FC e FT. A viga FC tinha as fendas a funcionar à compressão, enquanto que a viga FT tinha as fendas a funcionar à tração. Poder-se-à afirmar, no contexto dos resultados obtidos para estas vigas em relação à viga Ref2, ver 5.8.3, que as fendas colocadas a compressão, tem menor impacto na diminuição do módulo de elasticidade local e na resistência à flexão do que as fendas colocadas à tração. Conclui-se que a presença de fendas, quer colocadas a compressão ou à tração têm sempre um impacto negativo nestas propriedades. Constatou-se que houve um aumento do módulo de elasticidade global, quando as fendas estão a funcionar à compressão, mantendo-se o mesmo valor quando as fendas funcionam à compressão. É importante observar, que a análise da influência da presença de fendas e sua posição em vigas MM não deve ser feita apenas com base nestes termos, mas também com base na existência de cerne, borne e medula, percentagens dos mesmos e suas posições relativas.

5.8.5 Posição do cerne & borne (vigas não reforçadas de MM)

Recorrendo à Tab. D.5 e às fichas de classificação visual apresentadas no anexo A, é possível identificar visualmente, a percentagem de borne e de cerne, a presença de medula e de fendas e suas posições relativa.

Identificou-se, por meio da classificação visual das vigas analisadas, que as fendas surgem na sua maioria, na proximidade do núcleo, tendo início neste e propagando-se diretamente e radialmente, até à face mais próxima, resultado do processo de secagem natural da madeira. Assim sendo,

para que as vigas de MM possam apresentar as melhores características, e por assim dizer, melhor qualidade, deve ser evitado, na constituição da secção dos elementos estruturais de madeira, a presença da medula e do cerne mais próximo e circundante a esta.

O borne tem mais importância que o cerne na sustentação da árvore como elemento vivo, resistindo ao longo do seu período de vida, às tensões resultantes das condições atmosféricas a que esta está sujeita (ex. vento). Tal importância também se verifica no caso de árvores que se desenvolvam em terrenos com declives acentuados, que promovem assimetrias na direcção de crescimento da árvore (tronco em arco), resultando no desvio do centro de gravidade da árvore e por isso a esforços suplementares. As células do borne, de modo a reagir a tais esforços provocados por estas assimetrias e por forma a recuperar a posição ereta da árvore, desenvolvem-se e adaptam-se distintamente, a nível celular, a estas novas condições de solicitação. Este tipo designado de células formam o designado lenho de reacção, com características mecânicas melhoradas em relação ao lenho normal. No caso de resinosas estas desenvolvem lenho de compressão no lado côncavo (resistência à compressão melhorada), enquanto que nas folhosas, desenvolvem lenho de tração no lado convexo (resistência à tração melhorada). Relativamente ao lenho normal, o borne pelas razões anteriormente mencionadas, apresenta melhores propriedades resistentes e de rigidez que o cerne.

A constituição ideal de um elemento estrutural de MM de resinosas, com o objetivo de maximizar a sua resistência e rigidez à flexão seria portanto, borne (lenho normal) na área da secção transversal solicitada à tração, e borne (lenho de compressão), na área da secção transversal solicitada à compressão. Por questões fisiológicas, esta constituição não é possível, por existência do cerne, que intercala estes dois lenhos. Adicionalmente, à existência do cerne está lhe sempre associado defeitos naturais, tais como as fendas, os nós, e presença de medula entre outros, e dependendo das suas características diminuem de certo modo a resistência à flexão do elemento. No caso da ausência do cerne na constituição do elemento estrutural de MM de resinosas, a segunda opção de constituição ideal seria todavia, toda a área da secção transversal constituída por borne, sendo que neste caso, a rigidez seria menor, mas em contra partida, haveria uma menor incidência de defeitos naturais que pudessem diminuir a resistência à flexão.

Repare-se que a viga Ref2, enquadra-se na primeira constituição ideal, e a viga Ref1, na segunda. Segundo esta lógica, a viga Ref1 teria de apresentar maior rigidez inicial, que a viga Ref2, mas menor resistência à flexão. De acordo com os gráficos das Figs. 5.9 e 5.10, é possível observar que tal se sucedeu.

A terceira constituição ideal possível, seria borne(lenho normal) na área de secção transversal solicitada à tração, e cerne, na área solicitada à compressão. A viga que se enquadra nesta constituição é a viga FC, com fendas à compressão. Esta viga apresentou resistência à flexão menor que as vigas Ref1 e Ref2. Surpreendentemente, apresentou rigidez superior à viga Ref2 e

ligeiramente inferior à viga Ref1. Pode-se concluir que no caso de vigas com fendas, como estas estão associadas ao cerne, e se este for colocado de acordo com a terceira constituição ideal, o impacto das fendas na rigidez é mínima.

Por último, a viga FT, com o cerne e as associadas fendas à tração, trata-se do pior caso de constituição, apresentando os menores valores de resistência e rigidez das vigas Ref1, Ref2, FC. Entretanto, a rigidez desta viga foi ligeiramente inferior à da viga Ref2, livre de defeitos, sendo por isso a influência das fendas na rigidez à flexão bastante reduzida. Não obstante, a diferença na resistência à flexão de ambas, é bastante significativa, e por isso, o impacto que as fendas colocadas na zona tracionada de vigas de MM à flexão têm na resistência à flexão, não pode ser ignorado.

É importante ressaltar, que a análise efetuada é subjetiva, devido a influência que outros fatores ao nível da constituição dos elementos, possam ter tido nos resultados obtidos. Mas que contudo, e baseado em fundamentos teóricos, é possível observar que existe interação dos parâmetros analisados nos resultados obtidos.

5.8.6 Classe R (vigas reforçadas) & Classe E e EE (não reforçadas): C.6.1

5.8.7 Vigas de MM & MLC (reforço ao corte): C.6.2

Capítulo 6

Conclusões

As fendas de secagem são um defeito muito frequente nas peças de madeira, formadas durante o processo de secagem, como resultado das tensões internas que se produzem no lenho inicial por efeito de gradientes de humidade, determinantes de desiguais retrações da massa lenhosa. Simplificadamente, pode-se afirmar que as camadas periféricas das peças por retraírem mais cedo que as internas, ficam submetidas a esforços de tração transversal que tendem a romper a madeira segundo planos radiais. Quando tal ocorre, as fendas produzidas libertam as respetivas tensões devidas não só àqueles esforços, mas também aos de compressão que atuam nas camadas internas pelo efeito de cintagem das externas.

As principais conclusões, baseadas na literatura ([Mateus, 2013](#)) e nos resultados obtidos no trabalho experimental (Cap. 5), relativas ao efeito das fendas na resistência mecânica de elementos estruturais de madeira, são:

- Em elementos sujeitos à tração axial simples, ou à tração por flexão, que não contenham fio torcido ou fio diagonal, as fendas, no caso de se orientarem paralelamente ao eixo das peças, não têm praticamente qualquer efeito desfavorável sobre a resistência;
- Em elementos sujeitos à tração axial, ou à tração por flexão, em que existe fio torcido ou fio diagonal, as fendas estarão orientadas obliquamente em relação ao eixo das peças e a redução da resistência aumentará com o valor do ângulo que estas formam com este;
- Em elementos carregados transversalmente às fibras, as fendas reduzem a área útil resistente do material lenhoso e conseqüentemente a capacidade resistente do elemento a esta ação;
- Nos elementos estruturais submetidos à compressão axial simples, ou à compressão por flexão, a presença de fendas nas áreas comprimidas do material lenhoso, provoca uma distribuição desigual das tensões, fazendo com que se atinja a rotura dos grupos de células lenhosas mais esforçadas quando nas restantes ainda não se instalaram as tensões limites, e como resultado, isto traduz-se numa diminuição da resistência dos elementos, assim

solicitados. Perante estas condições, a capacidade de carga dos elementos de madeira será um pouco inferior à que teria se o efeito não estivesse presente;

- A presença de fendas nos elementos estruturais de madeira, levam à redução da largura efetiva ao corte, e conseqüentemente da área efetiva ao corte e da capacidade resistente aos esforços de corte. No que respeita a este tipo de solicitação, as fendas são o defeito que mais afeta a resistência respetiva;
- É evidente que a resistência de elementos de madeira sujeitos à flexão, é afetada pelo efeito das fendas (face às conclusões precedentes), e depende da distância entre estas e o eixo neutro da peça, e da sua localização no elemento, isto é, em zonas de tensões tangenciais máximas;
- Ainda relativamente a elementos sujeitos à flexão, para o caso de fendas situadas junto do bordo de compressão ou do bordo de tração, o seu efeito pode considerar-se pequeno ou mesmo nulo, quando não associadas a zonas de fio irregular (vizinhança de nós), de fio diagonal ou de fio torcido;
- Se as fendas estiverem associadas às zonas mencionadas no item anterior, a capacidade resistente à flexão destes elementos, vê-se diminuída, principalmente quando estas zonas se situam na área tracionada. Devido ao forte desvio do fio neste tipo de defeitos, quando estas fibras são tracionadas, surgem tensões localizadas perpendiculares às fibras, dando origem a novas fendas que serão mais intensas quanto maior o nível de solicitação, e como resultado, diminuem a capacidade resistência e rigidez à flexão do elemento. Por outro lado, se estas zonas se situaram na área comprimida, este efeito é muito menor, logo terá muito menor impacto na capacidade de carga do elemento à flexão.

Constate-se que as limitações de fendas localizadas em zonas comprimidas, independente das suas características geométricas, e desde que o elemento se comporte como uma unidade estrutural, são apenas impostas por razões estéticas. No entanto, será sempre conveniente tratá-las e repará-las principalmente em elementos expostos às intempéries, dado o aumento do risco que apresentam relativamente ao desenvolvimento dos fungos causadores de podridões, por permitirem a entrada fácil da água nas camadas internas do lenho.

Referências Bibliográficas

- Aicher, S., & Schrank, M. (2006). Shear reinforcement of glulam beams with glued in steel rods – a case study. , *17*, 143–160.
- Angst, V., & Malo, K. A. (2012). The effect of climate variations on glulam - an experimental study. *European Journal of Wood and Wood Products*, Vol. 70(5th ed.), pp. 603–613. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007/s00107-012-0594-y> doi: 10.1007/s00107-012-0594-y
- Angst-Nicollier, V. (2012). *Moisture Induced Stresses in Glulam - Effect of Cross Section Geometry and Screw Reinforcement* (Unpublished doctoral dissertation). NTNU.
- Arriaga, F., Peraza, F., Esteban, M., Bobadilla, I., & García, F. (2002). *Intervención en estructuras de madera*. AITIM, Madrid.
- Bejtka, I., & Blaß, H. (2005). Self-tapping screws as reinforcements in connections with dowel-type fasteners. *Proceedings of the CIB-W18 Meeting*. Retrieved from <http://holz.vaka.kit.edu/public/43.pdf>
- Bell, K. (2007). Shear failure in glulam frames - An actual case. In *Cost e55*.
- Bergman, R. (2010). Drying and Control of Moisture Content and Dimensional Changes. In *Wood handbook - wood as an engineering material* (pp. 1–20).
- Blaß, H. J., & Frese, M. (2007). Failure Analysis on Timber Structures in Germany-A Contribution to COST Action E55. In *A contribution to cost action e55*.
- Blass, H. J., & Frese, M. (2010). Failure analysis on timber structures. Karlsruhe: KIT Scientific publishing [only in German: Schadensanalyse von Hallentragwerken aus Holz].
- Blass, H. J., & Frese, M. (2011). Failure analysis on timber structures in Germany. In J. Kohler, G. Fink, & T. Toratti (Eds.), *Assessment of failures and malfunctions*. Germany: Shaker Verlag.
- BS EN 392. (1995). *Glued laminated timber - Shear test of glue lines*. BSI.

- Cachim, P. B. (2014). *Construção em Madeira - A Madeira como material de construção* (2nd ed.; E. T. Publindústria, Ed.). Engebook – Conteúdos de Engenharia e Gestão. Retrieved from <http://www.engebook.com/2/11135/Construcao-em-Madeira-A-Madeira-como-Material-de-Construcao-eBook>
- Carneiro, F. (2012). *Reforço de vigas de madeira com elementos de aço em obras de reabilitação* (Dissertação de Mestrado). FEUP.
- COST Action FP1101. (2014). *Highly performing timber structures: reliability, assessment, monitoring and strengthening* (B. Franke & S. Franke, Eds.). Biel, Switzerland.
- Coutinho, J. S. (1999). Apontamentos das aulas teóricas de Materiais de Construção I.
- Cruz, H. (2009). Plano de Investigação Programada - LNEC 2005-2008.
- Cruz, H. (2012). Inspeção e monitorização de estruturas de madeira. In J. M. Lourenço P.B. e Branco (Ed.), *Seminário coberturas de madeira*.
- Dashöfer, V. (2015). *Tema: C - Estruturas, Modulo: 08 - Estruturas de madeira, Reparação de fendas*. Retrieved from <http://construironline.dashofer.pt/?s=modulos{%&}v=capitulo{%&}c=1824>
- Delahunty, S., Chui, Y. H., & McCormick, M. (2014). Use of double-threaded self-tapping screws for in-situ repair of cracked timber connections. (2), 2–3.
- Dias, A., Cruz, H., Machado, J., Custódio, J., & Palma, P. (2009). Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira [Computer software manual].
- Dietsch, P. (2012). *Einsatz und Berechnung von Schubverstärkungen für Brettschichtholzbauteile* (PhD Thesis). Technische Universität München.
- Dietsch, P. (2014). Mapping of cracks in glulam beams and assessing the effect of environmental conditions.
- Dietsch, P. (2015). *EN 1995 - Eurocode 5: Design of timber structures, Tension perpendicular to the grain - holes - curved beams*, Technische Universität München. Retrieved from <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=332{#}Towards>
- Dietsch, P., & Brandner, R. (2015). Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements - A state-of-the-art report. *Construction and Building Materials*.
- Dietsch, P., Franke, S., Franke, B., Gamper, A., & Winter, S. (2014). Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *Journal of Civil Structural*

Health Monitoring, Vol. 4(3), pp. 1–13. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007/s12283-014-0082-7>

Dietsch, P., Gamper, A., Merk, M., & Winter, S. (2012). Building Climate - long-term measurements to determine the effect on the moisture gradient in large-span timber structures. *CIB-W18/45-11-1*, 1–14.

Dietsch, P., & Kreuzinger, H. (2011). Guideline on the assessment of timber structures: Summary. *Engineering Structures*, 33(11), 2983–2986. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029611000988> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.027>

Dietsch, P., Kreuzinger, H., & Winter, S. (2008). The Bad Reichenhall Ice-Arena Collapse. In *Cost e55 - modelling of the performance of timber structures*.

Dietsch, P., Kreuzinger, H., & Winter, S. (2013). Design of shear reinforcement for timber beams. In R. Görlacher (Ed.), *Cib-w18 meeting 46* (pp. 195–209). Vancouver, Canada. Retrieved from <http://holz.vaka.kit.edu/download/cib2013.pdf>

Dietsch, P., & Schänzlin, J. (2010). Personal communication, 17.8.2010.

Echavarría, C. (2007). Bolted timber joints with self-tapping screws. *Revista EIA*(8), 37–47. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000200004&lng=en&nrm=iso&tlng=es

EN 1194. (2002). *Timber structures. Glued laminated timber. Strength classes and determination of characteristic values*. CEN.

EN 1310. (1997). *Round and sawn timber - Method of measurement of features*. CEN.

EN 1313-1. (2010). *Round and sawn timber. Permitted deviations and preferred sizes. Part 1: Softwood sawn timber*. CEN.

EN 13183-1. (2002). *Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method*. CEN.

EN 13183-3. (2002). *Moisture content of a piece of sawn timber - Part 3: Estimation by capacitance method*. CEN.

EN 14080. (2005). *Timber Constructions - Laminated Timber Requirements*. CEN.

EN 14081. (2005). *Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section*. CEN.

- EN 14081-1. (2005). *Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements*. CEN.
- EN 14592. (2012). *Timber structures – Dowel-type fasteners - Requirements*. CEN.
- EN 1912. (2004). *Structural timber. Strength classes. Assignment of visual grades and species*. CEN.
- EN 1995:1-1. (2004). *Eurocode 5: Design of timber structures, Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. CEN, Brussels, 2004/AC:2006.
- EN 1995:1-2. (2003). *Eurocode 5: Design of Timber Structures, Part 1-2: General - Structural fire design*. CEN, Brussels.
- EN 301. (1997). *Adhesives, phenolic and aminoplastic for load-bearing timber structures*. CEN.
- EN 302. (n.d.). *Adhesives for load bearing timber structures. Test methods*. CEN.
- EN 338. (2003). *Bois de structure - Classes de résistance*. CEN.
- EN 350-2. (1994). *Durability of wood and wood-based products – Natural durability of solid wood – Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe*. CEN.
- EN 384. (2004). *Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density*. Brussels, Belgium: CEN.
- EN 385. (2001). *Finger jointed structural timber - Performance requirements and minimum production requirements*. CEN.
- EN 386. (2001). *Glued laminated timber. Performance requirements and minimum production requirements*. CEN.
- EN 391. (2001). *Glued laminated timber. Delamination test of glue lines*. CEN.
- EN 408. (2010a). *Bending strength parallel to grain*. CEN. CEN.
- EN 408. (2010b). *Determination of shear strength parallel to the grain*. CEN.
- EN 408. (2010c). *Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties*. BSI Standards Publication.
- EN 518. (1995). *Structural timber – Grading – Requirements for visual strength grading standards*. Brussels, Belgium: CEN.

- EN 519. (1995). *Structural timber - Grading requirements for machine strength graded timber and grading machines*. CEN.
- Farinha, J. S. B., & dos Reis, A. C. (1993). Tabelas Técnicas. (P.O.B.), 1–633.
- Fortino, S., Mirianon, F., & Toratti, T. (2009). A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures. *Mechanics of time-dependent materials*, 13(4), 333–356.
- França, K. D. L. (2007). *Estudo de reforços de elementos estruturais de madeira com estrutura estrutura metálica*. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Retrieved from <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2314>
- Franco, S. I. S., & Others. (2013). Proposta de atribuição de propriedades mecânicas a elementos estruturais de madeira por inspeção visual in situ.
- Franke, B., Scharmacher, F., & Müller, A. (2013, sep). Assessment of the glue-line quality in glued laminated timber structures. Proceedings, Shatis 2013, Italy. *Advanced Materials Research*, 778, 424–431. Retrieved from <http://www.scientific.net/AMR.778.424> doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.778.424
- Franke, S., Franke, B., & Harte, A. (2015). Failure modes and reinforcement techniques for timber beams—State of the art. *Construction and Building Materials*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815007023>
- Franke, S., & Magnière, N. (2014). Investigation on elements presenting cracks in timber structures. In *Wcte 2014, world conference on timber engineering*.
- Frühwald, E. (2007). Analysis of failures in timber structures based on a Nordic project [PowerPoint presentation], Lund Institute of Technology. In *Cost e 55, graz, 2007-05-14*.
- Gaspar, F., Cruz, H., Nunes, L., & Gomes, A. (2005). Fabrico de estruturas de lameladas-coladas com madeira de Pinho Bravo tratado em autoclave.
- Geidner, T. (2003). 'Risse in BS-Binder'. *Bauen mit Holz* 9, 9, 33–36.
- Gereke, T., & Niemz, P. (2010). Moisture-induced stresses in spruce cross-laminates. *Engineering Structures*, 32(2), 600–606.
- Handbook 2. (2008). Design of Timber Structures according to EC 5 (1st ed.) [Computer software manual].

- Jankowsky, I. P. (1995). *Equipamentos e processos para secagem da madeira*. Piracicaba, São Paulo.
- Jankowsky, I. P., & Silva, L. E. (1985). Gradiente de umidade durante a secagem da madeira de *araucaria angustifolia* (bert.) o. ktze. *Revista {IPEF}*, Piracicaba, 7(31), 57–59.
- JCSS. (2006). JCSS PROBABILISTIC MODEL CODE - Part 3: RESISTANCE MODELS, Joint Committee for Structural Safety.
- Jönsson, J. (2004). Internal stresses in the cross-grain direction in glulam induced by climate variations. *Holzforschung*, 58(2), 154–159.
- Lam F., Schulte-Wrede M., Yao C.C., G. J. (2008). Moment resistance of bolted timber connections with perpendicular-to-grain reinforcements. In *Conference proceedings for world conference on timber engineering. miyazaki, japan*.
- Lehringer, C., & Salzgeber, D. (2014). Repair of cracks and delaminations in glued laminated timber. In B. Franke & S. Franke (Eds.), *Cost action fp1101 (workshop): Highly performing timber structures: reliability, assessment, monitoring and strengthening* (pp. 43–48). Biel, Switzerland.
- LNEC. (1963). *Ficha de Características. Pinho Bravo*.
- M1/LNEC. (1997). *Madeira para construção - Ficha M1: Especificação de madeira para estruturas*.
- M2/LNEC. (1997). *Madeira para construção - Ficha M2: Pinho bravo para estruturas*.
- Machado, J. S. (2014). Conhecer a madeira como base de suporte a ações de reabilitação. In P. B. Lourenço, J. M. Branco, & H. S. Sousa (Eds.), *Intervir em construções existentes de madeira* (pp. 23–36).
- Machado, N. (2006). *Variação dimensional da madeira devida ao seu comportamento higroscópico* (Dissertação de Mestrado). FEUP.
- Madeira. (2007). Noções de anatomia da madeira. , 4–53.
- Magnière, N., Franke, S., & Franke, B. (2014). Numerical investigation of the residual load-carrying capacity of cracked timber elements. In K.-U. Schober (Ed.), *Cost action fp1004: Experimental research with timber* (pp. 203–208). University of Bath.
- Mariani, M. (2004). *Consolidamento delle strutture lignee con l'acciaio*. DEI.

- Martins, T. (2010). Dimensionamento de estruturas em Madeira - Coberturas e pavimentos. *IST, Lisboa*.
- Mateus, T. (2013). *M 179 - Bases para o Dimensionamento de Estruturas de Madeira* (4ed. ed.; LNEC, Ed.).
- Munch-Andersen, J., & Danish. (2009). The Siemens Arena collapse in a robustness perspective. In *Cost e 55*.
- Myllypa. (2012). Microsoft Word - Ch 1_Introduction_2012_12_10_RC.
- Naychuk, A. Y. (2013). Estimation of Load-Bearing Capacity and Stiffness of Timber Beams with Through-Thickness Cracks. *Advanced Materials Research*, 778, 361–368.
- Negrão, J., & Faria, A. (2009). *Projecto de estruturas de madeira* (PUBLINDÚSTRIA, Ed.).
- NP 180. (1962). *Anomalias e defeitos da madeira*. IGPAI – Repartição de Normalização, Lisboa.
- NP 4305. (1995). *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual*. IPQ, Lisboa.
- NP 614. (1973). *Madeiras - Determinação do teor em água*. IPQ.
- NP 616. (1973). *Madeiras - Determinação da massa volúmica*.
- NP EN 13183-2. (2012). *Teor de água de um provete de madeira serrada-Part 2: Estimativa pelo método da resistência elétrica*. IPQ.
- NP EN 1912. (2003). *Madeira para estruturas. Classes de resistência. Atribuição de classes de qualidade e espécies*. IPQ.
- NP EN 1993:1-1. (2010). *Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. CEN.
- NP EN 335-1. (1994). *Durabilidade da madeira e de produtos derivados. Definição das classes de risco de ataque biológico. Parte 1: Generalidades*. IPQ.
- NP EN 338. (2001). *Madeira para estruturas, Classes de resistência*. Lisboa: IPQ.
- Ormarsson, S., Dahlblom, O., & Petersson, H. (1998). A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation Part 1: Theory. *Wood Science and Technology*, 32(5), 325–334.

- Porteous, J., & Kermani, A. (2013a). *Structural timber design to Eurocode 5*. John Wiley & Sons.
- Porteous, J., & Kermani, A. (2013b). *Structural Timber Design to Eurocode 5* (2nd ed. ed.). John Wiley & Sons.
- Pousette, A., & Ekevad, M. (2012). Shear Resistance of Glulam Beams with Cracks. In *Cib-w18/45-12-3* (pp. 1–9). Sweden.
- prEN 14080. (2011). *Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber*. CEN.
- Purbond VN 3064. (2006). 'Zweikomponenten-Polyurethan Harz zur Sanierung von tragenden Holzbauteilen nach DIN 1052/EN301'.
- Quenneville, P. (2014). Failure cases of mechanical fasteners in timber connections. In B. Franke & S. Franke (Eds.), *Cost action fp1101 (workshop): Highly performing timber structures: reliability, assessment, monitoring and strengthening* (pp. 31–34). Biel, Switzerland.
- Radovic, B., & Goth, H. (1992a). Development and present state of a method for the restoration of cracks in gluelam beams. [Pt. 1]. [German]. *Bauen mit Holz*. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DE19930026614>
- Radovic, B., & Goth, H. (1992b). Development and present state of a method for the restoration of cracks in gluelam beams. [Pt. 2]. [German]. *Bauen mit Holz*. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DE19930026613>
- Rammer, D. R. (2001). *Effect of moisture content on nail bearing strength*. Res. Pap. FPLRP-591. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Rammer, D. R., & Winistorfer, S. G. (2001). Effect of moisture content on dowel-bearing strength. *Wood and Fiber Science*, Vol. 33(No. 1), pp. 136–139.
- Rodrigues, R. M. S. C. d. O. (2004). *Construções antigas de madeira: experiência de obra e reforço estrutural* (MTh Thesis). UM.
- Rotafix. (2009). Product Catalogue. *Names*, 44(July), 28–54. doi: 10.1007/s10550-006-0094-x
- Rothoblaas. (2012). Catálogo rothofixing.
- Rothoblaas. (2015). *Catálogo Parafusos para madeira*.
- Santos, J. A., Duarte, M. C., Santos, J. M., & Pestana, L. (2011). Bem utilizar madeiras portuguesas na construção/reabilitação. *CIMAD 11 – 1º Congresso Ibero-Latino Americano*

- da Madeira na Construção, 7-9/06/2011, Coimbra, Portugal, 1–15. Retrieved from <http://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/1334>*
- Sanz, F., Latour, S., Neves, M., Bastet, E., Pischedda, D., Piñeiro, G., . . . Marques, A. (2007). Aplicações industriais do pinheiro-bravo. *Projecto “Technical Co-operation for the Development of the Industrial Applications of Pinus pinaster*.
- Scharmacher, F., & Müller, A. (2012). *Erfahrungen und Konsequenzen aus der Langzeitüberwachung von Holzbrücken. [PowerPoint presentation] (Tech. Rep.)*. Bridge Symposium - Grünbrücken aus Holz, Stuttgart, Germany.
- Serino, N. d. S. (2014). *Pré-esforço como Técnica de Reforço à Flexão de Vigas de Madeira (Dissertação de Mestrado)*. UM.
- Silva, M. E., Dias, A., & Lousada, J. L. (2013). *Madeira de Pinho - Características e Utilização*.
- Simões, L. M. C., Machado, J. S., Cruz, H., & Negrão, J. H. (2011). Avaliação do ajustamento de distribuições de probabilidade ao comportamento à flexão de Pinho bravo. *CIMAD 11 – 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção, 7-9/06/2011, Coimbra, Portugal, 1–6*.
- Sjödin, J. (2008). *Strength and Moisture Aspects of Steel Timber Dowel Joints in Glulam Structures: An Experimental and Numerical Study (PhD thesis)*.
- Smedley, D. (2008). Repairs of glued laminated structures. In K. Richter & H. Cruz (Eds.), *Cost e34 - wg1: Bonding on site* (1st ed., pp. 56–61).
- Svensson, S., & Toratti, T. (2002). Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity. *Wood Science and Technology, 36*(2), 145–156.
- Tannert, T., & Lam, F. (2009, apr). Self-tapping screws as reinforcement for rounded dovetail connections. *Structural Control and Health Monitoring, Vol. 16*(3th ed.), pp. 374–384. Retrieved from <http://doi.wiley.com/10.1002/stc.283> doi: 10.1002/stc.283
- Trautz, M., & Koj, C. (2009). Self-tapping screws as reinforcement for timber structures. In *Symposium of the international association for shell and spatial structures (50th. 2009. valencia). evolution and trends in design, analysis and construction of shell and spatial structures: Proceedings*.
- Wikipedia. (2015). *Madeira*. Retrieved from <http://pt.wikipedia.org/wiki/Madeira>

ANEXOS

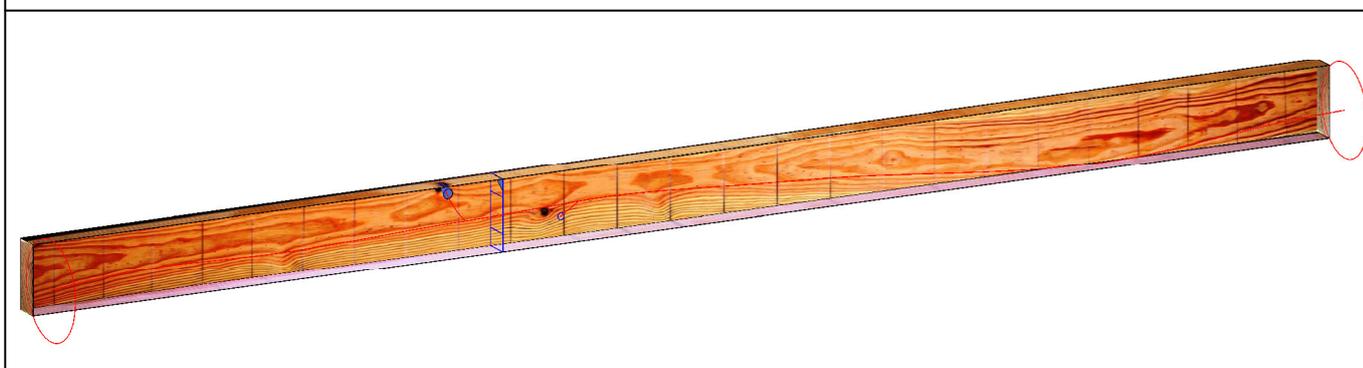
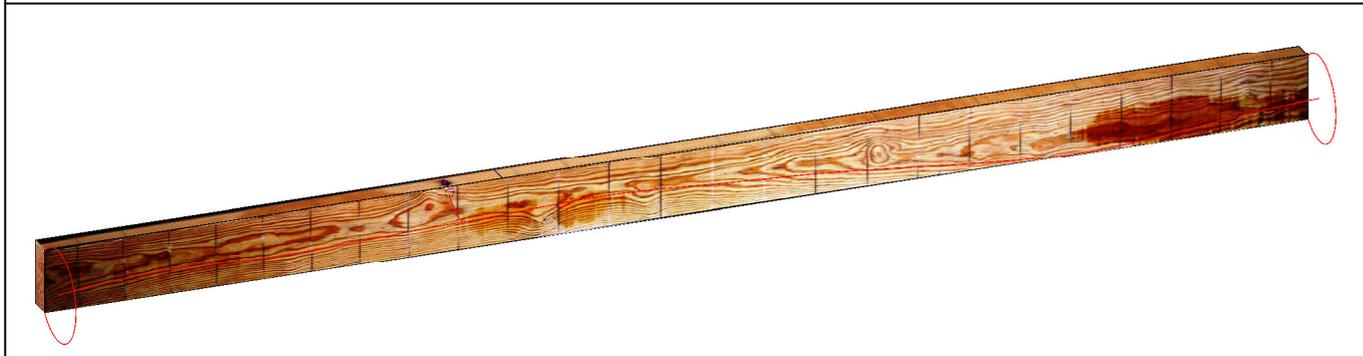
ANEXOS A

Fichas de classificação Visual

NP 4305 - Madeira Serrada de Pinheiro Bravo para Estruturas - Classificação Visual

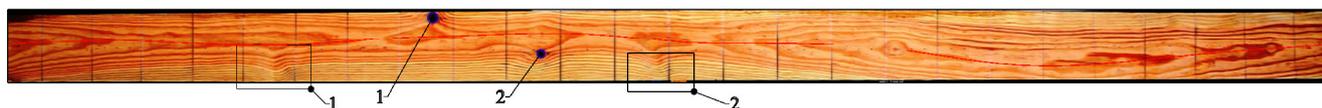
Designação:	REF1	MARCAÇÃO	
Secção - B*H*L (mm ³)	48*132*2552	CLASSE	E (C18)
Volume (dm ³)	16.1700	ESPÉCIE	Pinho Bravo
Área (mm ²)	6336	AUTOR	Luís Costa
Massa (Kg)	10.6	DATA	7/10/2014
Peso Específico (kg/m ³)	655.6	TEOR DE HUMIDADE (%)	12%

Modelo 3D



Registo Fotográfico

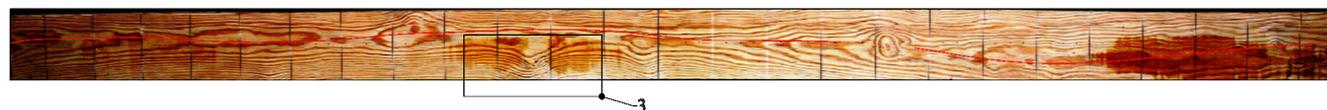
Trás



Baixo



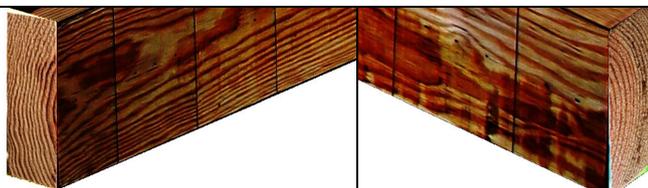
Frente



Cima



Esquerda



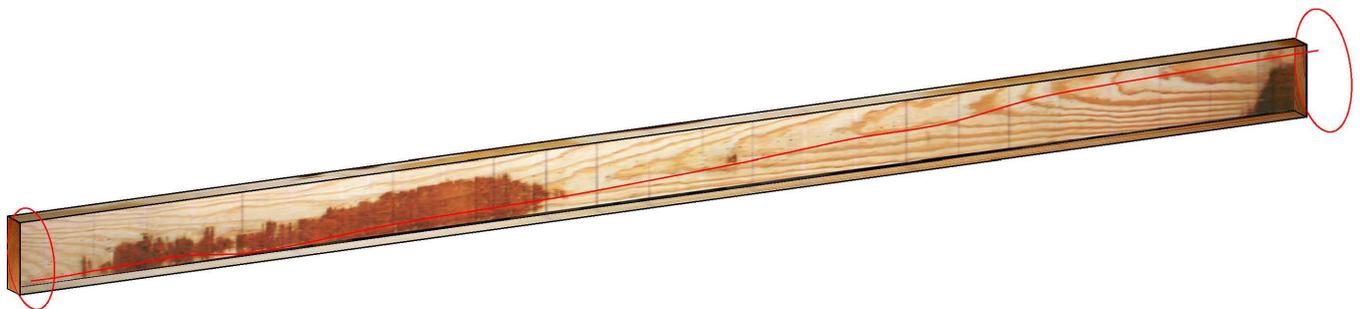
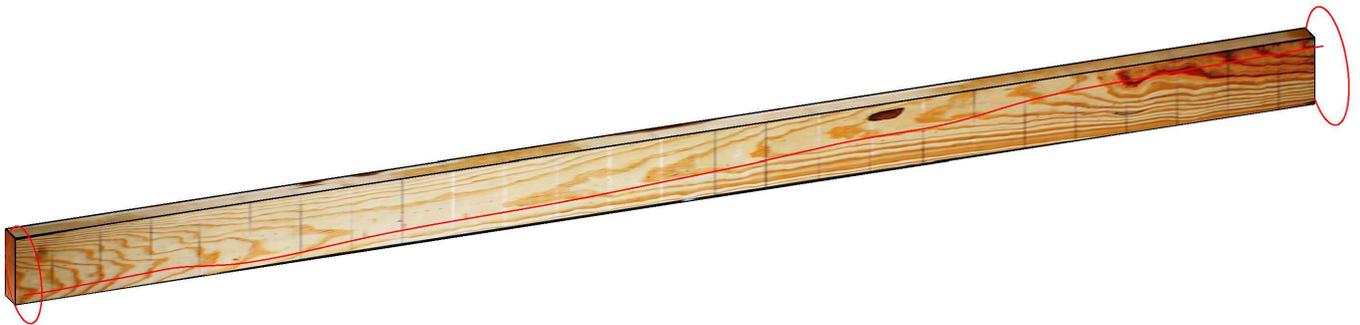
Direita

Nº	<u>Características e defeitos da madeira</u>		<u>CLASSES DE QUALIDADE</u>			
			Classe EE (C35)		Classe E (C18)	
1.1	Nós	Kar Marginal	<1/5	x	<1/2	<1/2
1.2		Kar Total	<1/5	x	<1/2	<1/3
2	Fio		<1/10		<1/6	x
3	Taxa de crescimento		< 6 mm	x	< 10 mm	
4.1.1	Fendas	Não Repassadas	Fendas superficiais com lf<300 mm podem ser ignoradas			
4.1.2			lf<1/4*1 e lf<600 mm		lf<1/4*1 e lf<900 mm	
4.2.1		Repassadas	Não mais que uma fenda com o comprimento máximo, por cada metro			
4.2.2			Permitir só nos topos_ lf<600 mm a lf<1.0*a		Permitir só nos topos: lf<1.5*a	
5.1	Descaio		<1/4*b; <1/3*a no comprimento total		<1/3*b; <1/3*a no comprimento total	
5.2			<1/3*b; <1/3*a ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)		<1/2*b; <1/2*a ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)	
6.1	Empenos	em arco de face (em 2 m)	Se b=35 mm -> X<30 mm; Se b>75 mm -> X<10 mm (interpolare para valores de espessura intermédios)			
6.2		em arco de canto (2 m)	Se a=60 mm -> Y<10 mm; Se a>250 mm -> Y<5 mm (interpolare para valores de espessura intermédios)			
6.3		em hélice (em 2 m)	Z<1,5 mm por cada 25 mm de largura da peça			
6.4		em meia-cana	Xf< 1mm por cada 25 mm de largura da peça			
7.1	Bolsas de Resina e casca inclusa	Não Repassada	Sem limites caso sejam mais curtas que a largura da pela. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas			
7.2		Repassada	Sem limite caso o seu comprimento seja <1/2 da largura da peça. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas			
8.	Medula		Não admitida	x	Admitida	
<u>OBSERVAÇÕES</u>					Rejeita	Aceita*
9	Ataque de fungos ou podridão			x		
10	Ataque de insetos			x		
11	Fungos cromogéneos				x	
12	Zonas danificadas (que comprometam a resistência) ex. conjunto de nós					
13	Desvio local de fios (descontinuidade de um grande numero de fibras)					x
<u>COMENTÁRIOS</u>						
<p>(1.1) 1- Nó isolado - KAR Marginal =0.21<1/5; KAR total=0<1/5 ; (2) 9°=tang(9)=0.158<1/6=0.167; (3) 3.4 mm < 6 mm ; (8) Não contém medula; (13) 1,2 e 3 - Zonas de descontinuidade de fibras próximas dos bordos; Diminuição da resistência à flexão global, por rotura local das fibras nestas zonas, principalmente quando se localizam na zona tracionada.</p> <p>Viga Classe E (C18)</p>						

NP 4305 - Madeira Serrada de Pinheiro Bravo para Estruturas - Classificação Visual

Designação:	REF2	MARCAÇÃO	
Secção - B*H*L (mm ³)	48*133*2552	CLASSE	EE (C35)
Volume (dm ³)	16.29	ESPÉCIE	Pinho Bravo
Área (mm ²)	6384	AUTOR	Luís Costa
Massa (Kg)	10.1	DATA	7/10/2014
Peso Específico (kg/m ³)	619.9	TEOR DE HUMIDADE (%)	12%

Modelo 3D



Registo Fotográfico

Trás



Baixo



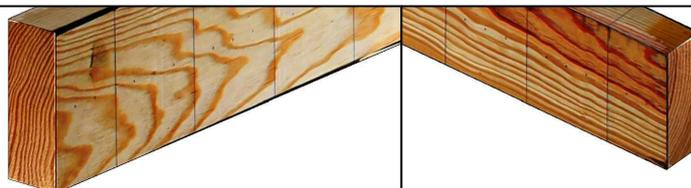
Frente



Cima



Esquerda



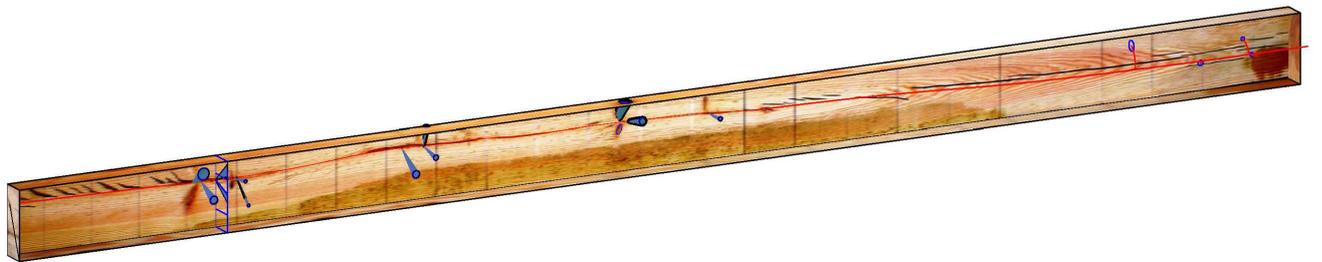
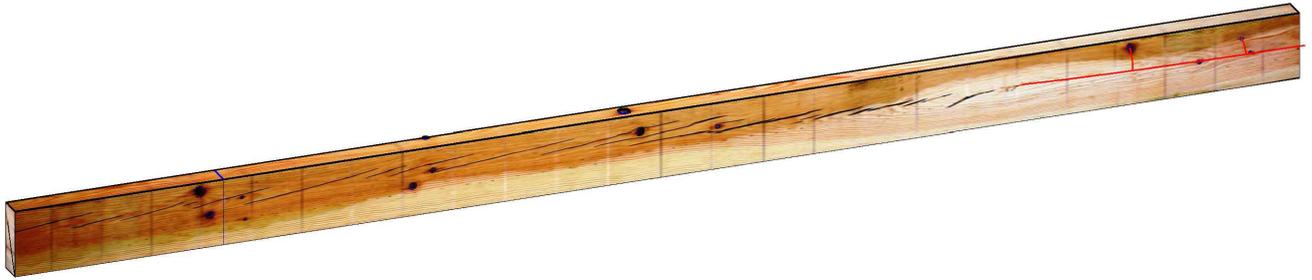
Direita

Nº	<u>Características e defeitos da madeira</u>		<u>CLASSES DE QUALIDADE</u>			
			Classe EE (C35)		Classe E (C18)	
1.1	Nós	Kar Marginal	<1/5	x	<1/2	<1/2
1.2		Kar Total	<1/5	x	<1/2	<1/3
2	Fio		<1/10	x	<1/6	
3	Taxa de crescimento		< 6 mm	x	< 10 mm	
4.1.1	Fendas	Não Repassadas	Fendas superficiais com lf<300 mm podem ser ignoradas			
4.1.2			lf<1/4*a e lf<600 mm		lf<1/4*a e lf<900 mm	
4.2.1		Repassadas	Não mais que uma fenda com o comprimento máximo, por cada metro			
4.2.2			Permitir só nos topos_ lf<600 mm a lf<1.0*a		Permitir só nos topos: lf<1.5*a	
5.1	Descaio		<1/4*b; <1/3*a no comprimento total		<1/3*b; <1/3*a no comprimento total	
5.2			<1/3*b; <1/3*a ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)		<1/2*b; <1/2*a ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)	
6.1	Empenos	em arco de face (em 2 m)	Se b=35 mm -> X<30 mm; Se b>75 mm -> X<10 mm (interpolare para valores de espessura intermédios)			
6.2		em arco de canto (2 m)	Se a=60 mm -> Y<10 mm; Se a>250 mm -> Y<5 mm (interpolare para valores de espessura intermédios)			
6.3		em hélice (em 2 m)	Z<1,5 mm por cada 25 mm de largura da peça			
6.4		em meia-cana	Xf< 1mm por cada 25 mm de largura da peça			
7.1	Bolsas de Resina e casca inclusa	Não Repassada	Sem limites caso sejam mais curtas que a largura da pela. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas			
7.2		Repassada	Sem limite caso o seu comprimento seja <1/2 da largura da peça. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas			
8.	Medula		Não admitida	x	Admitida	
<u>OBSERVAÇÕES</u>					Rejeita	Aceita*
9	Ataque de fungos ou podridão			x		
10	Ataque de insetos			x		
11	Fungos cromogéneos				x	
12	Zonas danificadas (que comprometam a resistência) ex. conjunto de nós					
13	Desvio local de fios (descontinuidade de um grande numero de fibras)					
<u>COMENTÁRIOS</u>						
(2) $4^\circ = \tan(4) = 0.07 < 1/10$ (3) $4.2 < 6$ mm (7.1) $b=48 < \text{comprimento das bolsas de resina}$ - aplicar (4.1.1) (4.1.1) lf < 300 mm - ignorar (13) Não apresenta nenhum desvio local significativo que possa comprometer a resistencia da viga. Viga Classe EE (C35)						

NP 4305 - Madeira Serrada de Pinheiro Bravo para Estruturas - Classificação Visual

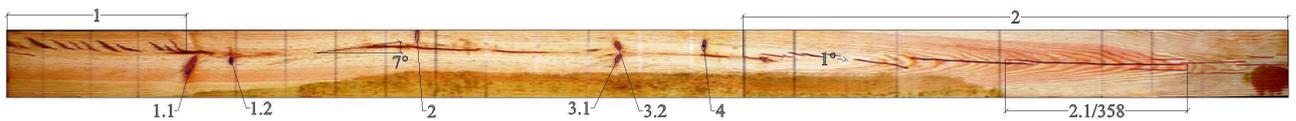
Designação:	FC	MARCAÇÃO	
Secção - B*H*L (mm ³)	46*132*2552	CLASSE	E (C18)
Volume (dm ³)	15.5	ESPÉCIE	Pinho Bravo
Área (mm ²)	6072	AUTOR	Luís Costa
Massa (Kg)	10.5	DATA	7/10/2014
Peso Específico (kg/m ³)	677.6	TEOR DE HUMIDADE (%)	10%

Modelo 3D



Registo Fotográfico

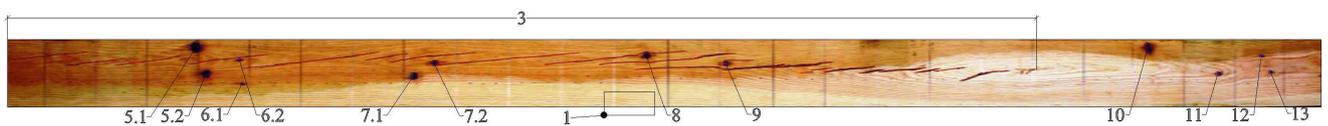
Trás



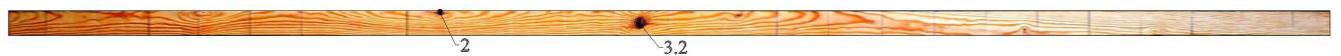
Baixo



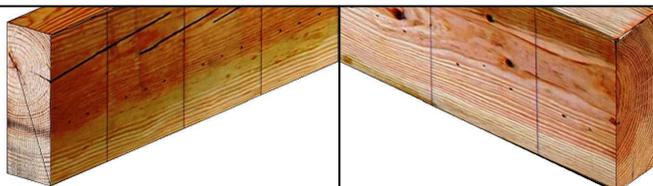
Frente



Cima



Esquerda



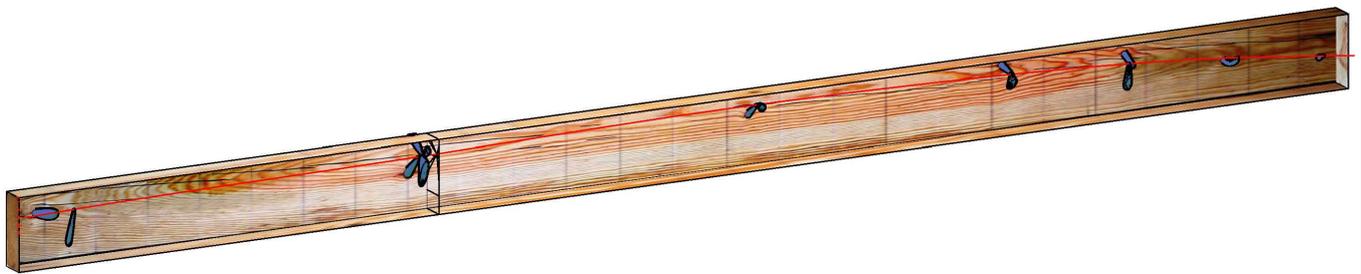
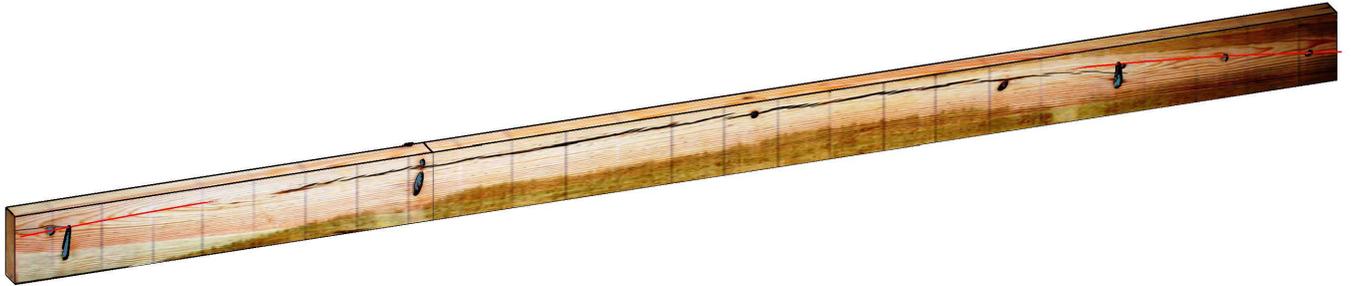
Direita

Nº	<u>Características e defeitos da madeira</u>		<u>CLASSES DE QUALIDADE</u>				
			Classe EE (C35)		Classe E (C18)		
1.1	Nós	Kar Marginal	<1/5	x	<1/2	<1/2	
1.2		Kar Total	<1/5	x	<1/2	<1/3	x
2	Fio		<1/10		<1/6		
3	Taxa de crescimento		< 6 mm	x	< 10 mm		
4.1.1	Fendas	Não Repassadas	Fendas superficiais com $l_f < 300$ mm podem ser ignoradas				
4.1.2			$l_f < 1/4 * l$ e $l_f < 600$ mm	x	$l_f < 1/4 * l$ e $l_f < 900$ mm		
4.2.1		Repassadas	Não mais que uma fenda com o comprimento máximo, por cada metro				
4.2.2			Permitir só nos topos_ $l_f < 600$ mm a $l_f < 1.0 * a$		Permitir só nos topos: $l_f < 1.5 * a$		
5.1	Descaio		$< 1/4 * b$; $< 1/3 * a$ no comprimento total		$< 1/3 * b$; $< 1/3 * a$ no comprimento total		
5.2			$< 1/3 * b$; $< 1/3 * a$ ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)		$< 1/2 * b$; $< 1/2 * a$ ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)		
6.1	Empenos	em arco de face (em 2 m)	Se $b = 35$ mm $\rightarrow X < 30$ mm; Se $b > 75$ mm $\rightarrow X < 10$ mm (interpolare para valores de espessura intermédios)				
6.2		em arco de canto (2 m)	Se $a = 60$ mm $\rightarrow Y < 10$ mm; Se $a > 250$ mm $\rightarrow Y < 5$ mm (interpolare para valores de espessura intermédios)				
6.3		em hélice (em 2 m)	$Z < 1,5$ mm por cada 25 mm de largura da peça				
6.4		em meia-cana	$X_f < 1$ mm por cada 25 mm de largura da peça				
7.1	Bolsas de Resina e casca inclusa	Não Repassada	Sem limites caso sejam mais curtas que a largura da peça. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas				
7.2		Repassada	Sem limite caso o seu comprimento seja $< 1/2$ da largura da peça. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas				
8.	Medula		Não admitida		Admitida		x
<u>OBSERVAÇÕES</u>					Rejeita	Aceita*	
9	Ataque de fungos ou podridão				x		
10	Ataque de insetos				x		
11	Fungos cromogéneos					x	
12	Zonas danificadas (que comprometam a resistência) ex. conjunto de nós						
13	Desvio local de fios (descontinuidade de um grande numero de fibras)						x
<u>COMENTÁRIOS</u>							
<p>(1.1) $Kar M < 1.5 At$; $395.9 < 1.5 * 6072 = 1014$ mm²</p> <p>(1.2) $Kar T < 1.5 At$; $460.17 < 1014$ mm²</p> <p>(2) 7° a $1^\circ - \tan(7) = 0.123 < 1/6$ e $> 1/10$</p> <p>(3) $R = 103/43 = 2.4 < 6$ mm</p> <p>(4.1.1) 3 grupos de fendas com $l < 300$ mm</p> <p>(4.1.2) $300 < l(2.1) = 358$ mm $< \min[1/4 * L; 600$ mm]</p> <p>(8) Contém parcialmente</p> <p>(13) Z1 - Ligeiro desvio das fibras, junto a umas das faces.</p> <p>Viga classe E (C18)</p>							

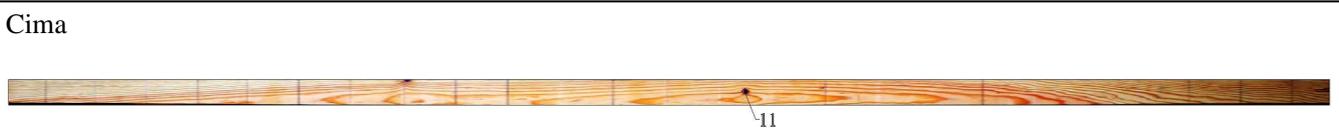
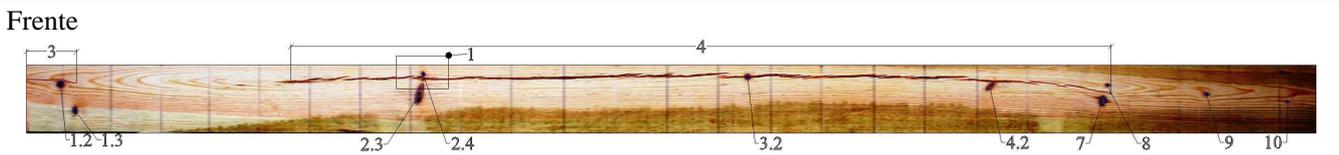
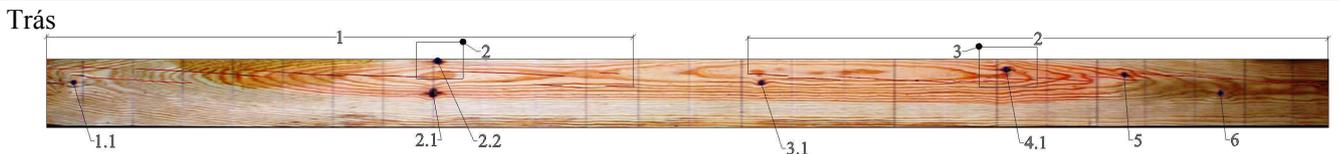
NP 4305 - Madeira Serrada de Pinheiro Bravo para Estruturas - Classificação Visual

Designação:	FT	MARCAÇÃO	
Secção - B*H*L (mm ³)	46*133*2551	CLASSE	E (C18)
Volume (dm ³)	15.61	ESPÉCIE	Pinho Bravo
Área (mm ²)	6118	AUTOR	Luís Costa
Massa (Kg)	10.1	DATA	7/10/2014
Peso Específico (kg/m ³)	647.1	TEOR DE HUMIDADE (%)	10%

Modelo 3D



Registo Fotográfico

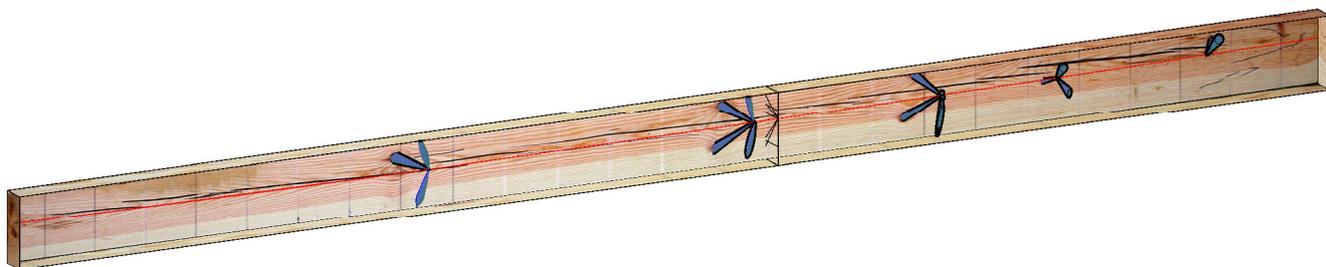
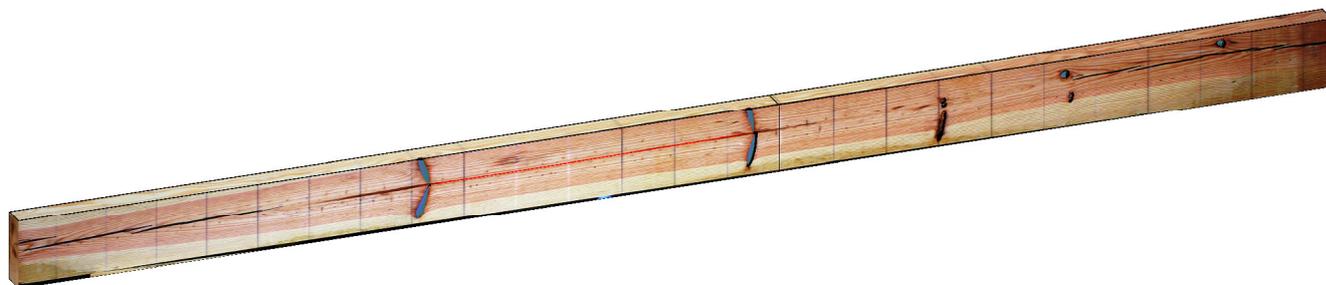


Nº	<u>Características e defeitos da madeira</u>		<u>CLASSES DE QUALIDADE</u>				
			Classe EE (C35)		Classe E (C18)		
1.1	Nós	Kar Marginal	<1/5	x	<1/2	<1/2	
1.2		Kar Total	<1/5	x	<1/2	<1/3	
2	Fio		<1/10	x	<1/6		
3	Taxa de crescimento		< 6 mm	x	< 10 mm		
4.1.1	Fendas	Não Repassadas	Fendas superficiais com $l_f < 300$ mm podem ser ignoradas				
4.1.2			$l_f < 1/4 * l$ e $l_f < 600$ mm		$l_f < 1/4 * l$ e $l_f < 900$ mm		
4.2.1		Repassadas	Não mais que uma fenda com o comprimento máximo, por cada metro				
4.2.2			Permitir só nos topos_ $l_f < 600$ mm a $l_f < 1.0 * a$		Permitir só nos topos: $l_f < 1.5 * a$		
5.1	Descaio		$< 1/4 * b$; $< 1/3 * a$ no comprimento total		$< 1/3 * b$; $< 1/3 * a$ no comprimento total		
5.2			$< 1/3 * b$; $< 1/3 * a$ ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)		$< 1/2 * b$; $< 1/2 * a$ ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)		
6.1	Empenos	em arco de face (em 2 m)	Se $b = 35$ mm $\rightarrow X < 30$ mm; Se $b > 75$ mm $\rightarrow X < 10$ mm (interpolare para valores de espessura intermédios)				
6.2		em arco de canto (2 m)	Se $a = 60$ mm $\rightarrow Y < 10$ mm; Se $a > 250$ mm $\rightarrow Y < 5$ mm (interpolare para valores de espessura intermédios)				
6.3		em hélice (em 2 m)	$Z < 1,5$ mm por cada 25 mm de largura da peça				
6.4		em meia-cana	$X_f < 1$ mm por cada 25 mm de largura da peça				
7.1	Bolsas de Resina e casca inclusa	Não Repassada	Sem limites caso sejam mais curtas que a largura da peça. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas				
7.2		Repassada	Sem limite caso o seu comprimento seja $< 1/2$ da largura da peça. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas				
8.	Medula		Não admitida		Admitida		x
<u>OBSERVAÇÕES</u>					Rejeita	Aceita*	
9	Ataque de fungos ou podridão				x		
10	Ataque de insetos				x		
11	Fungos cromogéneos					x	
12	Zonas danificadas (que comprometam a resistência) ex. conjunto de nós						x
13	Desvio local de fios (descontinuidade de um grande numero de fibras)						x
<u>COMENTÁRIOS</u>							
<p>(1.1) $Kar M = 326 < 1/5 A_t = 1223.6 \text{ mm}^2$ (1.2) $Kar T = 109 < 1/5 A_t = 1223.6 \text{ mm}^2$. (2) 1° a $5^\circ \rightarrow \tan(5) = 0.087 < 1/10$ (3) $T = R/n = 115/40 = 2.8 < 6$ mm (4.4.1) A viga apresenta 4 grupos de fendas, nos quais só existem fendas com $l < 300$ mm (8) Apresenta medula numa das faces. (13) Existem 3 zonas onde há desvio local das fibras. A zona 2, que contém o nó 2.2, situa-se na face superior da viga, poderá comprometer a resistência da viga.</p>							
Viga classe E (C18)							

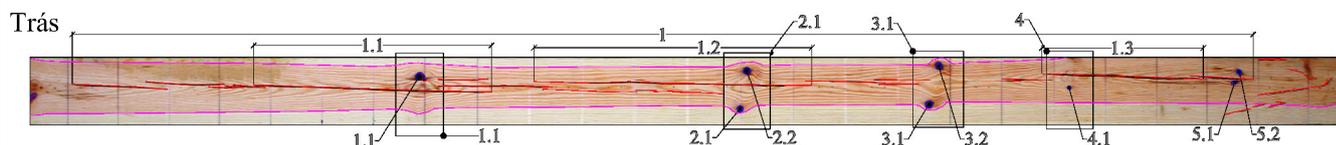
NP 4305 - Madeira Serrada de Pinheiro Bravo para Estruturas - Classificação Visual

Designação:	FTRCF	MARCAÇÃO	
Secção - B*H*L (mm ³)	47*133*2552	CLASSE	REJEITADA
Volume (dm ³)	15.95	ESPÉCIE	Pinho Bravo
Área (mm ²)	6251	AUTOR	Luís Costa
Massa (Kg)	11.1	DATA	7/10/2014
Peso Específico (kg/m ³)	695.8	TEOR DE HUMIDADE (%)	10%

Modelo 3D



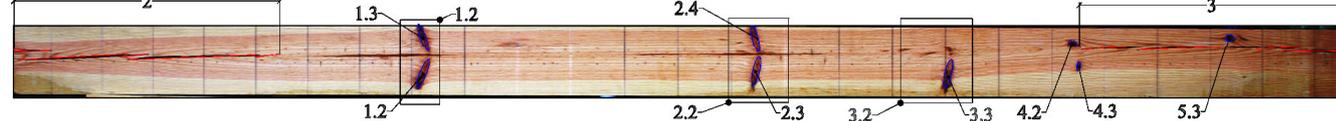
Registo Fotográfico



Baixo



Frente



Cima



Esquerda



Direita

Nº	Características e defeitos da madeira		CLASSES DE QUALIDADE					
			Classe EE (C35)		Classe E (C18)			
1.1	Nós	Kar Marginal	<1/5	x	<1/2	<1/2		
1.2		Kar Total	<1/5	x	<1/2	<1/3		
2	Fio		<1/10	x	<1/6			
3	Taxa de crescimento		< 6 mm	x	< 10 mm			
4.1.1	Fendas	Não Repassadas	Fendas superficiais com $l_f < 300$ mm podem ser ignoradas					
4.1.2			$l_f < 1/4 * l$ e $l_f < 600$ mm	x	$l_f < 1/4 * l$ e $l_f < 900$ mm			
4.2.1		Repassadas	Não mais que uma fenda com o comprimento máximo, por cada metro					
4.2.2			Permitir só nos topos $l_f < 600$ mm a $l_f < 1.0 * a$		Permitir só nos topos: $l_f < 1.5 * a$			
5.1	Descaio		$< 1/4 * b$; $< 1/3 * a$ no comprimento total		$< 1/3 * b$; $< 1/3 * a$ no comprimento total			
5.2			$< 1/3 * b$; $< 1/3 * a$ ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)		$< 1/2 * b$; $< 1/2 * a$ ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)			
6.1	Empenos	em arco de face (em 2 m)	Se $b = 35$ mm $\rightarrow X < 30$ mm; Se $b > 75$ mm $\rightarrow X < 10$ mm (interpolares para valores de espessura intermédios)					
6.2		em arco de canto (2 m)	Se $a = 60$ mm $\rightarrow Y < 10$ mm; Se $a > 250$ mm $\rightarrow Y < 5$ mm (interpolares para valores de espessura intermédios)					
6.3		em hélice (em 2 m)	$Z < 1,5$ mm por cada 25 mm de largura da peça					
6.4		em meia-cana	$X_f < 1$ mm por cada 25 mm de largura da peça					
7.1	Bolsas de Resina e casca inclusa	Não Repassada	Sem limites caso sejam mais curtas que a largura da peça. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas					
7.2		Repassada	Sem limite caso o seu comprimento seja $< 1/2$ da largura da peça. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas					
8.	Medula		Não admitida			Admitida		x
<u>OBSERVAÇÕES</u>						Rejeita	Aceita*	
9	Ataque de fungos ou podridão					x		
10	Ataque de insetos					x		
11	Fungos cromogéneos						x	
12	Zonas danificadas (que comprometam a resistência) ex. conjunto de nós							
13	Desvio local de fios (descontinuidade de um grande numero de fibras)							x

COMENTÁRIOS

(1.1) Kar M=218<1/5At

(1.2) Kar T=292<1/5At

(2) $1^\circ \rightarrow \tan(1) = 0.017 < 1/10$

(3) $T = R/n = 73/23 = 3.17 < 6$ mm

(4.1.1) Há 3 gurpos de fendas, onde as fendas 1.1, 1.2 e 1.3 têm $l > 300$ mm \rightarrow (4.1.2)

(4.1.2) $300 \text{ mm} < l(1.1, 1.2, 1.3) < \min [1/4 * L; 600 \text{ mm}]$

(8) Contém medula

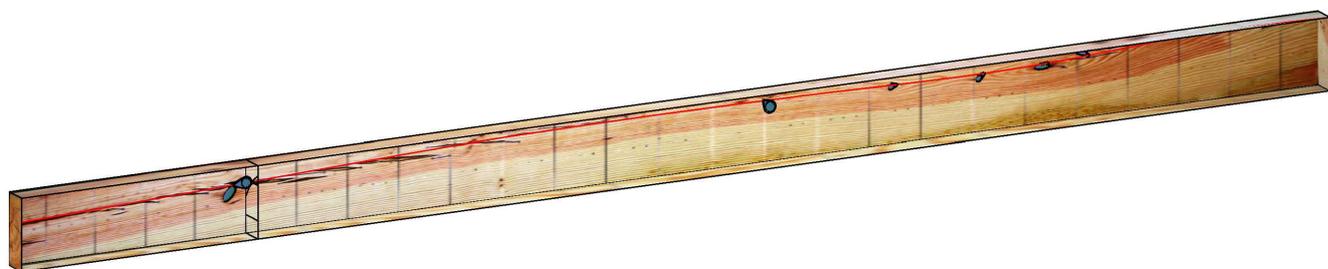
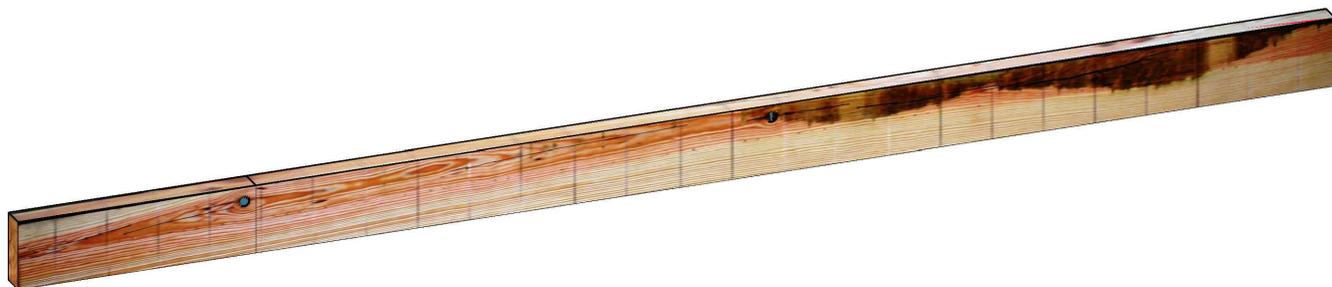
(13) Comtém 4 zonas com desvio das fibras, que coincidem com as zonas onde se localizam os nós provenientes da medula, numa das faces (frente).

Viga Rejeitada

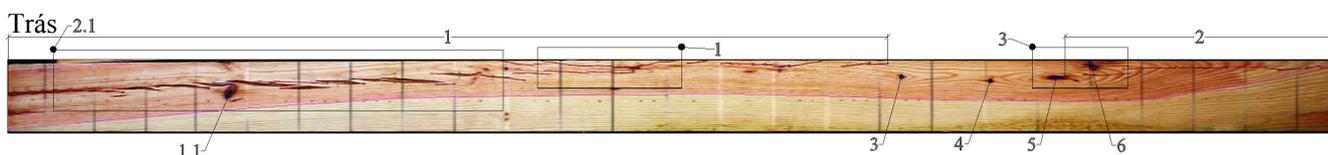
NP 4305 - Madeira Serrada de Pinheiro Bravo para Estruturas - Classificação Visual

Designação:	FTRC	MARCAÇÃO	
Secção - B*H*L (mm ³)	47*132*2552	CLASSE	REJEITADA
Volume (dm ³)	15.83	ESPÉCIE	Pinho Bravo
Área (mm ²)	6204	AUTOR	Luís Costa
Massa (Kg)	9.6	DATA	7/10/2014
Peso Específico (kg/m ³)	606.3	TEOR DE HUMIDADE (%)	10%

Modelo 3D



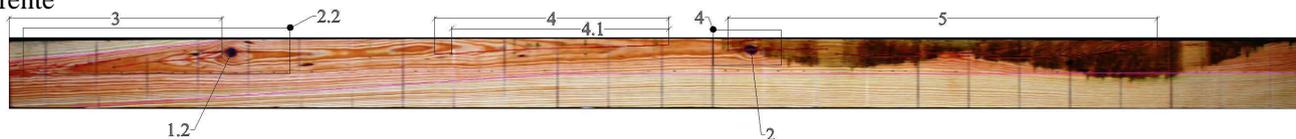
Registo Fotográfico



Baixo



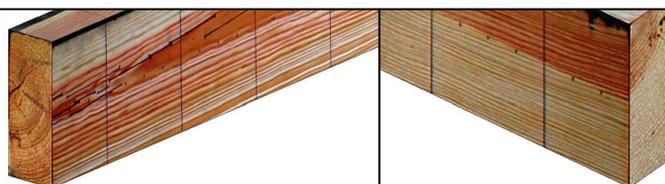
Frente



Cima



Esquerda



Direita

Nº	Características e defeitos da madeira		CLASSES DE QUALIDADE					
			Classe EE (C35)		Classe E (C18)			
1.1	Nós	Kar Marginal	<1/5	x	<1/2	<1/2		
1.2		Kar Total	<1/5	x	<1/2	<1/3		
2	Fio		<1/10	x	<1/6			
3	Taxa de crescimento		< 6 mm	x	< 10 mm			
4.1.1	Fendas	Não Repassadas	Fendas superficiais com $l_f < 300$ mm podem ser ignoradas					
4.1.2			$l_f < 1/4 * l$ e $l_f < 600$ mm	x	$l_f < 1/4 * l$ e $l_f < 900$ mm			
4.2.1		Repassadas	Não mais que uma fenda com o comprimento máximo, por cada metro					
4.2.2			Permitir só nos topos $l_f < 600$ mm a $l_f < 1.0 * a$		Permitir só nos topos: $l_f < 1.5 * a$			
5.1	Descaio		$< 1/4 * b$; $< 1/3 * a$ no comprimento total		$< 1/3 * b$; $< 1/3 * a$ no comprimento total			
5.2			$< 1/3 * b$; $< 1/3 * a$ ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)		$< 1/2 * b$; $< 1/2 * a$ ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)			
6.1	Empenos	em arco de face (em 2 m)	Se $b = 35$ mm $\rightarrow X < 30$ mm; Se $b > 75$ mm $\rightarrow X < 10$ mm (interpolare para valores de espessura intermédios)					
6.2		em arco de canto (2 m)	Se $a = 60$ mm $\rightarrow Y < 10$ mm; Se $a > 250$ mm $\rightarrow Y < 5$ mm (interpolare para valores de espessura intermédios)					
6.3		em hélice (em 2 m)	$Z < 1,5$ mm por cada 25 mm de largura da peça					
6.4		em meia-cana	$X_f < 1$ mm por cada 25 mm de largura da peça					
7.1	Bolsas de Resina e casca inclusa	Não Repassada	Sem limites caso sejam mais curtas que a largura da peça. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas					
7.2		Repassada	Sem limite caso o seu comprimento seja $< 1/2$ da largura da peça. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas					
8.	Medula		Não admitida			Admitida		x
<u>OBSERVAÇÕES</u>						Rejeita	Aceita*	
9	Ataque de fungos ou podridão					x		
10	Ataque de insetos					x		
11	Fungos cromogéneos						x	
12	Zonas danificadas (que comprometam a resistência) ex. conjunto de nós							x
13	Desvio local de fios (descontinuidade de um grande numero de fibras)							x
<u>COMENTÁRIOS</u>								
<p>(1.1) $Kar M = 152 < 1/5 At = 1240 \text{ mm}^2$ (1.2) $Kar T = 260 < 1/5 At$ (2) $2^\circ \rightarrow \tan(2) = 0.035 < 1/10$ (3) $T = R/n = 88/30 = 2.9 > 6 \text{ mm}$ (4.1.1) Existem 6 Grupos de fendas, onde apenas a fenda 4.1 tem $l > 300$ mm \rightarrow (4.1.2) (4.1.2) $300 < l(4.1) < \min[1/4 * l; 600 \text{ mm}]$ (8) Com medula (12) Zona 1 e 2 bastante danificada por fendas (13) 4 zonas com desvio das fibras</p> <p>Viga Rejeitada</p>								

ANEXOS B

Mapeamento das Vigas de MM

Tabela B.1: Mapeamento da Viga - REF1

Fendas/ Bolsas de Resina							Nós			
i	x_i	y_i	y_f	d_i	l_i	e_i	i	x_i	y_i	d_i
mm										
Trás										
							1	832	128	20
							2	1035	54	15
Cima										
							1	833	25	27

Tabela B.2: Mapeamento da Viga - REF2

Fendas/ Bolsas de Resina							Nós			
i	x_i	y_i	y_f	d_i	l_i	e_i	i	x_i	y_i	d_i
mm										
Frente										
1	1705	105	112	2	70	18				
2	1152	43	38	2	58	3				
3	600	26	27	2	64	5				

Tabela B.3: Mapeamento da Viga - FC

Fendas/ Bolsas de Resina							Nós			
i	x_i	y_i	y_f	d_i	l_i	e_i	i	x_i	y_i	d_i
mm										
Frente										
3	0	90	74		1187		5.1	375	116	20
							5.2	392	64	15
							6.1	456	90	7
							6.2	462	45	6
							7.1	793	61	14
							7.2	831	86	10
							8	1235	100	11
							9	1364	85	9
							10	2204	115	24
							11	2344	65	9
							12	2425	100	6
							13	2449	70	7
Trás										
1	0	90	93		375		1.1	384	65	40
2	1477	93	65		1075		1.2	469	73	16
2.1	1991	76	80		358		2	839	122	24
							3.1	1230	78	18
							3.2	1230	103	18
							4	13812	103	23
Cima										
							2	839	43	8
							3.2	1318	23	20

Tabela B.4: Mapeamento da Viga - FT

Fendas/ Bolsas de Resina							Nós			
i	x_i	y_i	y_f	d_i	l_i	e_i	i	x_i	y_i	d_i
mm										
Frente										
3	0	103	96		103		1.2	71	93	14
4	539	98	78		1602		1.3	99	42	18
							2.3	799	75	44
							2.4	803	115	7
							3.2	1430	111	11
							4.2	1903	91	20
							7	2125	64	20
							8	2135	94	7
							9	2332	77	8
							10	57	62	7
Trás										
1	0	85	80		1167		1.1	55	85	10
2	1414	106	82		1136		2.1	775	67	15
							2.2	782	130	16
							3.1	1415	88	10
							4.1	1893	112	10
							5	2434	103	9
							6	2325	64	10
Cima										
							11	1422	26	10
Cima										
							2.2	663	10	23

Tabela B.5: Mapeamento da Viga - FTRCF

Fendas/ Bolsas de Resina							Nós			
i	x_i	y_i	y_f	d_i	l_i	e_i	i	x_i	y_i	d_i
mm										
Frente										
2	0	65	78		521		1.2	751	37	60
3	2025	97	89		525		1.3	753	112	58
							2.3	1422	44	56
							2.4	1421	110	56
							3.3	1782	37	54
							4.2	2015	104	16
							4.3	2027	57	17
							5.3	2313	118	14
Trás										
1	85	78	90		2283		1.1	767	97	16
1.1	442	77	65		461		2.1	1375	31	12
1.2	985	84	77		547		2.2	1362	108	13
1.3	1952	101	90		316		3.1	1734	40	13
							3.2	1754	117	13
							4.1	2007	71	7
							5.1	2332	82	16
							5.2	2340	104	12
Baixo										
1	848	37	33	2	79	6				

Tabela B.6: Mapeamento da Viga - FTTC

Fendas/ Bolsas de Resina							Nós			
i	x_i	y_i	y_f	d_i	l_i	e_i	i	x_i	y_i	d_i
mm										
Frente										
3	0	67	99		425		1.2	441	107	17
4	840	105	123		452		2	1449	112	18
4.1	875	103	123		418					
5	1404	113	122		847					
Trás										
1	0	75	132	?	1690	?	1.1	445	78	30
2	2025	101	120		525		3	1723	103	8
			120				4	1885	96	8
							5	2012	101	34
							6	2075	122	18
Cima										
6	1289	47	11		504		7	1585	37	9
							8	2111	41	24

ANEXOS C

Reforço das vigas de classe R

C.1 Materiais

C.1.1 Parafusos auto-perfurantes

Os materiais usados para reforço ao corte e suas características, são os apresentados nas Figs. C.1b e G.3.



(a) Parafuso - VGZ7100

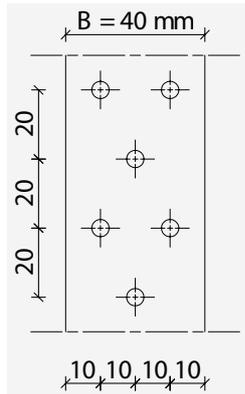


(b) Suporte para aparafusamento inclinado.

Figura C.1: Materiais usados no reforço ao corte ([Rothoblaas](#)).

C.1.2 Tiras metálicas perfuradas

Os materiais usados no reforço à flexão e suas características, são apresentados nas Figs. C.2c e G.1 e nas Tabs. C.1 e C.2.



(a) Dimensões-furação.



(b) Pregos roscados



(c) Rolo de tira metálica perfurada.

Figura C.2: Materiais usados no reforço à flexão.

Tabela C.1: Propriedades dos materiais usados no reforço à flexão.

Designação	Empresa	Ref.	e	ϕ	B	L	Aço	Norma
			mm	mm	mm	cm		
Tira metálica perfurada	Rhotoblass	PF704010	2	5	40	120	S250 GD	DIN 1052
Pregos roscados		PF601440	-	4	-	4		DIN 1052

Tabela C.2: Propriedades resistentes do Aço - S250 GD.

EN 10346	R_m	R_{eH}	$\epsilon A_{80\%}$
	N/mm ²	N/mm ²	%
S 250 GD	≥ 330	≥ 250	≥ 19

Nota: Ver tabela¹

De acordo com [NP EN 1993:1-1 \(2010, 3.2.1, a\)](#), $f_y = R_{eH} = 250$ MPa e $F_u = R_m = 330$ MPa, obtidos diretamente da norma do produto. Segundo [NP EN 1993:1-1 \(2010, 3.2.2, Nota\)](#), $F_u/f_y \geq 330/250 \geq 1.10$, a extensão após rotura tem de ser superior a 15% e $\epsilon_u \geq 15\epsilon_y$, em que ϵ_y é a extensão de cedência ($\epsilon_y = f_y/E$), sendo assim temos que, $E = f_y/(\epsilon_u/15) = 250/(19\%/15) = 250/1.26 = 198.4 \cong 200$ GPa.

A tensão de corte do aço pode ser dada por $f_v = f_y/\sqrt{3} = 250/\sqrt{3} = 144.34$ MPa, ver [NP EN 1993:1-1 \(2010, 6.2.6\)](#).

Os coeficientes parciais de segurança para o aço são apresentados na [NP EN 1993:1-1 \(2010, 6.1\)](#)

¹<http://www.brockhaus.com/en/steel/steel-strip/hot-dip-refined-coated-sheet-metal/s-250-gd/>

C.2 Proposta de reforço das vigas de classe R

C.2.1 Reforço ao corte

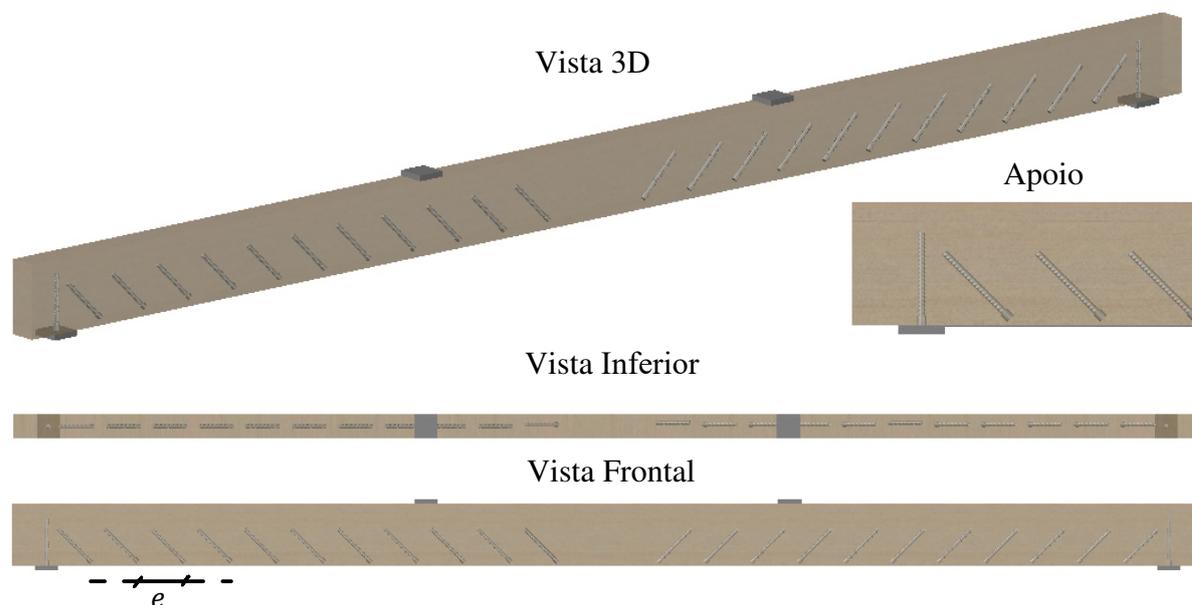


Figura C.3: Representação 3D do reforço ao corte de vigas com parafusos auto-perfurantes, inclinados.

A viga FTRC, classificada com a CQ:R, foi reforçada ao corte, com recurso a parafusos auto-perfurantes inclinados. O esquema 3D do reforço ao corte pode ser visualizado na Fig. C.3.

Para além da viga FTRC, as vigas FTRCF, FJc/p e JC/c/p também foram reforçadas ao corte com o mesmo esquema de reforço, variando apenas o ângulo de inclinação, ver Tab. D.5.

O esquema de reforço ao corte apresentado na Fig. C.3, não é capaz de atribuir qualquer melhoria nas propriedades de flexão, por insuficiente comprimento dos parafusos utilizados.

Ao longo deste capítulo, serão abordadas quais as consequências que esta sugestão de reforço teve no comportamento das vigas à flexão, e será ainda sugerida, qual seria a correta configuração a usar.

C.2.2 Reforço à flexão e ao corte

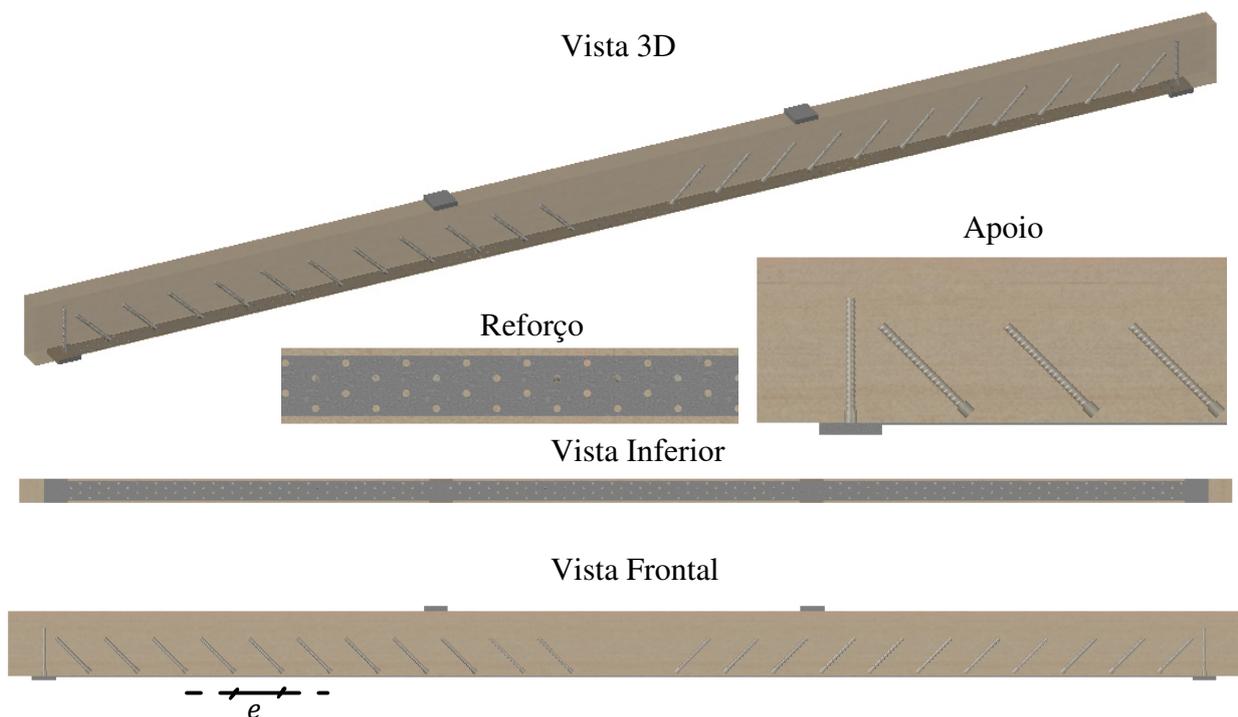


Figura C.4: Representação 3D do reforço à flexão de vigas com tiras metálicas perfuradas.

A viga FTRCF, também classificada com a CQ:R, foi reforçada ao corte, de igual modo que as vigas referidas em C.2.2. Adicionalmente, esta viga foi ainda reforçada à flexão com recurso a tiras metálicas perfuradas e usados pregos como elementos fixadores das tiras metálicas à face tracionada da viga, ver Fig. C.4 e Tab. D.5.

Inicialmente, a ideia de reforço desta viga, passaria por utilizar as tiras metálicas como reforço à flexão. Em vez de utilizar os pregos como fixadores, seriam aproveitados os próprios parafusos usados no reforço ao corte, para amarração das tiras metálicas, fazendo com que, o reforço à flexão e ao corte funcionassem em conjunto (com interação), e com que, se diminuísse o dano causado provocado pelo elevado número de pregos necessários à fixação das tiras, às fibras de madeira da face tracionada da viga.

Devido à impossibilidade de aplicar na prática os parafusos inclinados para fixar as tiras metálicas, por causa do insuficiente diâmetro das furações das tiras, o sistema de reforço realizado, não permitiu a interação entre os materiais de reforço de corte e de flexão.

Assim sendo, não foi possível beneficiar da resistência (resistência ao arrancamento, ao corte, à tração e à penetração da cabeça do parafuso) que os parafusos de rosca total inclinados, poderiam oferecer ao sistema de reforço duplo, com interação. Outro aspeto negativo, foi o uso de parafusos com comprimento inadequado. Este fator, impossibilitou a ocorrência do efeito de tiragem, e de beneficiar por consequência, das vantagens que este traria para o comportamento à flexão da viga e para a sua durabilidade. Outra consequência do insuficiente comprimento dos parafusos foi a

redução da resistência ao arrancamento dos mesmos, tendo como resultado, a redução da rigidez ao deslizamento da interface madeira-tira metálica, a diminuição da capacidade de transferência das forças de tração da madeira para a tira metálica, e a diminuição da rigidez e resistência global da viga à flexão. As tensões de tração a que estes parafusos ficariam sujeitos, tenderiam a fechar as fendas e a diminuir a sua propagação. A viga apresentaria um aumento da sua ductilidade à flexão, e a rotura passaria a ser por esmagamento das fibras comprimidas (rotura dúctil), caso os elementos de amarração das tiras metálicas e as próprias, fossem corretamente dimensionados para que tal se sucedesse, podendo até ocorrer um aumento significativo da carga máxima de rotura da viga à flexão, se a percentagem usada de reforço à flexão e correta fixação assim o permitisse. Note-se que o comportamento ideal esperado para qualquer elemento estrutural, a trabalhar à flexão, será a ocorrência de comportamento dúctil, o qual não se verifica em vigas de madeira, que por sua vez, apresentam comportamento frágil (rotura das fibras tracionadas). Ao longo deste capítulo, todos estes aspetos serão comentados no contexto, e com base, nos resultados obtidos da realização do ensaio experimental desta viga com reforço à flexão e ao corte, sem interação.

C.3 Fabrico das vigas de MLC

O fabrico das vigas de MLC (FJ e JC), não se procedeu em conformidade com a [EN 386](#).

Para a colagem das lamelas foi utilizada uma cola de PU, da classe D4 (resistente à água) e com resistência ao corte de 10 N/mm^2 , [Pro 45P](#).

A madeira utilizada no fabrico destas vigas foi obtida, através do aproveitamento das 6 vigas de MM após terem sido ensaiadas até à rotura. A origem da ideia do aproveitamento da madeira das vigas de MM para produção das novas vigas de “MLC”, assenta nos seguintes pressupostos: aproveitamento da madeira das vigas danificadas por forma a reestabelecer ou até melhorar as propriedades mecânicas das mesmas; possibilidade de aproveitamento da madeira de elementos estruturais antigos; minimização das variações dimensionais e seus efeitos; e aumento da durabilidade.

Das 6 vigas de MM tentou-se retirar lamelas 50 cm de comprimento, 1.9 cm de espessura e 4.8 cm de largura. Por meio das lamelas obtidas foram apenas possíveis reconstruir 2 vigas de MLC de igual dimensão às de MM. O rendimento do aproveitamento da madeira foi bastante baixo, $1/3$, resultado do corte ter sido realizado com um disco circular com 3 mm de espessura de corte. Uma forma de aumentar o rendimento de aproveitamento seria através da utilização de uma fita de corte, cuja espessura é muito menor.

Cada viga de MLC ficaria então com 7 lamelas, perfazendo uma altura de 133 mm.

As lamelas de melhor qualidade, isto é, sem defeitos e provenientes do borne, foram colocadas na

face tracionada, nas duas primeiras lamelas. As de pior qualidade, com defeitos, foram colocadas nas restantes lamelas, que iriam estar sujeitas à compressão.

Foram testados dois tipos de juntas de topo das lamelas, designadamente “finger-joints” e “juntas coladas (JC)”, ver Fig. C.5.



Figura C.5: Ligações de topo.

Maioritariamente a junta de topo do tipo Finger-joint, é a utilizada no fabrico de MLC, mas para este trabalho estudou-se uma segunda opção, que fosse mais fácil de realizar e que recorresse apenas a ferramentas comuns (sem recorrer a fresas).

A ligação do tipo Junta-colada, Fig. C.5a, consiste na realização com uma broca de 8 mm, duas furações de 3 cm de profundidade como demonstra a figura. A ligação entre duas ripas será, portanto, realizada recorrendo a dois conectores, varões roscados de aço inox de 6 mm de diâmetro e 6 cm de comprimento, ancorados com recurso a uma resina epóxida para o efeito, nas furações existentes. O comprimento de amarração é então de 3 cm. Esta ligação apenas passa esforços de tração, não tendo qualquer capacidade resistente à flexão. O nó de ligação entre as duas tiras, em termos de modelo estrutural, é representado por uma rótula. Esta ligação foi concebida para apenas ser capaz de transmitir a força de tração equivalente que a área de secção transversal da tira apresentaria para uma tensão de tração característica igual a 11 MPa, $f_{t,0,k}$ (C18:E). De seguida é apresentado um cálculo simplificado da junta:

$$C18:E \Rightarrow f_{t,0,k} = 11 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,k} = F/A \Rightarrow F = f_{t,0,k} * A = 11000 * (48 * 19) = 10032 \text{ N} = 10.03 \text{ kN}$$

$$\tau = F/A \Rightarrow F = \tau * P * l = 10 * 2 * \pi * r * l = 10 * (2 * \pi * 3) * 30 = 5654.47 \text{ N} = 5.65 \text{ kN} \Rightarrow \dots * 2 = 11.31 \text{ kN} > 10.03 \text{ kN}$$

$$\sigma = F/A = F/(\pi * r^2) = 11309/(\pi * 3^2) = 400 \text{ MPa}$$

A ligação de tipo Finger-Joint, Fig. C.5b, é a utilizada no fabrico da MLC, para realizar as juntas de topo entre as tiras de madeira que formam as lamelas. Os requisitos de fabrico, controlo de qualidade e o tipo de teste para a determinação da resistência inicial da ligação, têm de estar de acordo com a [EN 385](#). Desta norma, destaca-se por exemplo as recomendações para o tipo de adesivo a utilizar (p.ex. MUF) que deve estar de acordo com os requisitos da [EN 301](#), a geometria da ligação, as limitações das distâncias à ligação de nós existentes nas tiras de madeira e presença de fissuras, a aplicação de pressão e tempo de cura do adesivo no processo de montagem. A

geometria utilizada neste trabalho para a junta deste tipo foi a de 10*3.7*0.6 (comprimento, largura e espessura da ponta do dente), escolha limitada pela fresa disponível. Os comprimentos normalmente utilizados são os de 10, 15 e 20 mm dependendo da área da secção transversal da tira a ligar. Todos os parâmetro geométricos da junta influenciam a sua capacidade resistente e o seu desempenho.

A resistência à flexão da junta dentada (Finger-joint), deve ser determinada de acordo com o ensaio nº19 da [EN 408](#) e classificada de acordo com o especificado na [EN 385](#).

C.4 Estudo analítico/ pré avaliação dos resultados esperados

C.4.1 Vigas de Classe R

Reforçada ao corte

Devido à disposição dos parafusos de reforço ao corte, não ocorrerá efeito de tiragem, logo a função destes em vez de ser de reforço, passa a ser de dano. Sendo o dano provocado na zona das fibras tracionadas, a ação de dano assume importante relevância conjuntamente com o fator de a viga “reforçada” com os parafusos ser da classe de qualidade R. Espera-se então que a viga FTIRC seja a viga que apresente menor resistência e rigidez à flexão de todas as vigas analisadas de MM.

Reforçada ao corte e flexão

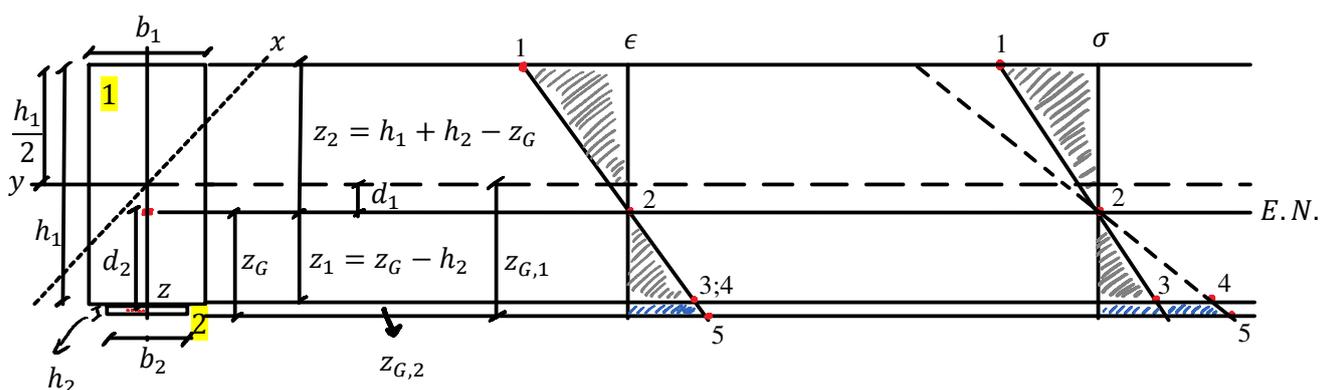


Figura C.6: Esquema de tensões - viga reforçada à flexão.

Centro de gravidade:

$$z_G = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{A_i} E_i z_{G,i} dA}{\sum_{i=1}^n \int_{A_i} E_i dA} = \frac{E_1 A_1 z_{G,1} + E_2 A_2 z_{G,2} + \dots}{E_1 A_1 + E_2 A_2 + \dots}$$

Coefficiente de homogeneização do material:

$$n_{2-1} = n_{A-M} = \frac{E_A}{E_M}$$

$$n_{1-2} = n_{M-A} = \frac{E_M}{E_A}$$

Teorema de Stainer:

$$I'_M = I_M + A_M d_1^2$$

$$I'_A = I_A + A_A d_2^2$$

Inércia Equivalente:

$$\bar{I}_M = I'_M + n_{A-M} I'_A$$

$$\bar{I}_A = I'_A + n_{M-A} I'_M$$

Cálculo da força máxima para romper o material:

$$\sigma_1 = \frac{M}{I} z_2 = \frac{Fa}{I} (h_1 - h_2 - z_G) < f_{mean} \rightarrow F_1 = \frac{I f_{mean}}{a(h_1 - h_2 - z_G)}$$

$$\sigma_2 = 0 \text{ MPa} \rightarrow F_2 = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = \frac{M}{I} z_1 = \frac{Fa}{I} (z_G - h_2) < f_{mean} \rightarrow F_3 = \frac{I f_{mean}}{a(h_2 - z_G)}$$

$$\sigma_4 = n \frac{M}{I} z_1 = n \frac{Fa}{I} (z_g - h_2) < f_y \rightarrow F_4 = \frac{I f_y}{an(h_2 - z_G)}$$

$$\sigma_5 = n \frac{M}{I} z_G = n \frac{Fa}{I} z_G < f_y \rightarrow F_5 = \frac{-I f_y}{anz_G}$$

$$F_{\text{máx}} = \text{menor}\{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5\} =$$

$$= F_5 = 3.16 \text{ kN} \rightarrow \sigma_5 = f_y = 250 \text{ MPa}$$

Fluxo de corte madeira entre Madeira e Aço (Flexão elástica): De modo a avaliar o funcionamento da ligação Madeira-Aço, é necessário determinar o fluxo de corte entre ambos os materiais que compõem a secção mista. Numa secção mista esse fluxo pode ser determinado recorrendo às equações C.3 e C.4. A Eq.C.3 dá o fluxo de corte exercido sobre a madeira pelo aço, ao passo que a Eq. C.4, dá o fluxo de corte exercido sobre o aço pela madeira. O que difere entre elas é apenas o sinal do fluxo, uma vez que por definição do centro de rigidez, se tem

forçosamente $E_M S_M + E_A S_A = 0$.

Note-se que o fluxo de corte depende essencialmente das propriedades de rigidez (E , S , I) de ambos os materiais. Este fluxo de corte só se verifica quando o valor do esforço cortante $V > 0$.

$$S_M = b_1 h_1 d_1 \quad (\text{C.1})$$

$$S_A = b_2 h_2 (z_G - h_2/2) \quad (\text{C.2})$$

$$f_M = -\frac{V E_M S'_M}{E_M I'_M + E_A S'_A} \quad (\text{C.3})$$

$$f_A = -\frac{V E_A S'_A}{E_M I'_M + E_A S'_A} \quad (\text{C.4})$$

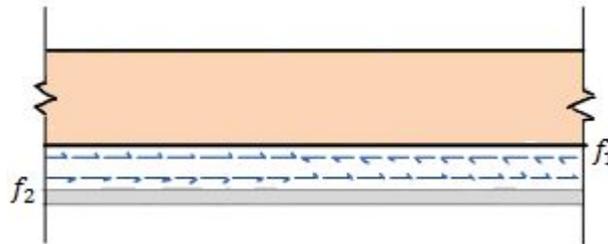


Figura C.7: Fluxo de corte numa secção mista madeira-aço.

Resistência da ligação pregagem - madeira/chapa - ver Silva2009(31): Ligação aço-madeira (placas delgadas em corte simples)

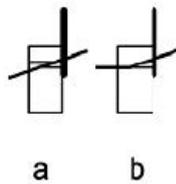


Figura C.8: Modos de rotura para corte simples e corte duplo (EN 1995:1-1).

$$f_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.4 f_{h,k} t_1 d \quad (a) \\ 1.15 \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (b) \end{array} \right.$$

Onde:

$f_{v,Rk}$ → capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador;

t_1 → menor das espessuras dos elementos laterais de madeira ou a profundidade de penetração;

t_2 → espessura do elemento central de madeira;

$f_{h,k}$ → resistência ao esmagamento característica;

d → diâmetro do ligador;

$M_{y,Rk}$ → momento de cedência plástica característico do ligador;

$F_{ax,Rk}$ → resistência ao arranque característica do ligador.

Momento de cedência plástica (pregos lisos de secção circular)

$$\begin{aligned}M_{y,Rk} &= 0.3F_u d^{2.6} = \\ &= 3639.08 \text{ N.mm}\end{aligned}$$

Resistência ao esmagamento de pregos com $d < 8\text{mm}$ para ligação em madeira com pregos até 8mm sem pré-furação

$$\begin{aligned}f_{h,k} &= 0.082\rho_k d^{-0.3} = \\ &= 0.02 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Resistência axial dos ligadores (pregos não lisos), de acordo com a [EN 14592](#):

$$\begin{aligned}F_{ax,Rk} &= \begin{cases} f_{ax,k} dt_{pen} \\ f_{head,k} d_h^2 \end{cases} = \\ &= \begin{cases} 677.1 \text{ N} \\ 237 \text{ N} \end{cases}\end{aligned}$$

com:

$$\begin{aligned}
 f_{ax,k} &= 20 * 10^{-6} \rho_k^2 = \\
 &= 4.2 \text{ MPa} \\
 f_{head,k} &= 70 * 10^{-6} \rho_k^2 = \\
 &= 14.8 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Em que, t_{pen} é o comprimento de penetração, t a espessura cobre-juntas e d_h o diâmetro da cabeça do prego.

Critério de segurança:

$$\begin{aligned}
 f_{v,A \text{ ou } M} &< f_{v,R,mean} \\
 24.50 &< \text{menor}\{79.6; 10\} \text{ kN.m}
 \end{aligned}$$

Deslocamento Máximo:

$$\delta_u = \frac{(F_u/2)a(3l^2 - 4a^2)}{24E_M \bar{I}_M} \tag{C.5}$$

Tabela C.3: Esforços e deslocamentos estimados para a viga FTRC.

CQ	a mm	F_u kN	V_u^* kN	M_u^{**} kN.m	δ_u mm
R^{*1}	810	6.33	3.16	2.54	13.51
(a)	810	5.15	10.3	8.34	
(b)	810	0.65	1.3	1.05	5.6

* Ver Fig. 5.6 ** Ver Fig. 5.7

*1 Propriedades da viga R, reforçada à flexão

Descrição da rotura: Rotura dúctil.

C.5 Apresentação, discussão e análise dos resultados

C.5.1 Comentários dos ensaios

(MLC) Viga FJs/p

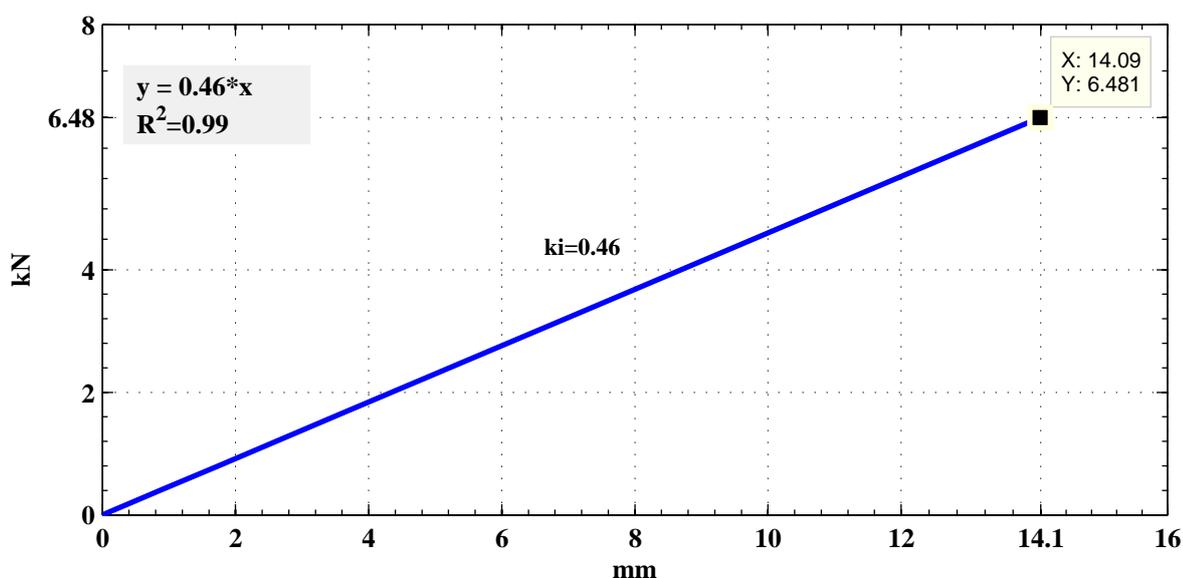


Figura C.9: Resultados obtidos para a viga FJs.

A viga Fjs/p, ver C.3, apresentou uma rigidez inicial, $k_i = 0.46$, demonstrando-se superior à rigidez estimada para vigas de MM classificadas com a classe de qualidade E, $k_E = 0.44$ (12 GPa).

No entanto, com o processo de fabrico desta viga não foi realizado de acordo com o especificado na EN 386, verificou-se que quando a carga de 7.5 kN foi atingida, as lamelas tracionadas situadas entre as cargas aplicadas, separaram-se devido a falha da junta de colagem que as une, ver Figs C.10a e C.10b . Pelo deslocamento que as lamelas sofreram pode-se concluir que a junta de colagem falhou por surgimento de tensões transversais de tração entre as mesmas. Embora o adesivo utilizado tenha uma boa resistência ao corte, ficou aqui demonstrado que este tem uma baixa resistência à tração transversal ao plano de colagem. Nos apoios, a meia altura da secção, onde as tensões de corte são máximas, a viga não apresentou qualquer dano para o nível de carga atingido no momento da rotura da junta colada, sendo que o valor da tensão de corte para este nível de carga, seja ainda pouco significativo, para se obter conclusões à cerca do comportamento da junta colada ao corte. Para além da resistência ao corte da junta colada, a resistência ao arrancamento demonstrou-se uma propriedade importante a considerar na qualidade da junta colada, principalmente na secção de momento máximo onde estas tensões transversais para esta

viga, ocorrem com maior intensidade.

Para o correto funcionamento das vigas de MLC à flexão é necessário e de extrema importância garantir a resistência e integridade das juntas coladas, assim como a correta escolha e aplicação do adesivo de acordo com as normas vigentes. Note-se que a junta colada, é um elemento que permite a distribuição das tensões entre as lamelas, fazendo com que o conjunto de tiras e lamelas coladas aglutinadas com adesivos e com recurso a técnicas de realização de juntas de topo (ex. finger-joints), formem um elemento sólido (ex. viga de MLC), com as mesmas propriedades ou até melhoradas em relação às vigas de MM de iguais dimensões e da mesma espécie.

Outro fator que potenciou o surgimento destas tensões transversais, foi o reduzido comprimento das tiras de madeira que constituem as lamelas e as reduzidas distância entre juntas coladas de topo.



(a) 14 mm



(b) 14 mm

Figura C.10: (a&b) Rotura do plano junta de colagem entre as lamelas tracionadas.

(MLC) Viga FJc/p

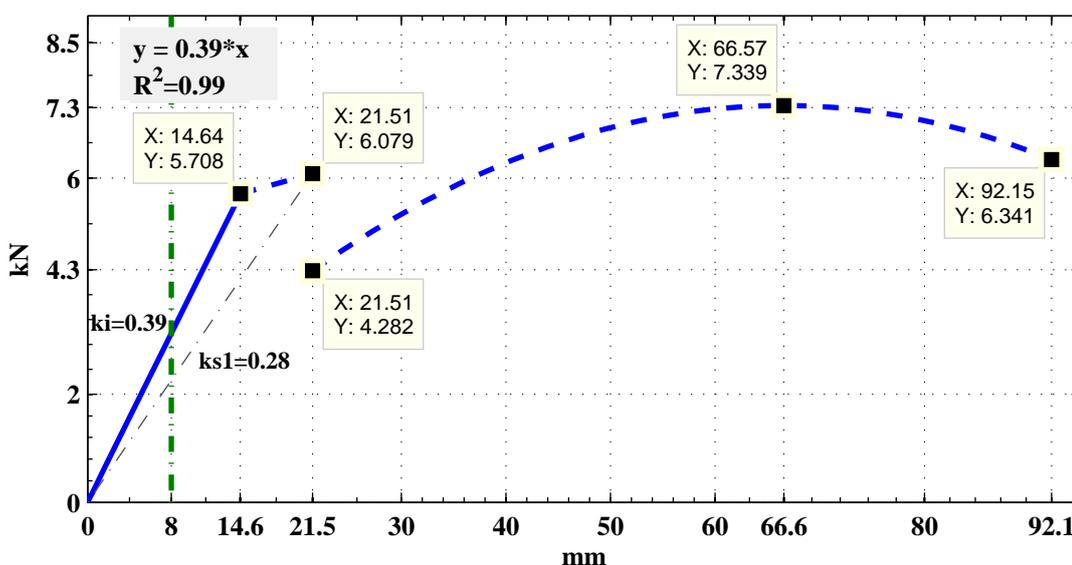


Figura C.11: Resultados obtidos para a viga FJc.

A viga FJc/p, trata-se da viga FJs/p reforçada com parafusos auto-perfurantes após ter sido ensaiada, ver C.2.1. Neste ensaio, ocorreu uma diminuição da rigidez de um $k_i = 0.46$ para 0.39,

fazendo que o valor passa-se a ser inferior à rigidez apresentada por uma viga de MM da classe de qualidade E, $k_E = 0.44$. A carga máxima diminuiu ligeiramente, e o deslocamento respetivo aumentou ligeiramente. Do deslocamento 22 mm ao 66 mm, a viga apresentou um patamar de recuperação após a carga ter caído abruptamente para o deslocamento 22 mm, atingindo uma carga máxima de 7.4 kN, cerca de 1 kN superior à anteriormente obtida. Este endurecimento deve-se à rigidez suplementar que os parafusos fornecem a sua área de influência na viga. No entanto a rotura ocorreu de igual forma ao do ensaio anterior sem reforço, só que nas lamelas de compressão. Como as lamelas tracionadas estavam sob a área de influência dos parafusos, as tensões de tração transversais foram absorvidas pela tração dos parafusos evitando a rotura ocorrida anteriormente, fazendo com que do deslocamento 22 ou 92 mm, as lamelas de compressão se separassem do modo apresentado nas Figs. C.12a e C.12b.



(a) 14-22 mm



(b) 22-92 mm

Figura C.12: (a&b) Rotura do plano junta de colagem entre as lamelas comprimidas.

(MLC) Viga JCc/p

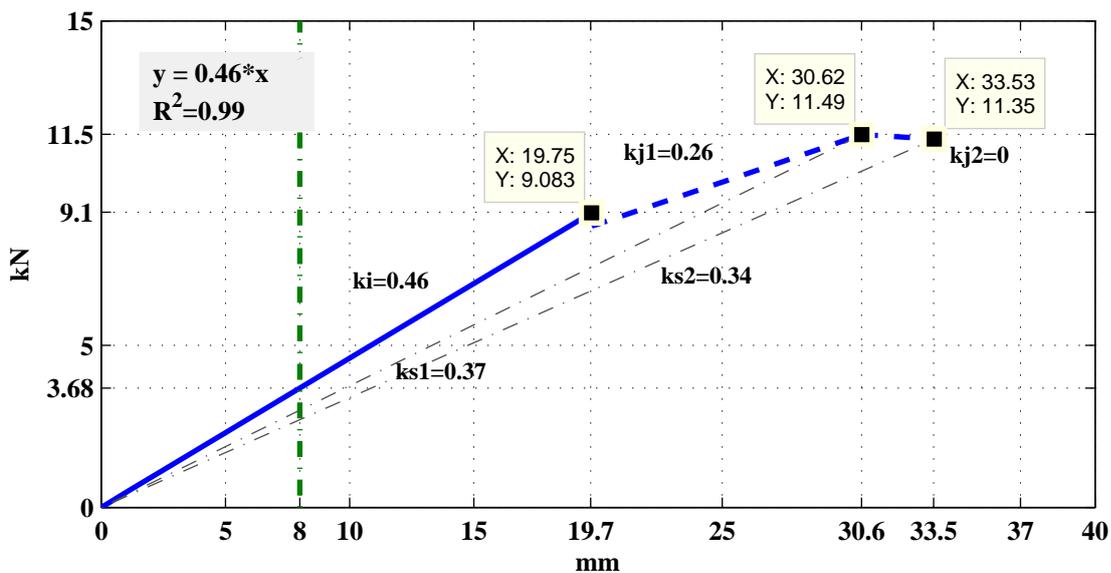


Figura C.13: Resultados obtidos para a viga JCc.

A viga JCs/p, ver C.3, apresentou um $k_i = 0.46$, à semelhança da viga FJs/p. Para o nível de carga e deslocamento máximos da viga FJs/p, a viga JCs/p apresenta os mesmos valores, 14 mm e 6.5 kN. A viga JSc/p poderia ter apresentado uma rigidez ligeiramente superior, se o comprimento dos parafusos fosse suficiente para alcançar a face superior comprimida da viga, tirando proveito do efeito de tiragem. Pelo fator desta viga ter sido previamente reforçada ao “corte” com parafusos, conseguiu atingir valores mais elevados, antes da rotura por descolamento da junta de topo, ver Fig. C.14a, atingindo níveis de deslocamento e carga de, 20 mm e 9 kN, sendo o acréscimo de carga de 2.5 kN. Como o deslizamento entre as lamelas foi restringido pela presença dos parafusos, a separação das juntas de topo foi menor, por aumento da rigidez ao deslizamento (k_{ser}). A rotura ocorrida na viga FJs/p não se verificou desta vez, pelos mesmos motivos mencionadas para a viga FJc/p. A partir do deslocamento 20 mm até ao deslocamento 30 mm a separação dos topos foi se agravando, com o surgimento de uma nova ocorrência, duas lamelas acima da primeira, ver Fig. C.14b, atingindo-se o valor da carga máxima de 11.5 kN, para o qual também ocorreu a rotura por tração da lamela entre as juntas de topo consecutivas. A rotura por tração desta lamela, ocorreu para um baixo nível de carga expectável, consequência da forte solicitação à tração que esta lamela estava sujeita. As tensões das três lamelas mais solicitadas à tração estavam apenas a ser suportadas por uma. Com a área efetiva à tração reduzida, a rotura por tração ocorreu para níveis de carga inferiores, cerca de metade do mínimo expectável.



(a) 20 mm; 9.1 kN



(b) 34 mm; 11.5 kN

Figura C.14: (a) Rotura local da junta de topo, “finger-joint”; (b) rotura global - juntas de topo + rotura por tração.

C.6 Análise comparativa e conclusões

C.6.1 Classe R (vigas reforçadas) & Classe E e EE (não reforçadas)

As duas vigas de MM classificadas com a CQ:R (FTRC e FTRCF), foram reforçadas, uma ao corte (ver C.2.1), e outra simultaneamente ao corte e à flexão (ver C.2.2), com recurso a parafusos auto-perfurantes e a tiras metálicas perfuradas.

Entretanto, é necessário entender qual a melhoria nas propriedades de flexão analisadas, que estes dois métodos de reforço proporcionaram em comparação com as restantes 4 vigas da classe

E e EE, não reforçadas.

Devido à incorreta escolha do comprimento dos parafusos utilizados no reforço ao corte, não foi possível tirar proveito do efeito de tiragem que estes proporcionariam no momento em que a viga fosse solicitada à flexão, tendo como consequência um aumento ligeira do módulo de cisalhamento que por sua vez se iria refletir num ligeiro aumento da rigidez à flexão da viga, numa maior resistência ao corte, e num aumento da ductilidade da mesma, por aumento da energia necessária para a propagação das fendas. Sendo assim, a mera colocação dos parafusos funcionou como dano da face tracionada da viga, e por conseguinte, esperava-se que a viga reforçada ao corte, obtivesse a menor rigidez à flexão de todas as vigas de MM ensaiadas. Como a viga FTRC foi a viga reforçada ao corte, e por ser ensaiada com o cerne a funcionar à tração, ainda se inclui o fator da diminuição da rigidez devido ao desfavorável posicionamento da viga, como abordado em 5.8.5. Por conseguinte, seria de esperar que esta viga fosse a que apresenta-se a menor rigidez inicial de todas as vigas analisadas, o que se constatou, obtendo esta o menor valor de k_i , igual a 0.4. Note-se que embora este seja considerado o caso mais desfavorável das 6 vigas de MM, o valor obtido do k_i , foi ligeiramente inferior ao estimado para a classe de qualidade E de $k_i = 0.44$ (12 GPa). Os valores de $k_{s,i}$ foram todos inferiores ao k_E , e por isso conclui-se que a atribuição da classe R, foi corretamente atribuída. Como a viga apresentava uma boa percentagem de borne, com boa aparência e qualidade, se este, por outro lado fosse colocada à tração como era de esperar num caso normal, as fendas passariam a estar a compressão e aí poderia ser que se obtivessem valores de rigidez e de resistência bastante superiores para esta viga, podendo esta neste caso ser classificada corretamente com a classe de qualidade E. A presença de fendas é sempre um fator que mesmo não tendo um grande impacto nas propriedades de flexão, têm-no sempre em termos estéticos e de durabilidade da viga, caso não sejam tomadas medidas de reparação eficientes das mesmas, que tenham em consideração estes dois últimos aspetos. Observou-se que durante o ensaio desta viga o efeitos dos parafusos, teve um papel irrelevante na minimização da propagação das fendas de tração, mesmo estas estando na sua área de influência de amarração. A viga FTRC, foi a que obteve o menor valor de carga máxima (15.7 kN), das 6 vigas de MM.

A viga FTRCF da classe de qualidade R, teve exatamente o mesmo reforço ao corte que a viga FTRC, e estava reforçada à flexão com tiras metálicas pregadas à face tracionada. Para além do já abordado sobre a comportamento desta viga à flexão em 5.7.2, é de destacar que esta viga obteve o maior valor de carga resistente, próxima da obtida para as vigas Ref1(CQ:E) e Ref2(CQ:EE). O reforço à flexão desta viga, apesar de aumentar a carga máxima e também a ductilidade da viga, não seria exequível em vigas da CQ:R pelo fator da ocorrência das roturas localizadas se darem pela madeira para níveis de carga bastantes inferiores aos esperados para as vigas da CQ:E e EE. Temos ainda o pormenor de fixação destas tiras à viga, que é executado por pregagem,

o qual por si só danifica as fibras da face tracionada, que devem ser manter intactas a todo o custo. A ligação destas tiras por pregagem demonstrou-se insuficiente, e resultou em grandes deformações de deslizamento entre a tira e as fibras de madeira para baixo nível de carga, não sendo assim capaz de transferir as forças de tração para níveis de rotura da madeira para a tira metálica. Por este motivo a tira metálica não desempenhou o seu papel a 100%, como reforço. Em suma, o reforço ideal, seria portanto, colocar o reforço ao corte a funcionar em conjunto com o reforço à flexão, ver Figs. C.3 e C.4, utilizando os próprios parafusos do reforço ao corte como fixador das tiras metálicas. Seria importante utilizar apenas uma tira metálica de igual comprimento da viga, e não várias, para minimizar as deformações e obter o máximo benefício da resistência à tração das mesma.

C.6.2 Vigas de MM & MLC (reforço ao corte)

A realização do reforço ao corte das vigas de MLC, teria como objetivo estudar qual seria o impacto que este reforço teria nas propriedades de flexão das vigas, antes e após serem ensaiadas. Posteriormente, estes seriam comparados com os resultados obtidos para as vigas de MM em igual situação. Outro aspeto que seria analisado seria a variabilidade das propriedades de flexão entre as vigas de MLC e MM, esperado que esta diminuísse para as vigas de MLC. No entanto como as vigas de MLC não foram fabricadas de acordo com as normas e nem o reforço ao corte foi bem executado, não se poderá proceder a análise comparativa nestes termos. As conclusões a retirar destas vigas, são as mesmas que foram obtidas nos comentários individuais de cada uma.

ANEXOS D

Tabelas

Tabela D.1: Classes de resistência da madeira de resinosas segundo a tabela 1 da [EN 338 \(2003\)](#).

20°/ 65% HR	Resinosas												Folhosas					
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70
MPa	Propriedades de Resistência																	
$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70
$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42
$f_{t,90,k}$	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34
$f_{c,90,k}$	2	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2	8	8.4	8.8	9.7	10.5	13.5
$f_{v,k}$	1.7	1.8	2	2.2	2.4	2.5	2.6	3	3.4	3.8	3.8	3.8	3	3.4	3.8	4.6	5.3	6
GPa	Propriedades de Rigidez																	
$E_{0,mean}$	7	8	9	9.5	10	11	11.5	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20
$E_{0,05}$	4.7	5.4	6	6.4	6.7	7.4	7.7	8	8.7	9.4	10	10.7	8	8.7	9.4	11.8	14.3	16.8
$E_{90,mean}$	0.23	0.27	0.3	0.32	0.33	0.37	0.38	0.4	0.4	0.47	0.5	0.53	64	0.69	0.75	0.93	1.13	1.33
G_{mean}	0.44	0.5	0.6	0.59	0.63	0.69	0.72	0.75	0.8	0.88	0.94	1	0.6	0.65	0.7	0.88	1.06	1.25
kg/m ³	Massa Volúmica																	
ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900
ρ_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080

Tabela D.2: Classe de qualidade / Classe de resistência para algumas madeiras utilizadas em estruturas (M1/LNEC, 1997).

Madeira	Classes de Qualidade (Norma)	Classe de Resistência
Pinho bravo (<i>Pinus pinaster</i> Ait.)	E (NP 4305)	C18*
Casquinha (<i>Pinus silvestris</i> L.)	SS (BS 4978)	C24
	GS (BS 4978)	C16
	S13 (DIN 4074)	C30
Esprece (<i>Picea abies</i> Karst.)	S10 (DIN 4074)	C24
	S7 (DIN 4074)	C16
Câmbala (<i>Milicia excelsa</i> A. Chev. Ou <i>M. régia</i> A. Chev.)	HS (BS 5756)	D40

* Para a classe E do Pinho bravo, recomenda-se a adopção dos valores indicados na Ficha M2/LNEC: "Pinho bravo para estruturas".

Tabela D.3: Valores característicos das propriedades mecânicas da madeira de Pinho bravo, (M2/LNEC, 1997), relativos às classes de qualidade E e EE ,(NP 4305, 1995), e classes de resistência correspondentes C18 e C35 ,(EN 338, 2003)

20°/ 65% HR	Pinho bravo			
	C18	E	C35	EE
MPa	Propriedades de Resistência			
$f_{m,k}$	18	18	35	35
$f_{t,0,k}$	11	10.8	21	21
$f_{t,90,k}$	0.5	0.46	0.6	0.49
$f_{c,0,k}$	18	18	25	24.7
$f_{c,90,k}$	2.2	6.9	2.8	7.3
$f_{v,k}$	2	2	3.4	3.4
GPa	Propriedades de Rigidez			
$E_{0,mean}$	9	12	13	14
$E_{0,05}$	6	8	8.7	9.38
$E_{90,mean}$	0.3	0.4	0.43	0.46
G_{mean}	0.56	0.75	0.81	0.87
kg/m ³	Massa Volúmica			
ρ_k	320	460	400	490
ρ_{mean}	380	580	480	610

Tabela D.4: Classes de qualidade estabelecidas para a madeira de Pinho bravo, (NP 4305, 1995).

Características e defeitos da madeira		Classes de Qualidade		
		Classe EE	Classe E	
Nós	KAR marginal	$\leq 1/5$	$\leq 1/2$	$> 1/2$
	KAR total	$\leq 1/5$	$\leq 1/2$	$\leq 1/3$
Fio		$\leq 1/10$	$\leq 1/6$	
Taxa de crescimento		≤ 6 mm	≤ 10 mm	
Fendas	não repassadas	Fendas superficiais com $L_f \leq 300$ mm podem ser ignoradas		
		$L_f \leq 1/4 l$ e $L_f \leq 600$ m	$L_f \leq 1/4 l$ e $L_f \leq 900$ m	
	repassadas	Não mais do que uma fenda com o comprimento máximo, por cada metro		
		Permitidas só nos topos: $L_f \leq 600$ mm e $L_f \leq 1,0$ h	Permitidas só nos topos: $L_f \leq 1,5$ h	
Descaio		$\leq 1/4 b$; $\leq 1/4 h$ no comprimento total	$\leq 1/3 b$; $\leq 1/3 h$ no comprimento total	
		$\leq 1/3 b$; $\leq 1/3 h$ ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)	$\leq 1/2 b$; $\leq 1/2 h$ ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)	
Empenos	em arco de face (em 2 m)	Se $b = 35$ mm $\rightarrow X \leq 30$ mm Se $b \geq 75$ mm $\rightarrow X \leq 10$ mm (interpol para valores de espessura intermédios)		
	em arco de canto (em 2 m)	Se $h = 60$ mm $Y \leq 10$ mm Se $h \geq 250$ mm $Y \leq 5$ mm (interpol para valores de largura intermédios)		
	em hélice (em 2 m)	$Z \leq 1,5$ mm por cada 25 mm de largura da peça		
	em meia cana	$X_t \leq 1$ mm por casa 25 mm de largura da peça		
Bolsas de resina e casca inclusa	não repassadas	Sem limites caso sejam mais curtas que a largura da peça. Se tal não se verificar aplicam – se os limites das fendas.		
	repassadas	Sem limites caso o seu comprimento seja $\leq 1/2$ da largura da peça. Se tal não se verificar aplicam – se os limites das fendas.		
Medula		Não Admitida	Admitida	

Tabela D.5: Características dos provetes ensaiados.

Nº	Tipo	Juntas	Rep.	Face							Reforço		Ref.		
				Tracionada	Desvio acentuado das fibras	Corte Máximo	Comprimida	Medula	Bolsas de Resina	Fendas	Nós	Parafusos		Chapas	
1				B	x	C	B					x			Ref1
2				B		B	B		x						Ref2
3	MM			C			B	x		x	x				FT
4				B			C	x		x	x				FC
5				B		C	B	x		x	x	30°-40°	x		FT.CF
6				C			B	x		x	x	30°-40°			FT.C
7	MLC	FJ													FJs/p
8		FJ	7								45°-60°				FJc/p
9		JC										45°-60°			JCc/p

B - Borne; C - Cerne; x - Contém

Ref1 - Viga de referência 1; Ref2 - Viga de referência 2

FT - Viga com fendas situadas na zona tracionada

FC - Viga com fendas situadas na zona comprimida

FT .CF- Viga com fendas situadas na zona tracionada e reforçadas ao corte e à flexão

FT .C- Viga com fendas situadas na zona tracionada e reforçadas ao corte

FJs/p - Vigas com ligação entre lamelas do tipo finger-joints sem reforço

FJc/p - Vigas com ligação entre lamelas do tipo finger-joints com parafusos

JCc/p - Vigas com ligação entre lamelas topo a topo e reforçadas com parafusos

ANEXOS E

Pinus pinaster Ait. v *Picea abies*

Nota: Neste anexo serão apresentados links e resumos relativos à espécie de Pinho bravo referentes aos tópicos apresentados neste anexo. As informações apresentadas neste anexo serão usadas para fazer referências ao longo da dissertação.

E.1 Espécie

Pinheiro-bravo: Descrição; Morfologia; Localização e distribuição; Utilização em Portugal, Estado de conservação; Classificação científica; Nome Binomial; História; Contexto; Invasividade.

- <http://pt.wikipedia.org/wiki/Pinheiro-bravo> (PT)
- http://en.wikipedia.org/wiki/Pinus_pinaster (EN)

Espruce:

- http://pt.wikipedia.org/wiki/Picea_abies (PT)
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Spruce> (EN)

Tabela E.1: Principais características da madeira de Pinho bravo

Pinho bravo

Nome Botânico: *Pinus pinaster Ait*

Designações comerciais: Pinho bravo (Pt), Maritime pine (in), Pin maritime (fr), Pino marittimo (it), Seestrandskiefer (al), Pinogallego (es)



Procedência: Zona mediterrânea ocidental

Disponibilidade: Fácil

***Durabilidade natural:** Fungos (Pouco a mediamente durável), Hylo-tropes (Suscetível), Anobium (Suscetível), Térmitas (Suscetível) - [EN 350-2 \(1994\)](#), [Gaspar et al. \(2005, Quadro 2\)](#)

Impregnabilidade: Cerne (não impregnável), (Borne) impregnável - [M2/LNEC \(1997, Quadro 2\)](#), [EN 350-2 \(1994\)](#).

Propriedades tecnológicas: A colagem deve ser realizada após uma lavagem e uma escovagem prévia da superfície; pregagem e aparafusamento sem problemas; requer tratamento prévio com tapa poros.

Propriedades Físicas - [M2/LNEC \(1997, Quadro.I\)](#).

PSF(%): 25 a 35 - [Silva et al. \(2013, tab. 5\)](#)

Densidade:

Pinho bravo - Viana 565 kg/m³ - Leiria 640 kg/m³

Madeira moderadamente pesada 0,5 a 0.59 g/cm³ - [Silva et al. \(2013, tab. 3\)](#)

Anisotropia:

Média a baixa; Coeficiente de anisotropia (ϵ_t/ϵ_r) = 1.9 - [Silva et al. \(2013, tab. 3\)](#).

Retracção:

Madeira nervosa a medianamente nervosa - [Franco & Others \(2013, p.70\)](#), [N. Machado \(2006, tab.2.2\)](#)

Dureza:

Moderadamente dura a dura 3,6 (Chalais-Meudon) e 325 kgf (Janka), sendo superior às demais variedades de pinho existentes, [Silva et al. \(2013, tab. 9\)](#).

Propriedades Mecânicas - Anexo ??

Descrição

A madeira de Pinho bravo, tendo em vista a sua utilização para fins estruturais, é produzida essencialmente em Espanha, Portugal e França. As características da madeira de Pinho bravo podem ser consultadas na ficha [LNEC \(1963\)](#) e ainda numa publicação recente, [Silva et al. \(2013\)](#).

Classificação - Madeira Maciça

A classificação da madeira para elementos estruturais pode ser realizada de forma mecânica ou visual (estética).

No caso da utilização de critérios estéticos a operação de classificação baseia-se em normas de classificação visual, isto é, avaliação a olho nu dos defeitos da madeira em provetes de dimensão estrutural, de acordo com a [EN 518 \(1995\)](#). Por outro lado, de forem utilizados critérios de resistência mecânica, a operação de classificação baseia-se na determinação por medição da flecha num ensaio de flexão, também em provetes de dimensão estrutural, fazendo então uma estimativa da resistência de acordo com a [EN 519 \(1995\)](#).

Em 1990 foram realizados ensaios mecânicos e físicos sobre amostras representativas de provetes de madeira de pinho bravo nacional (ver [Simões et al., 2011](#), tab.1). Os estudos realizados pelo LNEC tinham em vista a implementação de normas de classificação da madeira para fins estruturais (à data inexistentes em Portugal) e a obtenção de valores característicos das propriedades relevantes para o dimensionamento de estruturas. Para isso, foi tido em consideração a via definida pela normalização europeia.

De acordo com a [EN 338 \(2003, 6.2.2\)](#), é possível atribuir a uma população de madeiras uma determinada classe de resistência, desde que a sua resistência à flexão na direção paralela às fibras ($f_{m,k}$), a sua massa volúmica (ρ_{mean}), e o seu módulo de elasticidade médio na direção axial ($E_{0,mean}$), designadas por propriedades "fundamentais", sejam todas superiores aos valores correspondentes à classe respetiva.

Deste modo, foram determinada as propriedades ditas "fundamentais", com recurso a ensaios mecânicos que seguiram as recomendações expressas na [EN 408 \(2010c\)](#). Sendo que o tratamento dos dados seguiu as recomendações expressas na [EN 384 \(2004\)](#), utilizando as equações lá descritas para determinar os valores característicos das restantes propriedades mecânicas e da massa volúmica.

O trabalho realizado pelo LNEC levou a publicação em 2005 da norma [NP 4305 \(1995\)](#) que estabelece os critério de classificação visual de madeira serrada de Pinho bravo, tendo em vista a sua resistência mecânica. Esta norma, define duas classes de qualidade para o Pinho bravo, designadas por E (estruturas) e EE (especial para estruturas), mediante a imposição limites

para os seguintes defeitos ou características: nós (KAR), taxa de crescimento, inclinação do fio, fendas, bolsas de resina ou casca inclusa, presença de medula, descaio e empenos. A classificação visual pode ser feita, a nível europeu, de acordo com os critérios definidos na [EN 518 \(1995\)](#). A correspondência entre as classes de resistência estabelecidas na [EN 338 \(2003\)](#), (EE - C35 e E - C18) foram definidas, a partir dos valores característicos de resistência obtidos, de acordo com a norma [EN 384 \(2004\)](#). As diversas combinações de espécie/origem/classe de qualidade de madeira é estabelecida na [NP EN 1912 \(2003\)](#), que indica as diversas opções que satisfazem cada uma das classes de resistência. Na sequência deste estudo a [NP EN 1912 \(2003\)](#), viria a incluir a classe de qualidade E como integrada na classe de resistência C18 segundo a [EN 338 \(2003, tab.1\)](#).

Classificação - Madeira Lamelada Colada

A madeira Lamelada colada surgiu pela primeira vez em 1901 pelo seu criador Otto Hetzer - na Noruega, na Suécia e outros países da Europa. A implementação deste tipo de estruturas teve um grande aumento na sua produção durante a 2ª Guerra Mundial - principalmente nos Estados Unidos da América. Este fator devesse também ao avanço tecnológico relativamente às colas sintéticas que ao contrário das colas de caseína utilizadas até então, proporcionou uma significativa melhoria na durabilidade deste tipo de produtos.

A utilização deste tipo de material em Portugal, foi quase nula até à poucos anos, sendo atualmente comercializada madeira lamelada-colada fabricada principalmente com espécies importadas, como é o caso da *Picea abies*.

No entanto surgiu em Portugal a necessidade de estudar a viabilidade da utilização da madeira de Pinho bravo, dada a sua importância a nível nacional, para fabrico de estruturas de madeira lamelada-colada. Esses estudos foram levados a cabo pelo LNEC, envolvendo madeira não tratada, sobretudo entre 1978 e 1990. Dada a necessidade e interesse de utilização da espécie para fabrico de estruturas para exteriores, ou em situações que o risco de ataque biológico determine a necessidade de tratar a madeira com agentes preservadores em profundidade, foi realizado pelo LNEC um projecto de investigação designado a avaliar a colagem de madeira de Pinho bravo tratada com um produto preservador alternativo ao CCA (preservador tradicional, entretanto proibido), adequado às classes de risco 3 e 4 definidas na [NP EN 335-1 \(1994\)](#). Outros estudos são mencionados por [Gaspar et al. \(2005, 2.1, p. 3\)](#).

Os resultados do trabalho experimental levado a cabo por [Gaspar et al. \(2005\)](#), em 27 vigas ensaiadas à flexão no laboratório do Instituto Superior Técnico, seguindo os procedimentos da [EN 408 \(2010c\)](#), apresentaram um valor característico da tensão de rotura à flexão relativo à globalidade dos ensaios de (28.9 MPa), bem superior ao valor característico da classe GL24h estabelecida na [EN 1194 \(2002\)](#) (24 MPa), usada na generalidade das estruturas de madeira

lamelada-colada. Desta forma, pode-se sugerir a madeira de Pinho bravo tratado, para o fabrico de estruturas de madeira lamelada-colada.

Segundo [Cruz \(2009\)](#), é afirmado que, de acordo com as simulações de Monte Carlo mostrou-se que é possível produzir vigas da classe GL 28c se for usada madeira de Pinho bravo das classes de resistência E e EE nas lamelas interior e exterior, respetivamente, e vigas da classe GL 24h se forem usadas ambas as classes de forma aleatória.

A adequação do Pinho bravo para o fabrico de estruturas lameladas-coladas é reconhecida na [EN 386 \(2001\)](#), que refere um conjunto de espécies que têm sido utilizadas no fabrico de madeira lamelada-colada, entre as quais figura o pinho bravo, como resultado da experiência francesa com esta madeira proveniente das florestas francesas do Landes.

[Negrão & Faria \(2009\)](#)

ANEXOS F

Dados e resultados dos ensaios

F.1 Propriedades Físicas e Geométricas

Tabela F.1: Propriedades Físicas e Geométricas

REF	<i>HR</i>	<i>TH</i>	<i>M</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>L</i>	<i>Vol.</i>	ρ	<i>A</i>	<i>W</i>	<i>I</i>
	%	%	kg	mm	mm	mm	dm ³	kg/m ³	cm ²	cm ³	cm ⁴
REF1	65	12	10.6	48	132	2552	16.2	655.6	63.4	139.4	920.0
REF2	65	12	10.1	48	133	2552	16.3	619.9	63.8	141.5	941.1
FC	65	12	10.5	46	132	2552	15.5	677.6	60.7	133.6	881.7
FT	65	12	10.1	46	133	2551	15.6	647.1	61.2	135.6	901.8
Média	65	12	10.3	47	133	2552	15.9	650.1	62.3	137.5	911.1
Desvio	0	0	0.3	1.2	0.6	0.5	0.4	23.8	1.6	3.6	25.4
C.O.V.	0%	0%	3%	2%	0%	0%	3%	4%	2%	3%	3%
FTRCF	65	12	11.1	47	133	2552	16.0	695.8	62.5	138.6	921.4
FTRC	65	12	9.6	47	132	2552	15.8	606.3	62.0	136.5	900.8
FJs/p	65	12	10.8	48	130	2550	15.9	675.6	62.4	135.2	878.8
FJc/p	65	12	10.8	48	130	2550	15.9	675.6	62.4	135.2	878.8
JCc/p	65	12	11.3	48	130	2550	15.9	707.0	62.4	135.2	878.8
Média	65	12	10.9	48	130	2550	15.9	686.1	62.4	135.2	878.8
Desvio	0	0	0.3	0	0	0	0	18.1	0	0	0
C.O.V.	0%	0%	3%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	0%

F.2 Regressão Linear

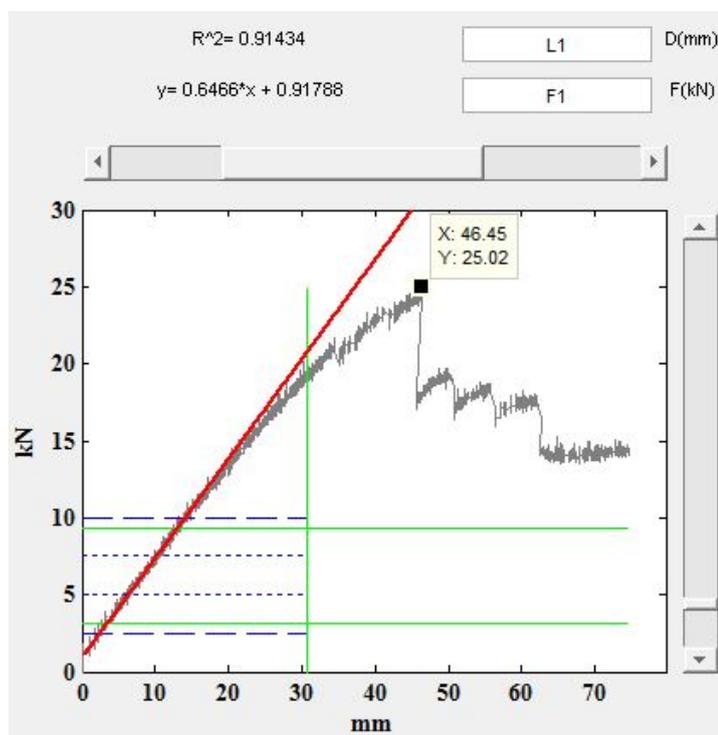


Figura F.1: Programa desenvolvido usando o Guide(Matlab) - Regressão Linear

F.3 Módulo de elasticidade Local

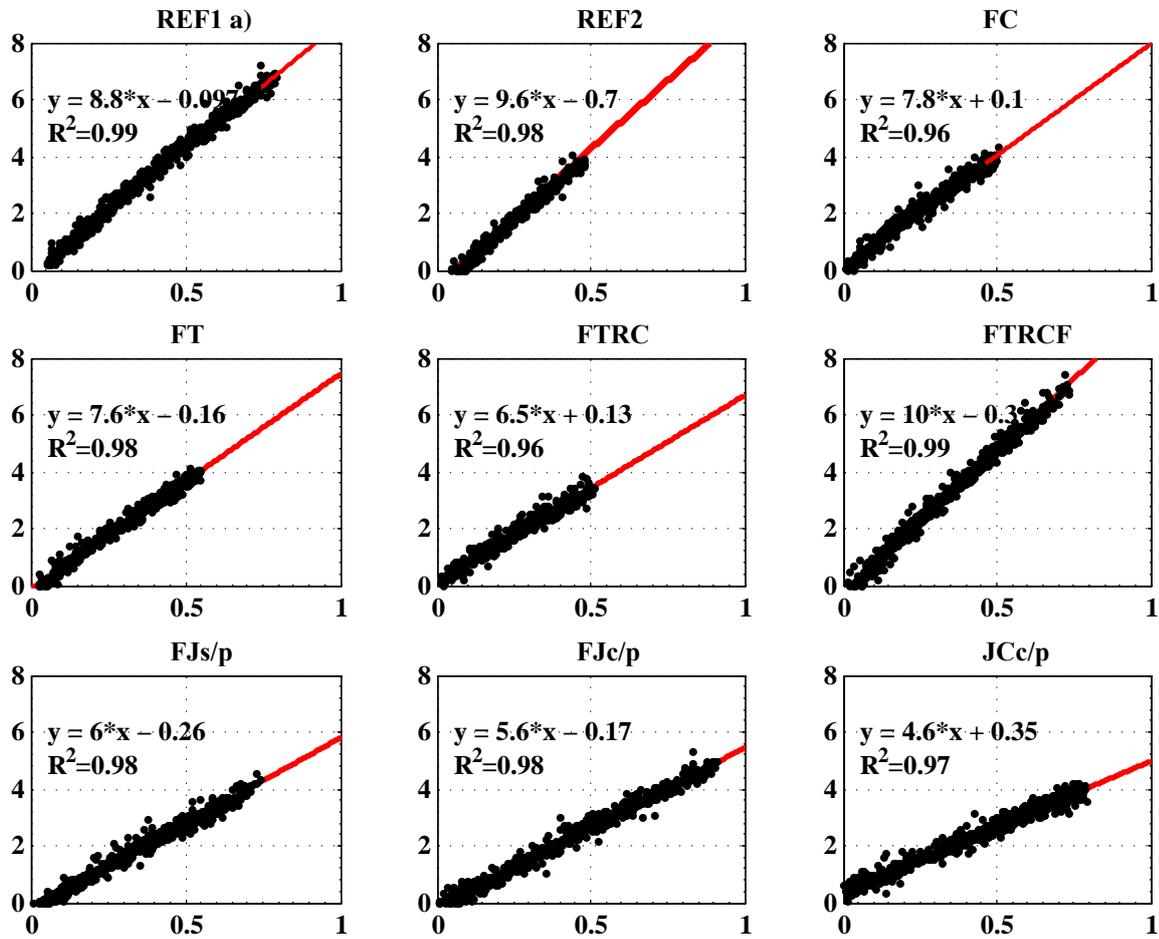


Figura F.2: Resultados dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade local; Eixo das ordenadas: Deslocamento (mm*10⁻¹); Eixo das abcissas: Força (kN).

Tabela F.2: Módulo de elasticidade local

REF	a	l_1	I	Δ_F/Δ_w	R^2	$E_{m,l}$	$\frac{E_{m,l}}{E_{m,l,Ref2}}$
	mm	mm	cm ⁴	kN/mm*10 ⁻¹	s.u.	GPa	s.u.
REF1	810	650	920.0	8.8	0.99	20.5	0.94
REF2	810	650	941.1	9.6	0.98	21.8	1.00
FC	810	650	881.7	7.8	0.96	18.9	0.87
FT	810	650	901.8	7.6	0.98	18.0	0.83
Média				8.5	0.98	19.8	0.9
D.P.				0.9	0.01	1.7	0.1
C.O.V.				11%	1%	8%	8%
FTRCF	810	650	921.4	10	0.99	23.2	1.06
FTRC	810	650	900.8	6.5	0.96	15.4	0.71
FJs/p	810	650	878.8	6	0.98	14.6	0.67
FJc/p	810	650	878.8	5.6	0.98	13.6	0.62
JCc/p	810	650	878.8	4.6	0.97	11.2	0.51
Média				5.4		13.1	0.60
D.P.				0.7		1.8	0.08
C.O.V.				13%		13%	13%

F.4 Módulo de elasticidade global e resistência à flexão

Tabela F.3: Resistência à flexão

REF	l	a	b	h	D_y	F_y	k_i	R^2	$E_{m,g}$	D_u	F_u	k_{su}	f_m	D
	mm	mm	mm	mm	mm	kN	kN/mm	s.u.	GPa	mm	kN	kN/mm	MPa	s.u.
REF1	2400	810	48	132	36.12	21.08	0.58	0.99	15.7	48.23	24.64	0.51	71.59	1.3
REF2	2400	810	48	133	48.5	23.7	0.49	0.99	12.8	79.5	28.04	0.35	80.25	1.6
FC	2400	810	46	132	21.44	12.01	0.56	0.99	15.7	41.71	19.91	0.48	60.36	1.9
FT	2400	810	46	133	26.94	12.12	0.45	0.99	12.3	51.69	19.3	0.37	57.64	1.9
Média					33.25	17.23	0.52		14.1	55.28	22.97	0.43	67.46	1.7
D.P.					11.83	6.06	0.06		1.8	16.67	4.14	0.08	10.45	0.3
C.O.V.					36%	35%	12%		13%	30%	18%	18%	15%	17%
FTRCF	2400	810	47	133	17.78	11.91	0.67	0.99	18.0	45.32	23.06	0.51	67.40	2.5
FTRC	2400	810	47	132	19.4	7.76	0.40	0.99	11.0	49.4	15.7	0.32	46.59	2.5
FJs/p	2400	810	48	130	14.09	6.48	0.46	0.99	12.9	14.09	6.48	0.46	19.41	1.0
FJc/p	2400	810	48	130	14.64	5.7	0.39	0.99	11.0	21.51	6.08	0.28	18.21	1.5
JCc/p	2400	810	48	130	19.75	9.08	0.46	0.99	12.9	30.62	11.49	0.38	34.42	1.6
Média					16.16	7.09	0.44		12.3	22.07	8.02	0.37	24.01	1.3
D.P.					3.12	1.77	0.04		1.1	8.28	3.01	0.09	9.03	0.3
C.O.V.					19%	25%	9%		9%	38%	38%	24%	38%	22%

Tabela F.4: Coeficientes unitários em relação a Ref2

REF	$E_{m,g}$	$\frac{E_{m,g}}{E_{m,g,Ref2}}$	F_u	$\frac{F_u}{F_{u,Ref2}}$	f_m	$\frac{f_m}{f_{m,Ref2}}$	D
	GPa	s.u.	kN	s.u.	MPa	s.u.	s.u.
REF1	16.94	1.32	24.64	0.88	71.59	0.89	1.7
REF2	12.88	1.00	28.04	1.00	80.25	1.00	1.6
FC	15.71	1.22	19.91	0.71	60.36	0.75	1.9
FT	12.34	0.96	19.3	0.69	57.64	0.72	1.9
FTRCF	17.98	1.40	23.06	0.82	67.40	0.84	2.5
FTRC	10.98	0.85	15.7	0.56	46.59	0.58	2.5
FJs/p	12.94	1.01	6.48	0.23	19.41	0.24	1.0
FJc/p	10.96	0.85	6.08	0.22	18.21	0.23	1.5
JCc/p	12.94	1.00	11.49	0.41	34.42	0.43	1.6

ANEXOS G

Materiais de reforço

G.1 Pregos com aderência melhorada

PREGO ANKER prego com aderência melhorada					
código	Ø x comprimento	peças/embalagem			
PF601440	4,0 x 40	250			

VALORI STATICI PREGOS ANKER Ø 4,0 E Ø 6,0 - JUNÇÃO A TAGLIO LEGNO - ACCIAIO

Espessura placa	V _{zul} admiss. [kN]	R _{v,k} característico [kN]				
		4,0 x 40	4,0 x 50	4,0 x 60	4,0 x 75	4,0 x 100
Anker Ø 4	4,0 x L					
s = 1,50 mm	0,71	1,12	1,38	1,45	1,52	1,65
s = 2,00 mm	0,71	1,12	1,38	1,45	1,52	1,65
s = 3,00 mm	0,71	1,31	1,62	1,69	1,75	1,89
s = 4,00 mm	0,71	1,52	1,84	1,92	1,99	2,12

- Os valores admissíveis (V_{zul}) são calculados segundo norma DIN 1052:1988.
- Os valores característicos (R_{v,k}) são calculados segundo norma EN 1995:2004.

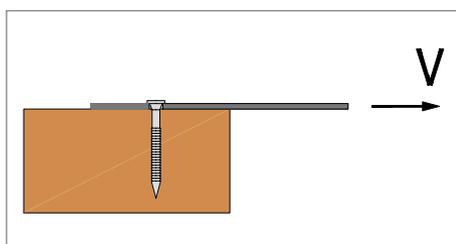


Figura G.1: Pregos Anker e resistência ao corte simples (madeira-tira metálica), ([Rothoblaas](#)).

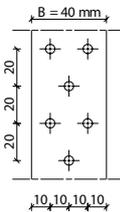
G.2 Linha furada (Tira metálica furada)

LINHA FURADA

código	B	L	S	Ø 5	peças/embalagem
PF704010	40	1200	2	120	20



- Aço S250 GD
- Valores admissíveis (Nzul) aconselhados (lado aço).
- Valores característicos (Nk) de acordo com EN1993:2005 (coeficiente aços: γ_{m1}) (lado aço).



ESTICADOR DE FITA COM GRAMPO

código	descrição	peças/embalagem
AT2216	esticador de fita com grampo	1
AT2215	terminal com anel	1

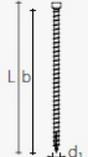



Figura G.2: Linha furada e esticador de fita com grampo (Rothoblaas).

G.3 Parafuso auto-perfurante (VGZ7100)

Códigos e dimensões

d_1 [mm]	código	L [mm]	b [mm]	peça/embal.
	VGZ7100	100	90	1



Suporte de viga VGZ



A estática do carpinteiro

EXTRACÇÃO DA ROSCA TOTAL N_{adm}

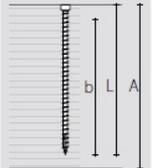
d_1 [mm]	L [mm]	b [mm]	A_{adm} [mm]	N_{adm}
100	90	110	315 kg	

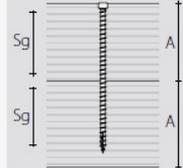
EXTRACÇÃO DA ROSCA PARCIAL N_{adm}

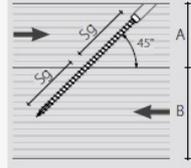
d_1 [mm]	L [mm]	s_g [mm]	A_{adm} [mm]	N_{adm}
100	35	55	123 kg	

MADEIRA-MADEIRA DESLIZAMENTO V_{adm}

d_1 [mm]	L [mm]	s_g [mm]	A_{adm} [mm]	E_{min} [mm]	V_{adm}
100	35	40	55	87 kg	







1kN = 100 kg

FÓRMULAS DE CÁLCULO DIN 1052-2:1988

<p>MADEIRA-MADEIRA</p> $N_{adm} = 0,5 \cdot s_g \cdot d_1$	<p>EXEMPLO DE MADEIRA-MADEIRA</p> <p>VGZ 9 x 240 mm</p> <p>$d_1 = 9$ mm</p> <p>$s_g = 105$ mm</p>	<p>$N_{adm} = 0,5 \cdot s_g \cdot d_1$</p> <p>$N_{adm} = 0,5 \cdot 105 \cdot 9 = 473$ kg</p>
--	---	--

Figura G.3: Dimensão, sistema de suporte e propriedades resistentes, do parafuso VGZ7100 (Rothoblaas).

216

Luís Costa