



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

Pontes Pedonais em Madeira Lamelada Colada
Caracterização, Dimensionamento, Patologia e Conservação



Ponte pedonal Parque das Nações (Lisboa)

SUSANA MARIA TRIGO DE ALMEIDA

Licenciada em Engenharia Civil

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de
Especialização de Edificações

Orientadora:

Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques, Professora Adjunta (ISEL)

Júri:

Presidente: Doutor Filipe Manuel Almeida Vasques, Professor Adjunto (ISEL)

Vogais: Mestre Manuel Brazão Farinha, Professor Adjunto (ISEL)

Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques, Professora Adjunta (ISEL)

Dezembro de 2013

Pontes Pedonais em Madeira Lamelada Colada Caracterização, Dimensionamento, Patologia e Conservação

RESUMO

A madeira é um material utilizado pelo homem na construção de abrigos, edifícios, pontes, etc., e apresenta algumas condicionantes no que diz respeito aos diferentes agentes que a atacam fazendo assim dela um material menos resistente, ou seja, alterando as suas propriedades.

Existem inúmeros produtos derivados da madeira e um dos exemplos é a MLC que apresenta boas características, para aplicação em coberturas e pontes pedonais.

São apresentadas algumas espécies, e as que mais se adequam, como o caso da casquinha (*pinus sylvestris L.*) e espruce, (*picea abies L., Karst* ou *picea excelsa, Link*), e o processo de fabrico da madeira lamelada colada. São também descritas as propriedades físicas, mecânicas e químicas da madeira, e os principais factores que condicionam o comportamento da madeira.

A madeira lamelada colada é utilizada na construção de pontes (vigas, ponte atirantada, viga reticulada, em arco e ponte suspensa).

Para a realização dos projectos existem normas a seguir e a norma que regula os projectos de estruturas de madeira é o Eurocódigo 5.

Uma estrutura, qualquer que seja a sua natureza, precisa de ser conservada, especialmente no caso de estruturas de madeira, pois estas são sensíveis e o seu processo de degradação, quando comparado com o de outros materiais, como o caso do betão e aço, pode ser mais elevado, sendo assim imperativa a existência de um plano de monitorização adequado.

Apresentam-se quatro estudos de pontes em MLC, em Portugal e na Noruega de modo a perceber quais as causas de degradação face ao clima onde se inserem.

PALAVRAS-CHAVE: madeira, madeira lamelada colada, MLC, pontes, dimensionamento, conservação, manutenção.

Pedestrian Bridges in Glulam Characterization, Dimensioning, Pathology and Conservation

ABSTRACT

Wood is a material used by mankind in the construction of shelters, buildings, bridges, etc., but its resistance can be lowered by the act of biological agents, changing some of its proprieties.

There are many wood derivative materials, as example, glued laminated timber (Glulam), it has very good characteristics to be applied in rooftops or pedestrian bridges.

Are presented the different existing species and which are the best to make glulam, which is the case of “casquinha” (*pinus sylvestris* L.) and spruce, (*picea abies* L., Karst or *picea excelsa*, Link), as well as all the process to obtain it. There is also made an approach to its physical, mechanical and chemical proprieties and the main factors that affect the wood’s behaviour.

The glulam is mostly used on the construction of pedestrian bridges with structural system of boards or a structural system of beams.

To every construction, there are standards to be followed, and to the construction of wood structures this standard is the Eurocode 5.

Every structure, no matter of what kind, needs to be maintained, especially in the case of wood structures, due to the fact that these are sensible and its degradation process is very quick, when compared to other materials, like concrete or steel, being mandatory to have a proper maintenance plan.

There are shown four studies concerning bridges in glulam, in Portugal and in Norway, to try to understand what the causes for degradation are and compare them with the type of climate the bridges are in.

KEYWORDS: wood, glued laminated timber, glulam, bridges, design, conservation, maintenance.

Na vida as coisas não caem do céu, é preciso lutar pelos nossos objectivos, com garra, e o
mais importante é nunca desistir,
Susana Almeida, 2013

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer a todas as pessoas que acreditaram, e acreditam, no meu esforço e dedicação, sem o apoio delas o meu Trabalho Final de Mestrado não teria corrido tão bem, a todas elas um muito obrigado do fundo do coração.

À Doutora Maria Dulce Franco Henriques, Professora Adjunta no ISEL, por aceitar a tarefa de orientar a elaboração desta dissertação, o meu sincero agradecimento pela disponibilidade e empenho em atender as minhas dúvidas.

Quero também agradecer a todos aqueles cujo contributo foi fundamental para a realização desta dissertação, nomeadamente:

- À Doutora Helena Pires Cruz, investigadora principal do LNEC, ao eng.º Pedro Palma e eng.ª Nádia Lampreia, ambos colaboradores do LNEC, que gentilmente me forneceram importantes informações para a realização desta dissertação;
- Ao director, Åge Holmestad, da empresa Moelven Limtre AS, por gentilmente fornecer algumas peças desenhadas, bem como informação, sobre a ponte pedonal de madeira lamelada colada Leonardo, em Ås na Noruega;
- À Maylen Torsteinbø e eng.º João Devesa da empresa Statens vegvesen, por mostrarem-se disponíveis em fornecer informações sobre a ponte pedonal de madeira lamelada colada Leonardo, em Ås na Noruega;
- À eng.ª Carla Belga, da empresa Jular, por me fornecer informação importante sobre o dimensionamento das estruturas de madeira lamelada colada;
- À eng.ª Sílvia Fernandes, da empresa Carmo, por me facultar informação sobre a ponte na Avenida Marquês da Fronteira, em Lisboa.

Às minhas colegas e amigas, Cátia e Júlia, obrigada pela força.

O meu particular agradecimento ao meu noivo eng.º João Vieira que se prontificou a ir comigo à ponte de madeira lamelada colada em Stavanger, para obter algumas fotografias da mesma e me apoiar durante o desenvolvimento desta dissertação.

Por último um especial agradecimento, à minha família, mãe e pai, bem como à família do meu noivo, pelo apoio moral, e irmã que se prontificou a ir comigo às pontes pedonais de madeira lamelada, em Lisboa, para obter o levantamento fotográfico das mesmas.

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTIVOS.....	2
1.3. METODOLOGIA E ESTRUTURA	2
2. MADEIRA	4
2.1. GENERALIDADES.....	4
2.2. PROPRIEDADES	11
2.2.1. <i>Propriedades Físicas</i>	11
2.2.2. <i>Propriedades Mecânicas</i>	12
2.2.2.1. Anisotropia e Variabilidade.....	13
2.2.2.2. Principais factores que condicionam o comportamento da madeira.....	14
2.2.2.3. Tracção Paralela às Fibras	17
2.2.2.4. Compressão Paralela às Fibras	19
2.2.2.5. Tracção Perpendicular às Fibras	20
2.2.2.6. Compressão Perpendicular às Fibras	21
2.2.2.7. Flexão	22
2.2.2.8. Corte.....	25
2.2.2.9. Fadiga.....	28
2.2.2.10. Fluência	28
2.2.2.11. Módulo de Elasticidade e Distorção.....	29
2.2.3. <i>Propriedades Químicas</i>	32
2.3. HIGROSCOPICIDADE E TEOR EM ÁGUA	33
2.3.1. <i>Higroscopicidade</i>	33
2.3.2. <i>Teor de Água</i>	34
2.3.3. <i>Retracção e Dilatação</i>	35
2.3.4. <i>Distorções</i>	39
3. PATOLOGIAS	42
3.1. ACÇÃO DOS AGENTES ATMOSFÉRICOS.....	42
3.2. ACÇÃO DOS AGENTES BIOLÓGICOS.....	43
3.3. ACÇÃO DO FOGO.....	49
3.4. DELAMINAÇÃO.....	51
4. CONSERVAÇÃO, PROTECÇÃO E MONITORIZAÇÃO	53
4.1. MÉTODOS DE CONSERVAÇÃO /PROTECÇÃO.....	53
4.2. MONITORIZAÇÃO, INSPECÇÃO E PLANO DE ENSAIOS	56
5. MADEIRA LAMELADA COLADA	60
5.1. ORIGEM.....	60
5.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	64
5.3. APLICAÇÃO	65
5.3.1. <i>Processo de fabrico</i>	66
5.3.2. <i>Certificação</i>	69
6. PONTES DE MADEIRA	72
6.1. HISTÓRIA DAS PONTES	72
6.1.1. <i>As Primeiras Pontes</i>	72

6.1.2.	<i>A Evolução das Pontes</i>	72
6.1.2.1.	As Pontes do Século XVIII.....	74
6.1.2.2.	As Pontes do Século XIX – Arcos e Treliças - Howe.....	75
6.1.2.3.	As Pontes do Século XX.....	79
6.1.3.	<i>Pontes Pedonais em Madeira Lamelada Colada</i>	79
6.1.3.1.	Sistemas Estruturais.....	79
6.1.3.2.	Pontes com Sistema Estrutural de Placas	80
6.1.3.3.	Pontes com Sistema Estrutural de Barras	81
6.1.3.3.1.	Sistema de Viga Simples	81
6.1.3.3.2.	Sistema de Ponte Atirantada	82
6.1.3.3.3.	Sistema Reticulado	82
6.1.3.3.4.	Sistema em Arco	83
7.	DIMENSIONAMENTO	84
7.1.	RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MADEIRA	84
7.1.1.	<i>Classes de Qualidade</i>	84
7.1.2.	<i>Classes de Resistência</i>	86
7.2.	METODOLOGIA GERAL DE CÁLCULO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA	87
7.3.	APLICAÇÃO DO EC5	88
7.3.1.	<i>Quantificação das Acções</i>	88
7.3.2.	<i>Estados-Limite</i>	90
7.3.3.	<i>Dimensionamento dos Elementos de Madeira</i>	94
7.3.3.1.	Tracção e Compressão	94
7.3.3.1.1.	Tracção Paralela ao fio	95
7.3.3.1.2.	Tracção Perpendicular ao fio	96
7.3.3.1.3.	Compressão Paralela ao fio	96
7.3.3.1.4.	Compressão Perpendicular ao fio	97
7.3.3.2.	Flexão	98
7.3.3.2.1.	Flexão Simples	99
7.3.3.2.2.	Flexão Composta com Tracção	100
7.3.3.2.3.	Flexão Composta com Compressão	101
7.3.3.3.	Corte.....	101
7.3.3.4.	Encurvadura	102
8.	ESTUDO DE CASOS	104
9.	CONCLUSÃO	114
9.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
9.2.	PROJECTOS FUTUROS	116
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
	ANEXO	A-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de uma Árvore.....	4
Figura 2 - Anatomia de uma madeira Conífera (Esquerda) e uma madeira Folhosa (Direita).....	5
Figura 3 - Corte transversal de uma árvore	5
Figura 4 - Anéis de Crescimento – lenho inicial e lenho tardio	6
Figura 5 - Direcções principais de uma peça de madeira	7
Figura 6 - Modelo estrutural da parede celular. LM – lamela média; P – parede primária; S1+S2+S3 – parede secundária	9
Figura 7 - Modelo estrutural representando a associação da celulose, hemicelulose e lenhina na parede celular. A - Plano transversal. B - Plano longitudinal	10
Figura 8 - Esquema genérico dos componentes químicos da madeira	10
Figura 9 - Direcções para estudo mecânico.....	13
Figura 10 - Funções densidade de probabilidade para madeira sólida e lamelada colada	14
Figura 11 - Efeito do teor de água na resistência da madeira.....	15
Figura 12 - Perda de resistência da madeira em função da duração de aplicação de carga.....	16
Figura 13 - Tracção perpendicular à fibra	20
Figura 14 - Compressão perpendicular à fibra	21
Figura 15 - Diagramas de distribuição de tensões em peças de madeira flectidas.....	23
Figura 16 - Dispositivos para determinação da resistência à flexão.....	24
Figura 17 - Corte. (a) – Paralelo às fibras;(b) – Perpendicular às fibras	26
Figura 18 - Tensões de corte em vigas flectidas.....	26
Figura 19 - Dispositivo para determinação da resistência ao corte	27
Figura 20 - Dispositivo para determinação do módulo de elasticidade global.....	30
Figura 21 - Lei de Hooke generalizada	31
Figura 22 – Exemplo de Curvas de retracção.....	36
Figura 23 - Retracção e inchamento segundo as direcções principais	37
Figura 24 - Distorções na secagem conforme a localização do corte no tronco.....	40
Figura 25 - Tipos de empenos – a) Arco de face; b) Arco de canto; c) Meia cana e d) Hélice.....	41
Figura 26 – Corpos frutíferos de <i>Gloeophyllum trabeum</i> - à esquerda e <i>Lentinus lepideus</i> Fr.à direita.....	44
Figura 27 - Caruncho Grande.....	45
Figura 28 - Caruncho pequeno nas várias formas	46
Figura 29 - <i>Lyctus brunneus</i> Steph.....	47
Figura 30 - Térmitas - <i>Reticulitermes lucifugus</i> Rossi.....	48
Figura 31 – Ficha da Espécie <i>pinus sylvestris</i> L.....	61
Figura 32 - À esquerda – espruce e à direita regiões de proveniência da espécie <i>picea abies</i> L., Karst.....	64
Figura 33- Produção de MLC.....	68
Figura 34 - Orientação das lamelas na secção transversal.....	69
Figura 35 - Juntas dentadas – Finger Joints.....	70
Figura 36 - Ponte descrita por Júlio César em " De bello Gallico"	73
Figura 37 - Sistemas Estruturais de Pontes - Andrea Palladio	74
Figura 38 - Ponte sobre o rio Rin - Existente	75

Figura 39 - Desenho da Ponte sobre o Rin - Novo Projecto.....	75
Figura 40 - Ponte Schüpbach-Brücke sobre o Rio Emme	76
Figura 41 - Arcos construídos mediante peças acopladas	76
Figura 42- Sistema Howe	77
Figura 43 - Sistema de Viga Simples	81
Figura 44 - Metodologia de cálculo de estruturas de madeira.....	87
Figura 45 - Curva de tensão-extensão de provetes de madeira limpa	94
Figura 46 - Viga continuamente apoiada.....	98
Figura 47 - Viga sobre apoios discretos	98
Figura 48 - Secção transversal genérica	99
Figura 49 - Ponte Pedonal em Madeira Lamelada Colada - Parque das Nações – Lisboa.....	104
Figura 50 - Vista a Nascente - Face Sul deteriorada - à esquerda e Face Norte sem problemas - à direita.....	105
Figura 51 - Posição dos sensores.....	105
Figura 52 - Pormenor da posição dos sensores	106
Figura 53 - Modelo Abaqus –fluxos da humidade (ou temperatura) na madeira.....	106
Figura 54 - Curvas de h umidade relativa (RH), cima, Curvas de temperatura (T), baixo, Instituto de Meteorologia da Finlândia (IMF). Período de 01.02.2007 (tempo - 0 dias) a 11.09.2007 (tempo - 222 dias)	108
Figura 55 – Ponte Pedonal em Madeira Lamelada Colada - Avenida Marquês da Fronteira – Lisboa	111
Figura 56 - Degradação da viga principal	112
Figura 57 - Degradação da plataforma da ponte/Pate inferior da ponte.....	112
Figura 58 - Ponte Pedonal em Madeira Lamelada Colada - Ås – Noruega.....	113
Figura 59 - Ábaco de Kollmann	A-1
Figura 60 - Características mecânicas orientadas da madeira	A-1
Figura 61 - Efeito de escala.....	A-2
Figura 62 - Relação tensão - deformação da madeira em compressão e tracção	A-2
Figura 63 - Relação entre a resistência característica da madeira à flexão e resistência à compressão e tracção paralela à fibra e ao corte de acordo com a "EN 384:1995"	A-3
Figura 64 - Ensaio de Flexão - Esquema.....	A-5
Figura 65 - Ensaio de Flexão - Imagem real	A-5
Figura 66 - Tensões de Corte	A-6
Figura 67 - Dispositivo para determinação da resistência ao corte e dimensões do provete.....	A-6
Figura 68 - Curvas de equilíbrio higrométrico	A-7
Figura 69 - Determinação da retracção	A-8
Figura 70 - Esquema de secção ardida	A-8
Figura 71 – Delaminação de uma viga de MLC.....	A-9
Figura 72 - Formas Standarts das Estruturas de MLC	A-15
Figura 73 - Marcação CE de madeira lamelada colada.....	A-16
Figura 74 - Enquadramento das várias normas a ter em conta na adopção de estruturas de madeira lamelada colada	A-16
Figura 75 - Ponte Portage Viaduct	A-17
Figura 76 - Corte Transversal da Ponte Portage Viaduct	A-17
Figura 77 - Corte A-A - Alçado de uma ponte pedonal	A-18

Figura 78 - Planta de uma ponte pedonal	A-18
Figura 79 - Corte C-C.....	A-18
Figura 80 - Ponte Atirantada	A-19
Figura 81 - Sistema Reticulado	A-19
Figura 82 - Sistema em Arco.....	A-20
Figura 83 - Corte de elementos de madeira segundo os eixos: X,Y e Z	A-21
Figura 84 - Encurvadura de uma barra comprimida.....	A-22
Figura 85 – Alçado Norte da Ponte do Parque das Nações.....	A-22
Figura 86 - Alçado Sul da Ponte do Parque das Nações	A-22
Figura 87 - Passadiço: parte superior, à esquerda; parte inferior, à direita	A-23
Figura 88 - Pormenor da destruição da Ponte do Parque das Nações devido a embate de um camião ..A-23	
Figura 89 - Orientação da Ponte.....	A-24
Figura 90 - Resultados numéricos e medições de 01.02.2007 (t = 0 dias) a 11.09.2007 (t = 222 dias). Cima: Sensor 1. Centro: Sensor 2. Em baixo: Sensor 3. Valores de MC na superfície e a uma profundidade de 1,5 cm.....	A-25
Figura 90 - Resultados numéricos e medições de 01.02.2007 (t = 0 dias) a 11.09.2007 (t = 222 dias). Sensor 2: Resultados da análise com a tinta fraca utilizada e da análise de estudo de caso, com resinas alquídicas.....	A-26
Figura 92 - Teor de humidade ao longo da espessura da viga (Sensor 2) a cada 3 dias durante Agosto de 2007. Resultados de simulações com a tinta fraca utilizada e o estudo de caso com resinas alquídicas – weak paint – tinta fraca e Alkyd oil paint – resinas alquídicas	A-27
Figura 93 - Alçado Nordeste da Ponte na Av. Marquês da Fronteira	A-28
Figura 94 - Alçado Sudoeste Ponte na Av. Marquês da Fronteira	A-28
Figura 95 - Passadiço - parte superior	A-29
Figura 96 - Passadiço -parte inferior	A-29
Figura 97 - Apoios.....	A-30
Figura 98 - Ligação	A-30
Figura 99 - Orientação da Ponte.....	A-31
Figura 100 - Elemento de madeira com resina.....	A-31
Figura 101 - Piso irregular.....	A-32
Figura 102 - Ponte Pedonal em Madeira Lamelada Colada - Stavanger – Noruega	A-32
Figura 103 - Alçado norte da ponte de Stavanger	A-33
Figura 104 - Alçado sul da ponte de Stavanger.....	A-33
Figura 105 - Passadiço - parte superior	A-34
Figura 106 - Ligação	A-34
Figura 107 - Pilares da ponte.....	A-35
Figura 108 - Colocação do passadiço.....	A-35
Figura 109 - Orientação da ponte.....	A-36
Figura 110 - Alçado sul da ponte Leonardo	A-36
Figura 111 - Passadiço - parte superior	A-36
Figura 112 - Orientação da ponte.....	A-37
Figura 113 - Processo de fabrico da madeira lamelada colada da ponte Leonardo.....	A-37
Figura 114 - Alçados da ponte Leonardo	A-38
Figura 115 - Pormenores da ponte Leonardo	A-39

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Massas volúmicas de algumas madeiras existentes em Portugal (kg/m ³).....	12
Tabela 2 - Tensão de rotura à tracção perpendicular às fibras de algumas espécies de madeira	21
Tabela 3 - Tensão de rotura à flexão de algumas espécies de madeira	24
Tabela 4 - Valores das constantes elásticas da madeira usualmente utilizadas.....	32
Tabela 5 - Classificação da anisotropia da madeira	39
Tabela 6 - Valores de K_{cdf}	92
Tabela 7 - Tensão de rotura à compressão de algumas espécies de madeira	A-3
Tabela 8 - Classificação da madeira de acordo com o seu teor de água.....	A-7
Tabela 9 - Coeficientes de retracção de algumas espécies de madeiras.....	A-8
Tabela 10 - Metodologia de inspecção e diagnóstico em estruturas de madeira.....	A-10
Tabela 11 - Propriedades físico-mecânicas da madeira de casquinha – teor de água de 12%	A-12
Tabela 12 - Valores característicos de resistência mecânica para algumas classes de qualidade da madeira de casquinha (Redwood)	A-13
Tabela 13 - Valores característicos de resistência mecânica para algumas classes de qualidade da madeira de casquinha (Scots Pine).....	A-14
Tabela 14 - Características de durabilidade natural e de impregnabilidade da madeira de casquinha...A-14	
Tabela 15 - Valores máximos de espessura final (e) e área de secção transversal (A), para cada classe de serviço - Madeiras Resinosas	A-15
Tabela 16 - Classes de Resistência para Glulam	A-20
Tabela 17 - Classes de Resistência para Glulam Combinado	A-21
Tabela 18 - Classes das lamelas de acordo com a classe de Glulam pretendida.....	A-21
Tabela 19 - Valores máximos de ΔRHd	A-27
Tabela 20 - Gradientes positivos máximos calculados a 10 mm a partir da superfície da viga de madeira laminada colada (tinta fraca) correspondente aos três sensores nos períodos estudados	A-27

SÍMBOLOS E SIGLAS

a – Distância do eixo do apoio ao ponto de aplicação

A – Área de secção transversal

A_{ef} – Área de contacto efectiva

A_T – factor de ajuste

b – Espessura/Largura

b_{ef} – Largura reduzida

e – Espessura das lamelas

E – Módulo de elasticidade

E_{mean} – Valor médio do módulo de elasticidade

$E_{0,mean}$ – Valor médio do módulo de elasticidade paralelo às fibras

$E_{0,05}$ – Valor característico do módulo de elasticidade paralelo às fibras

$E_{90,mean}$ – Valor médio do módulo de elasticidade perpendicular às fibras

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

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

E_L – Módulo de elasticidade longitudinal

E_R – Módulo de elasticidade radial

E_T – Módulo de elasticidade tangencial

$k_{c,y}$ – Coeficiente de encurvadura segundo o eixo y

$k_{c,z}$ – Coeficiente de encurvadura segundo o eixo z

$f_{c,0,k}$ – Valor característico da tensão resistente à compressão paralela às fibras

$f_{c,90,k}$ – Valor característico da tensão resistente à compressão perpendicular às fibras

f_m – Resistência à flexão

$f_{m,dc,k}$ – Valor característico da resistência à flexão de face das ligações de topo

$f_{m,k}$ – Valor característico da tensão resistente à flexão estática

$f_{m,y,d}$ – Valor de cálculo da tensão resistente à flexão no plano xOy

$f_{m,z,d}$ – Valor de cálculo da tensão resistente à flexão no plano xOz

$f_{t,0,k}$ – Valor característico da tensão resistente à tracção paralela às fibras

$f_{t,90,k}$ – Valor característico da tensão resistente à tracção perpendicular às fibras

f_v – Tensão de rotura ao corte

$f_{v,k}$ – Valor característico da tensão resistente ao corte

F – Força aplicada

G – Módulo de distorção

G_{mean} – Valor médio do módulo de distorção

G_L – Módulo de distorção longitudinal

G_R – Módulo de distorção radial

G_T – Módulo de distorção tangencial

h, h_1 e h_2 – Altura

H – Teor de água

HR – Humidade relativa

i_y – Raio de giração segundo o eixo y

i_z – Raio de giração segundo o eixo z

I – Inércia

k – Factor de correcção

k_{cr} – Factor de redução

k_{def} – Factor de deformação

K_m – Parâmetro para ensaios de flexão a diversos teores de água

k_{mod} – Factor de modificação da resistência

K_{ser} – Modelo de deslizamento, em N/mm, aplicável ao cálculo do deslizamento de uma ligação (em mm) em função do esforço aplicado em Newton

$k_{c,90}$ – Coeficiente que traduz o efeito da variação da resistência da peça com a geometria e com a extensão da zona carregada

l_1 – Distância entre as zonas de carregamento

l – Comprimento carregado

$L_{v,y}$ – Comprimento de encurvadura para flexão em torno do eixo y

$L_{v,z}$ – Comprimento de encurvadura para flexão em torno do eixo z

L, L_1 e L_2 – Comprimento dos vãos

m_H – Massa volúmica

m_h – Massa volúmica do provete húmido

m_s – Massa volúmica do provete seco

PAG – Potencial de aquecimento global

PSF – Ponto de saturação das fibras

r – Raio de curvatura

S – Área

S_V – Valor do teor de água correspondente ao ponto de saturação das fibras

t – Tempo

T – Temperatura

V_H – Volume da madeira correspondente ao teor de água H

V_s – Volume da madeira à humidade de saturação das fibras ($H \approx 30\%$)

V_0 – Volume de madeira no estado anidro (seca em estufa a $103\text{ }^\circ\text{C}$ até peso constante correspondendo a $H = 0\%$)

X_d – Valor característico de uma propriedade de resistência

W – Quantidade de calor

α_T – Difusibilidade térmica

α_V – Coeficiente de retracção volumétrico

λ_T – Condutibilidade térmica

λ_y – Esbelteza segundo o eixo y

λ_z – Esbelteza segundo o eixo z

Δ_W – Flecha

Δ_F – Valores de carga

ε_L – Retracção volumétrica longitudinal

ε_R – Retracção volumétrica radial

ε_T – Retracção volumétrica tangencial

ε_V – Retracção volumétrica total

γ_M – Coeficiente parcial de segurança

Ψ_2 – Coeficiente para o valor quase-permanente da acção

γ_M – Coeficiente parcial de segurança para uma propriedade de um material

ρ_H – Massa volúmica da madeira

ρ_{mean} – Valor médio da massa volúmica

ρ_k – Valor característico da massa volúmica

$\sigma_{c,0,d}$ – Valor de cálculo da tensão actuante de compressão

$\sigma_{c,90,d}$ – Valor de cálculo da tensão actuante de compressão perpendicular ao fio

$\sigma_{m,H}$ – Tensão de rotura

$\sigma_{m,y,d}$ – Valor de cálculo da tensão máxima de flexão devida ao momento flector M_y

$\sigma_{m,z,d}$ – Valor de cálculo da tensão máxima de flexão devida ao momento flector M_z

$\sigma_{t,0,d}$ – Valor de cálculo da tensão actuante de tracção

$\tau_{v,H}$ – Tensão de corte

$\nu_{RT}, \nu_{LT}, \nu_{LR}, \nu_{TR}, \nu_{RL}, \nu_{TL}$ – Coeficientes de Poisson

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A madeira, nos tempos de hoje, tem alguma relevância para as construções, devido à sua natureza e sustentabilidade, sendo um material reciclável, renovável e biodegradável, despendendo menor energia para a sua transformação (Marques, 2008).

Analisando o mercado da madeira, verifica-se que cada vez mais, existem diferentes produtos, como por exemplo a madeira lamelada colada, que é constituída por lâminas de espessura pré-dimensionada, de comprimento variável, fortemente ligadas umas às outras por colas adequadas de grande resistência, e para, no geral, formar elementos de grande secção. Apesar de ser um conceito com cerca de 200 anos, as primeiras estruturas em madeira lamelada colada começaram a surgir há cerca de 100 anos, mas apenas recentemente começaram a ser utilizadas em Portugal (Cruz, 2007).

A madeira lamelada colada permite a realização de estruturas de grande vão e de variadas formas. Podem ser utilizadas, várias espécies, sendo a mais comum o espruce, árvore de grande porte, muito comum nos países Nórdicos, bem como a casquinha, *pinus sylvestris L.* De entre as várias estruturas de madeira lamelada colada as mais correntes são as coberturas de edifícios e as pontes pedonais.

A madeira lamelada colada apresenta vantagens em relação à madeira tradicional, pois passa por processos que a tornam resistente a ataques de agentes xilófagos, cloretos da água do mar e acção do cloro das piscinas, sendo um material apropriado para ambientes agressivos.

1.2. Objectivos

Esta dissertação tem como objectivos:

- Conhecer melhor as propriedades e características da madeira mais utilizada (casquinha, *pinus sylvestris* L, e espruce, *picea abies* L., Karst ou *picea excelsa*, Link) no processo de fabrico dos lamelados colados;
- Aprofundar os conhecimentos no que diz respeito às metodologias de análise da regulamentação actual;
- Averiguar os tipos de patologias mais frequentes na madeira/madeira lamelada colada e como as poderemos combater;
- Estudar as soluções de conservação das pontes pedonais;
- Fazer um plano de monitorização/ensaios a realizar numa ponte pedonal.
- Desenvolver um estudo de caso, com diferentes pontes em Portugal e na Noruega;
- Contribuir para a formação na área das estruturas de madeira lamelada colada bem como na formação/conhecimento de outros colegas.

1.3. Metodologia e Estrutura

Compõem esta dissertação nove capítulos, sendo o primeiro correspondente à Introdução, Objectivos e Metodologia e Estrutura.

O segundo capítulo refere-se às generalidades da madeira, onde se desenvolve uma breve abordagem da sua origem, composição, espécies e propriedades.

O capítulo três descreve as patologias que se podem encontrar na madeira, manifestação, mecanismo de ocorrência, causa, natureza, origens e consequências.

No capítulo quatro analisam-se as formas de proceder à conservação da madeira.

No capítulo número cinco explica-se a origem da madeira lamelada colada, as suas vantagens e desvantagens, o processo de fabrico bem como a sua certificação.

A importância das pontes, a sua história, e diferentes tipos de pontes estão enunciadas no sexto capítulo.

A regulamentação em vigor utilizada no dimensionamento de estruturas de madeira é descrita no sétimo capítulo. A regulamentação também se aplicada à madeira lamelada colada (MLC), mas existem normas que se devem ter em conta quando se trata da MLC.

No capítulo número oito é apresentado um estudo de caso de quatro pontes pedonais em MLC, duas situadas em Portugal e as outras duas na Noruega. É feita uma análise de comparação da degradação das mesmas.

Por último, no capítulo nove são feitas as principais conclusões do trabalho.

2. MADEIRA

2.1. Generalidades

A madeira é um material proveniente de um ser vivo, a árvore.

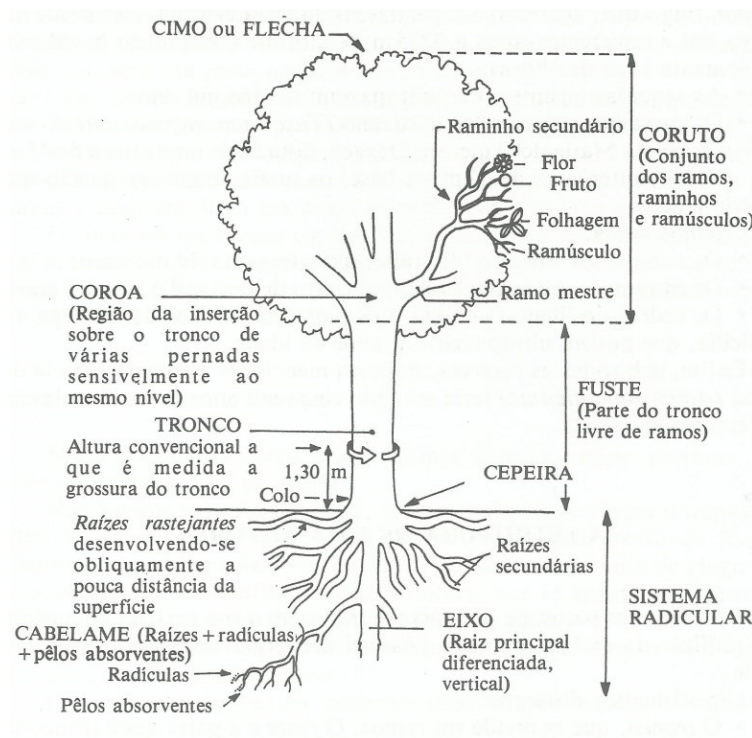


Figura 1 - Estrutura de uma Árvore

As árvores podem ser classificadas como Folhosas (Hardwoods) ou Resinosas (pela sua resina)/Coníferas (pelos seus cones - Softwoods) (Williamson, 2001).

Numa breve descrição as Coníferas fazem parte das gimnospermas, vegetais que produzem sementes nuas que não estão encerradas em frutos, são de rápido crescimento em relação à maior parte das Folhosas, encontrando-se maioritariamente em zonas montanhosas, e acomodando-se facilmente em climas temperados e frio, hemisfério norte (Fischesser, 2005).

As Coníferas são as mais utilizadas na construção devido à sua quantidade bem como por questões económicas. Como exemplos temos, os pinheiros, os espruces, os ciprestes, os abetos e as sequóias (Fischesser, 2005).

As Folhosas fazem parte das angiospermas, cujas sementes estão contidas num fruto fechado, são árvores mais evoluídas e desenvolvem-se em zonas tropicais. São de maior

resistência em relação às Coníferas, temos como exemplo os carvalhos, as faias, os castanheiros, os amieiros e os choupos (Fischesser, 2005).

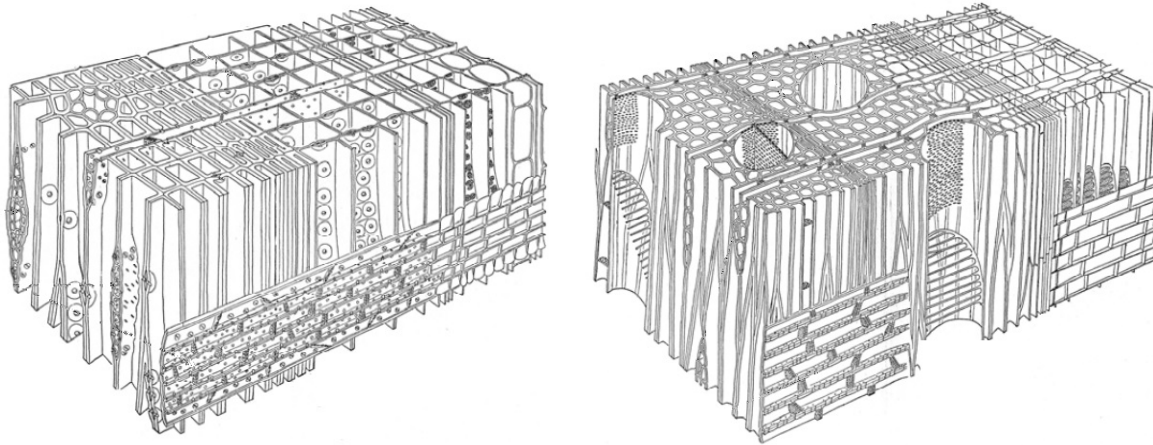


Figura 2 - Anatomia de uma madeira Conífera (Esquerda) e uma madeira Folhosa (Direita) (Sala, 2010)

A madeira utilizada na construção civil é extraída do tronco que é constituído pela casca, câmbio vascular e lenho como se pode observar na Figura 3.

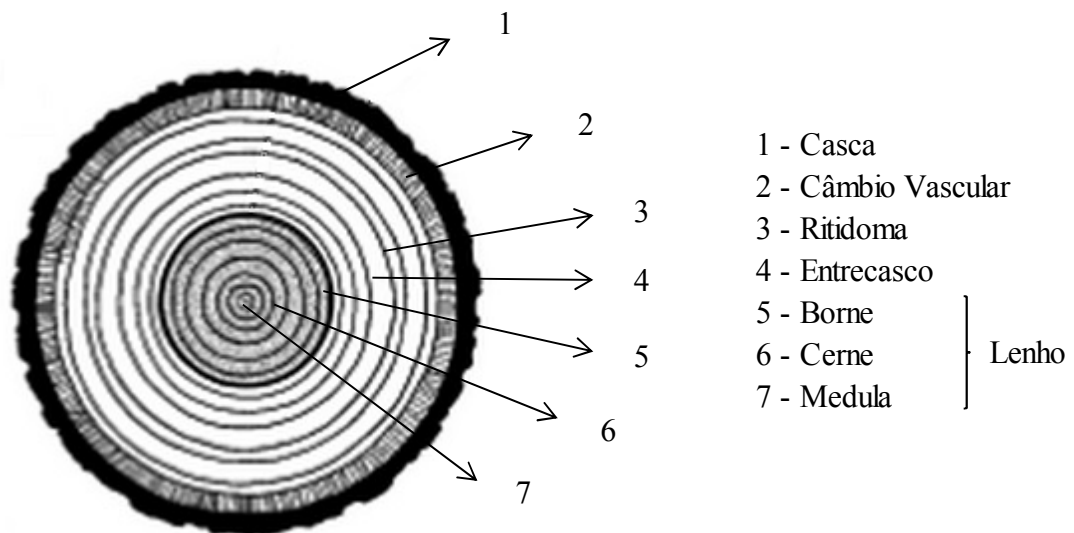


Figura 3 - Corte transversal de uma árvore (Adaptado-Coutinho,1999)

A casca compreende duas partes, a viva (entrecasco) e a morta (ritidoma). A parte viva, é constituída pela face externa da camada cambial e a sua função é veicular, e a parte morta composta por uma camada peridérmica e unicamente constituída de súber ou de súber misturado com fragmentos de líber morto e dessecado. A casca é como que um escudo para a árvore que a protege das bruscas mudanças de temperatura, do sol, dos danos mecânicos e do

ataque de inúmeros seres vivos, como por exemplo, bactérias, fungos, insectos, etc. A casca evita também da evaporação a camada exterior do tronco onde circulam grandes quantidades de água (Fischesser, 1980).

O câmbio vascular consiste “numa camada extremamente fina de tecidos vivos situada entre a casca e o lenho. É no câmbio vascular que se realiza a transformação dos açúcares e amidos nos principais constituintes do tecido lenhoso, celulose e lenhina” (Martins, 2010).

A **medula** é um pequeno núcleo de tecido localizado no centro do tronco e ramos, a partir da qual se dá o crescimento inicial da árvore (Carvalho, 2009).

O **borne** está localizado entre o câmbio vascular e o cerne, contém tanto células mortas como células vivas, tem função primária de armazenamento de alimento, mas nas camadas mais próximas do câmbio vascular o borne é responsável pelo transporte de água e seiva (Carvalho, 2009).

O **cerne** é constituído por células inactivas que já não têm funções nem de transporte nem armazenamento de alimento; e lenho. No tronco a parte central é consideravelmente mais escura do que a parte do lenho adjacente à casca, ao círculo mais claro designa-se por borne e a parte mais escura é chamada de cerne (Carvalho, 2009).

As árvores crescem a ritmos diferentes ao longo do ano, de onde resultam os anéis de crescimento da madeira, que servem de indicador da idade de uma árvore. Durante as condições de crescimento favorável, primavera, em climas temperados, as árvores crescem mais rapidamente, resultando em fibras de baixa densidade, sendo que estas são as mais claras, e são designadas por lenho inicial ou lenho de primavera. Quando a taxa de crescimento é mais lenta, as fibras da madeira formam-se nas paredes celulares mais espessas, resultando em fibras mais densas, sendo que estas são mais escuras, estas fibras são designadas por lenho tardio ou lenho de outono (Williamson, 2001).

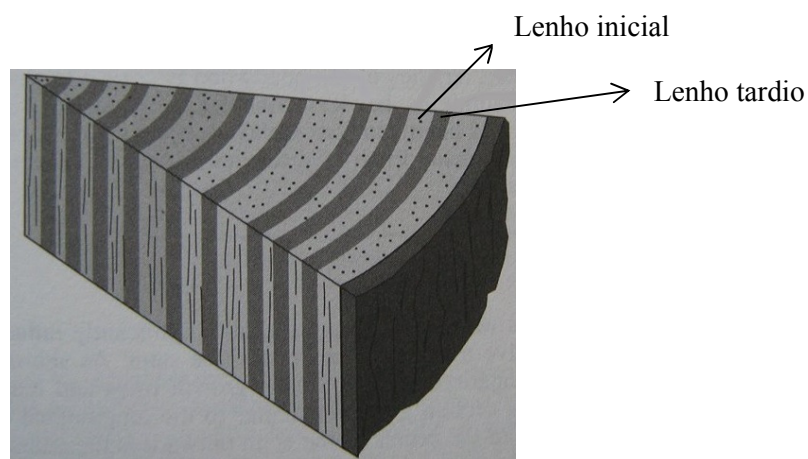


Figura 4 - Anéis de Crescimento – lenho inicial e lenho tardio (Williamson, 2001)

O processo de crescimento da árvore determina uma simetria axial e uma direcção predominante das células que constituem o lenho. Este arranjo resulta numa anisotropia marcada, tanto nas propriedades mecânicas como nas propriedades físicas da madeira, pelo que estas são normalmente referidas aos diferentes planos da madeira ou direcções, Figura 5 (Cruz & Nunes, 2008).

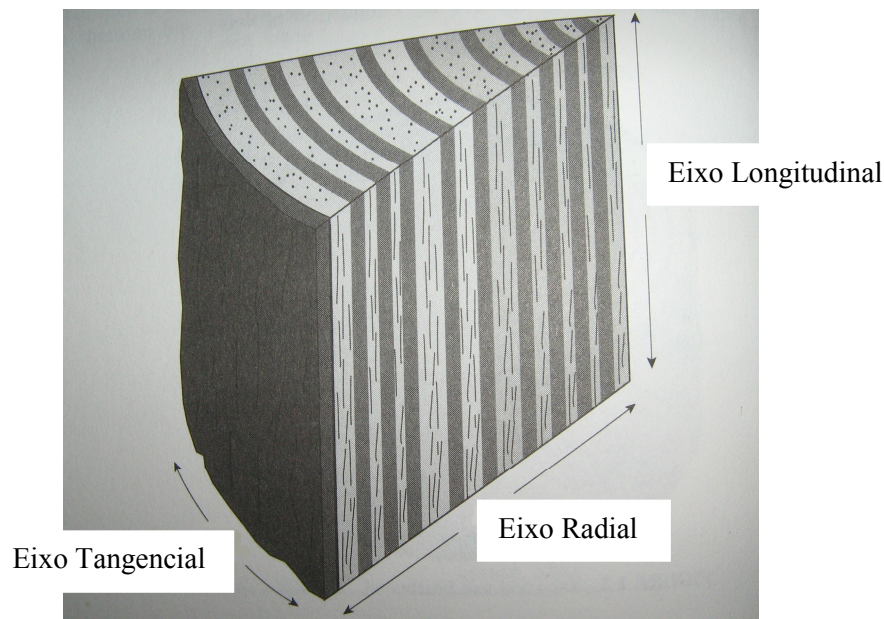


Figura 5 - Direcções principais de uma peça de madeira (Coutinho, 1999)

A direcção longitudinal é frequentemente designada por direcção paralela às fibras. As direcções radial e tangencial, ambas perpendiculares às fibras, correspondem respectivamente a um qualquer raio definido na secção transversal e a uma qualquer tangente às camadas de crescimento (Cruz & Nunes, 2008).

A composição química elementar da matéria orgânica da madeira tem pouca variabilidade entre as diferentes espécies. A composição, em termos médios, em percentagem do peso seco é: 50% carbono, 43% oxigénio, 6% hidrogénio, 1% azoto e menos de 1% de cinzas (silício, fósforo, potássio, cálcio). Estes elementos são sintetizados em três grandes componentes, macropolímero que forma as paredes celulares da madeira, que são a celulose (40 a 50%), a hemicelulose (25 a 40%) e lenhina (20 a 35%) (Cachim, 2007).

A celulose é um dos compostos orgânicos mais abundantes na Terra, constituinte de todas as plantas fibrosas. Ela toma o aspecto de microfibrilas compostas de longas bandas de moléculas de celulose dispostas de forma sobretudo paralela (Cachim, 2007).

A celulose é um macropolímero linear de massa molecular elevada, e é o principal componente da parede celular dos vegetais e o composto mais abundante da natureza. É a sua estrutura linear e o tipo de ligações entre as unidades de glucose que conferem à molécula celulose algumas das suas propriedades mais importantes, tais como a elevada rigidez e resistência à tracção (Silva, 2010).

As hemiceluloses são também macropolímeros mas com fórmulas muito variadas de peso molecular muito inferior à celulose (Cachim, 2007).

Os principais constituintes das hemiceluloses são cinco açúcares neutros, três hexoses (glucose, manose e galactose) e duas pentoses (xilose e arabinose) (Fengel & Wegener, 1989; Pereira et al., 2003).

O grau de polimerização destes polissacáridos é muito menor do que o da celulose, formando cadeias constituídas por 100 a 200 unidades de açúcar (Goldstein, 1991; Cachim, 2007).

As hemiceluloses têm um arranjo em geral amorfo, e existem diferenças entre as hemiceluloses das resinosas e folhosas, quer ao nível da quantidade com que estão presentes nestas madeiras (as folhosas têm teores mais elevados de hemiceluloses do que as resinosas), quer ao nível do tipo de açúcares que as constituem (Goldstein, 1991; Pereira *et al.*, 2003).

Na parede celular, as hemiceluloses exercem o papel de matriz de suporte das microfibrilas, tendo aparentemente uma distribuição uniforme por toda a parede (Parham, 1982b).

A lenhina, a seguir à celulose, é o componente macromolecular mais abundante e importante das células vegetais, correspondendo a cerca de 20-30% da parede celular da madeira (Pereira *et al.*, 2003).

Do ponto de vista morfológico a lenhina é uma substância amorfa, tridimensional e, em média, isotrópica. Para além das diferenças estruturais entre a lenhina de resinosas e folhosas existem diferenças a nível da quantidade com que a lenhina está presente nos dois tipos de madeira. As resinosas apresentam maior quantidade de lenhina do que as folhosas (Silva, 2010).

Segundo Parham, 1982b, 25% a 35% do xilema de resinosas é composto por lenhina enquanto nas folhosas os teores rondam os 15% a 25%.

Durante o desenvolvimento das células, a lenhina é o último componente estrutural a ser incorporado na parede celular, servindo de material agregador das fibrilas e das próprias fibras. Como resultado da sua estrutura química, a lenhina é um polímero rígido e duro com fortes ligações covalentes constituindo uma estrutura a três dimensões que confere rigidez e coesão à parede celular e resistência à compressão à madeira (Pereira *et al.*, 2003).

Segundo Silva, 2010, o modo como os componentes estruturais se distribuem nas diferentes camadas que a compõem, bem como o ângulo que as microfibrilas de celulose da camada S2 apresenta (a resistência mecânica da madeira à tração está directamente relacionada com o maior ou menor ângulo das microfibrilas nesta camada da parede celular), é igualmente importante na definição dessas propriedades. Na Figura 6 é apresentado um modelo estrutural da parede celular, onde é possível ver as camadas que a constituem e o ângulo com que as microfibrilas se dispõem em cada uma dessas camadas.

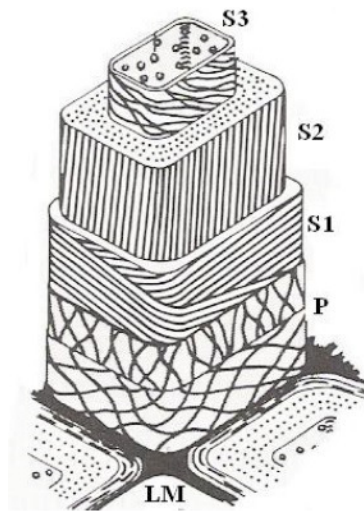


Figura 6 - Modelo estrutural da parede celular. LM – lamela média; P – parede primária; S1+S2+S3 – parede secundária (Adaptado de Fengel e Wegener, 1989)

A nível da composição química, a parede primária, conjuntamente com a lamela média, é a que apresenta maior concentração de lenhina e menor de celulose sendo, por oposição, a S2 e S3 aquelas que apresentam, no seu conjunto, maiores teores de celulose e menores de lenhina. De acordo com Fengel & Wegener, 1989, a composição química da parede dos traqueídeos da picea pode ser distribuída do seguinte modo: parede primária e lamela média – 60% lenhina, 13% celulose e 27% de hemicelulose; camada S1 - 28% lenhina, 36% celulose e 36% de hemicelulose; camadas S2 e S3 - 27% lenhina, 58% celulose e 15% de hemicelulose.

A organização e interligação dos componentes estruturais na parede celular está esquematicamente representada na Figura 7, sendo possível ver que a lenhina, ao ser o último componente incorporado na parede, envolve exteriormente os outros compostos não estabelecendo ligações directas com a celulose mas sim com as hemiceluloses (Silva, 2010).

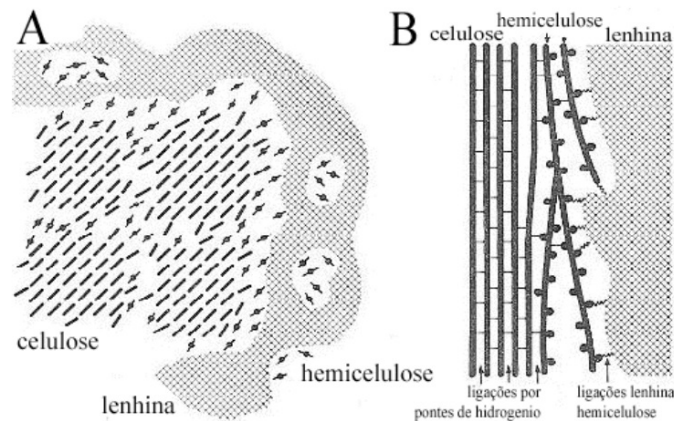


Figura 7 - Modelo estrutural representando a associação da celulose, hemicelulose e lenhina na parede celular. A - Plano transversal. B - Plano longitudinal (Adaptado de Fengel e Wegener, 1989)

A celulose, com a sua estrutura linear e arranjo nas microfibrilas, é o principal responsável pela elevada resistência axial da madeira à tracção. As hemiceluloses e a lenhina ao servirem de agregadores das moléculas de celulose dão consistência à parede celular conferindo à madeira elasticidade e resistência à compressão (Tsoumis, 1991).

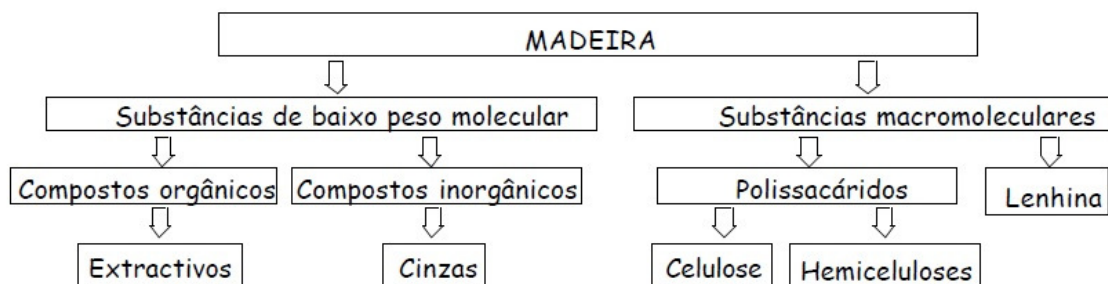


Figura 8 - Esquema genérico dos componentes químicos da madeira (Adaptado de Fengel e Wegener)

Na utilização da madeira na construção é preciso ter em consideração os comportamentos, higroscópico, anisotrópico e viscoelástico.

Segundo (Machado, 2009) o comportamento de um elemento de madeira assenta em diversas características estruturais, as quais levam a que se visualize o material a diferentes níveis:

- **Microestrutura** – escala celular;
- **Mesoestrutura** – escala do anel de crescimento e madeira limpa de defeitos;
- **Macroestrutura** – escala de madeira como material de construção.

2.2. Propriedades

2.2.1. Propriedades Físicas

As propriedades físicas da madeira podem influenciar o seu desempenho e resistência como material estrutural e, caracterizam-se por não necessitarem que se actue química ou mecanicamente na estrutura da madeira para avaliação qualitativa e quantitativa (Santos, 2007).

Factores como a composição química, fisiologia da árvore, espécie de árvore, o tipo de solo bem como a região onde as árvores estão inseridas podem influenciar as características físicas (Cachim, 2007).

Como exemplo de propriedades físicas destacam-se, a massa volúmica e densidade; propriedades térmicas; retracção/inchamento.

A **massa volúmica** da madeira, ρ_H , pode ser definida por um dado teor de água H, como o quociente entre a sua massa volúmica, m_H , e o seu volume, V_H , sendo geralmente expressa em kg/m^3 :

$$\rho_H = \frac{m_H}{V_H} \quad (1)$$

A madeira é um material que apresenta um valor de massa volúmica relativamente baixo, comparativamente com a sua resistência mecânica e módulo de elasticidade, o que a torna um material de grandes potencialidades ao nível da construção estrutural (Negrão e Faria, 2009).

Pode-se obter de forma aproximada a massa volúmica de um outro qualquer teor de água recorrendo ao Ábaco de Kollmann (Coutinho, 1999).

Os valores do Ábaco de Kollmann são aproximados visto o ábaco ter sido desenhado para valores médios do coeficiente de retracção volumétrica e do teor em água. O gráfico pode ser observado no anexo, Figura 59.

Para o cálculo das estruturas, e devido à importante relação entre a densidade e as propriedades mecânicas são definidos para a madeira valores médios e valores característicos, assim, para o cálculo das propriedades deve ser utilizado o valor característico, enquanto para o cálculo das acções deverá ser utilizado o valor médio.

Tabela 1 - Massas volúmicas de algumas madeiras existentes em Portugal (kg/m³) (Cachim, 2007)

Madeira		Intervalo de variação	Valor médio
Resinosas	Casquinha	450 – 550	500
	Pinho bravo	500 – 700	600
	Pinho manso	500 – 600	550
Folhosas	Eucalipto	700 – 850	800
	Faia	660 – 800	730

2.2.2. Propriedades Mecânicas

A constituição anatómica da madeira é importante para o estudo das propriedades mecânicas. A estrutura tubular da árvore confere-lhe a resistência necessária para resistir aos esforços de flexão como o vento e esforços de compressão devido ao seu peso próprio.

Devido à ortotropia da sua constituição, na qual se diferenciam as direcções principais, longitudinal, radial e tangencial, é necessário saber a que direcção está relacionada determinada propriedade.

Pode-se considerar diferentes propriedades mecânicas em duas direcções, a paralela e perpendicular à fibra, uma vez que as diferenças de propriedades entre a direcção radial e tangencial, apesar de significativas entre si, são muito diferentes das propriedades na direcção longitudinal (paralela às fibras). Ver Figura 60, no anexo.

As principais características da madeira no que diz respeito à sua resistência mecânica podem ser resumidamente caracterizadas pelas seguintes propriedades:

- **Elevada resistência à flexão** – Quando associada ao seu peso (a relação resistência/peso é 1,3 vezes superior à do aço e 10 vezes superior à do betão);
- **Boa capacidade de resistência à tracção e à compressão paralela** à fibra;
- **Fraca resistência ao corte** (limitação do betão mas não do aço);
- **Resistência muito fraca à tracção e à compressão perpendicular** à fibra;
- **Baixo módulo de elasticidade** (cerca de metade do betão e 20 vezes menor que o do aço) – Possibilidade de deformação de elementos comprimidos e encurvadura.

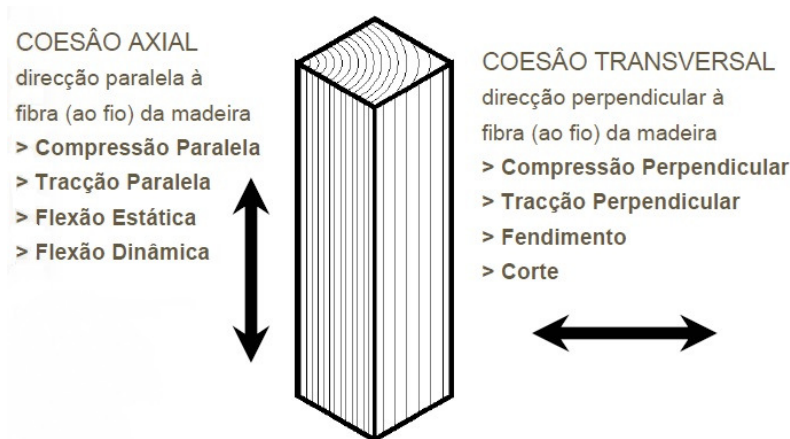


Figura 9 - Direcções para estudo mecânico (Apontamentos da Escola Superior Tecnologia Viseu)

2.2.2.1. Anisotropia e Variabilidade

Um material é anisotrópico quando as propriedades físicas e mecânicas não apresentam as mesmas características nas diversas direcções em que se pode analisar tal material (Sousa, 2012).

A anisotropia no caso da madeira é caracterizada pelas 3 direcções principais, como anteriormente referido, longitudinal, L, segundo o eixo da árvore; radial, R, segundo o eixo diametral; e tangencial, T, segundo um eixo excêntrico. As três direcções definem uma simetria cilíndrica que se encontra na maior parte das propriedades físicas e mecânicas da árvore, e que constitui uma diferença fundamental entre a madeira e os outros materiais.

A madeira apresenta também uma outra característica que a diferencia de outros materiais que é a variabilidade. De um modo genérico podem distinguir-se três fontes de variabilidade: a que ocorre entre espécies, dentro da mesma espécie e a que se surge no interior de cada árvore. A variabilidade natural entre espécies é atribuída às diferenças genéticas, enquanto a variabilidade entre árvores de uma mesma espécie pode dever-se quer à genética, quer a factores do meio ambiente, tais como: clima, solo, fornecimento de água, disponibilidade de nutrientes, exposição solar, entre outros. Por sua vez, a variabilidade que se verifica no interior de uma mesma árvore é devida essencialmente aos factores do meio ambiente que condicionam o seu crescimento específico (Madeidura, 2010).

A especificação de uma dada madeira, além do nome comercial e da origem geográfica, deve sempre ser feita incluindo a designação botânica (nome em latim) da espécie florestal. As

nomenclaturas comerciais de espécies florestais podem ser um precioso auxiliar nesta matéria e constam de diversas publicações e bases de dados (Machado, 1996).

Um outro factor que afecta bastante as propriedades da madeira no que diz respeito à variabilidade é o grau de processamento tecnológico da madeira, quanto maior for o grau de processamento tecnológico, menor será a variabilidade do produto final, existindo actualmente uma grande variedade de produtos derivados da madeira, obtidos pela desmontagem e reconstituição da madeira por colagem e prensagem, para se obter um produto com comportamento mecânico determinado.

Visto a madeira ter diferentes aplicações como material de construção, não só a madeira maciça mas como os produtos dela derivados, é necessário falar de produtos ou classes de produtos estruturais ao qual estão associadas determinadas características mecânicas, bem como um controlo de qualidade capaz de garantir essas mesmas características. Na Figura 10, podemos analisar o efeito qualitativo da utilização de produtos processados, como a madeira lamelada colada: a utilização de diversas lamelas de madeira coladas faz dispersar os defeitos na secção transversal, tendo como consequência um aumento do valor médio da resistência e uma diminuição da dispersão em torno deste valor (Cachim, 2007).

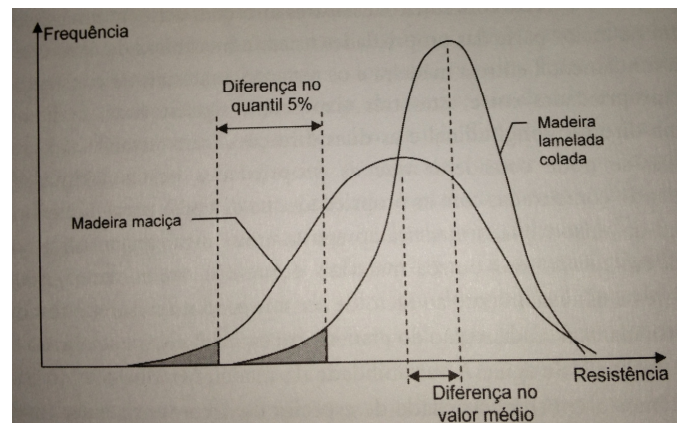


Figura 10 - Funções densidade de probabilidade para madeira sólida e lamelada colada (Cachim, 2007)

2.2.2.2. Principais factores que condicionam o comportamento da madeira

Os principais factores que influenciam o comportamento da madeira são a qualidade da madeira, as condições ambientais (humidade e temperatura), o tempo de aplicação das cargas e a dimensão do elemento estrutural (efeito de escala)

O teor de água condiciona o comportamento e propriedades da madeira. Ao aumentar o teor de água a resistência e o módulo de elasticidade da madeira diminuem, mas a dependência só se faz notar para teores de água inferiores ao ponto de saturação das fibras. Na madeira sem defeitos, para efeitos práticos, pode-se considerar a existência de uma relação linear entre cada propriedade mecânica e o teor de água para valores compreendidos entre os 8 e os 20% como mostra a Figura 11.

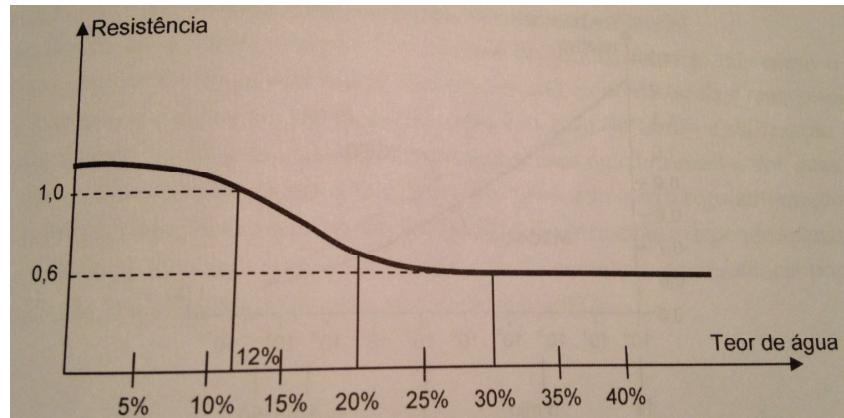


Figura 11 - Efeito do teor de água na resistência da madeira (Cachim, 2007)

A capacidade resistente da madeira é influenciada pela duração de carga devido ao seu comportamento diferido. Através de ensaios verificou-se que a resistência da madeira depende do alto grau de duração da carga a que está submetida. Para cargas permanentes obtêm-se resistências da ordem de 60% das obtidas em ensaios de curta duração (3 a 7 minutos) que são utilizados na determinação das propriedades da madeira.

Entre 1947 e 1951 a influência da duração da carga foi alvo de muitas investigações, a curva de Madison (Figura 12) foi uma das obtidas, e por volta de 1976 chegou-se à conclusão que o efeito da duração das cargas era menos acentuado, e na seguinte Figura observa-se a actual relação utilizada pela regulamentação europeia (Cachim, 2007).

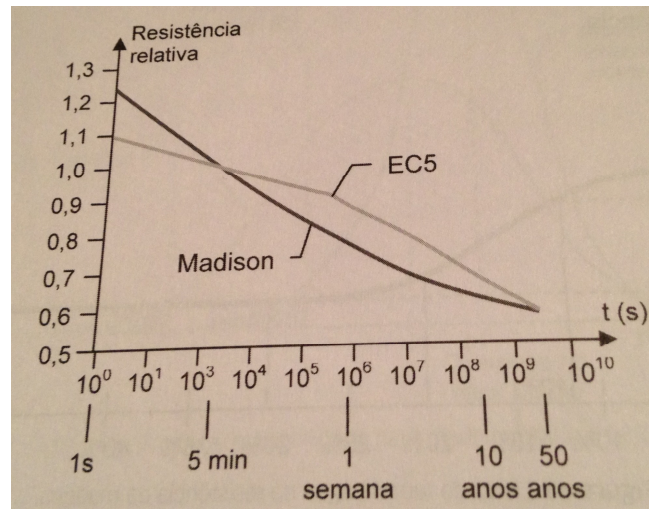


Figura 12 - Perda de resistência da madeira em função da duração de aplicação de carga (Cachim, 2007)

A influência da duração da carga depende da qualidade da madeira, sendo menor na madeira de baixa qualidade, e este efeito deve-se ao facto da madeira de baixa qualidade apresentar nós. Quando a carga é de longa duração, este efeito é atenuado devido ao comportamento viscoso que a madeira possui sob cargas de longa duração (Cachim, 2007).

O efeito de escala é definido por uma relação entre a resistência da madeira e o tamanho das peças, em que quanto maior for a peça menor é a tensão de rotura. O efeito de escala pode-se justificar com base na teoria de rotura frágil, que é fundamentalmente aplicável à tracção e ao corte em que, de acordo com esta teoria, o material é semelhante a uma cadeia em que a rotura se estabelece pelo elemento mais fraco. No caso das madeiras, esta teoria traduz-se no início da rotura em irregularidades na microestrutura em locais críticos, geralmente junto aos cantos dos elementos. Quanto maior for o elemento mais irregularidades no volume do material vão existir.

O efeito de escala é maior quando a fractura se efectua de forma frágil como é o caso da flexão e da tracção e menos pronunciado no caso de roturas mais dúcteis como é o caso da compressão (Cachim, 2007).

A justificação da correcção da resistência por altura da secção é explicada pelas seguintes observações: (ver anexo, Figura 61)

- a) Se se ensaiam à flexão duas peças de madeira da mesma qualidade e com a mesma altura h (H), mas com vãos diferentes L_1 e L_2 , verifica-se a resistência das peças de maior vão σ_1 , é inferior à de menor vão σ_2 , de acordo com:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{S_L} \quad (7)$$

- b) Se pelo contrário se ensaiam peças, com o mesmo vão L , mas com alturas diferentes h_1 (H_1) e h_2 (H_2), verifica-se que a resistência é inferior no caso da altura maior de acordo com:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{S_H} \quad (8)$$

- c) Na realidade este fenómeno é devido a um efeito de volume e não se podem separar ambos os factores (vão e altura);
d) Como geralmente as peças em flexão têm uma esbelteza da mesma ordem ($k=l/h$) é possível combinar ambas as equações:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{S_L} \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{S_H} = \left(\frac{kH_1}{kH_2}\right)^{S_L} \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{S_H} = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{S_V} \quad (9)$$

- e) A relação assim obtida é equivalente ao ensaio de peças com a mesma esbelteza pelo que a resistência se pode relacionar com altura da secção da peça.

2.2.2.3. Tracção Paralela às Fibras

Segundo Negrão e Faria, 2009, a madeira por possuir uma estrutura fibro-anatómica, demonstra uma elevada resistência à tracção paralela à fibra, e segundo Sardinha, 1988, na madeira livre de defeitos, a resistência à tracção axial pode ser até 3 vezes superior à resistência à compressão.

A tracção paralela às fibras é a característica que confere maior potencial de utilização da madeira para finalidades estruturais, desde uma grande estrutura de construção civil até aos mais pequenos objectos, desde que a resistência a esforços mecânicos seja uma exigência (Santos, 2007).

A norma europeia EN 408:2003. Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties” estabelece métodos para avaliação da resistência à tracção paralela à fibra. Os valores característicos da resistência à tracção da madeira classificada, de acordo com a norma “EN 338:2003. Structural timber. Strength classes”, oscilam entre os 8 e os 30 MPa para resinosas e entre os 18 e os 42 MPa para as folhosas. A norma europeia EN 384:1995. Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density” estabelece uma correlação entre a resistência característica à flexão, $f_{m,k}$, e à tracção paralela, $f_{t,0,k}$, dada pela equação:

$$f_{t,0,k} = 0,6f_{m,k} \quad (10)$$

Quando não se realizam ensaios directos de determinação da resistência à tracção de acordo com o método prescrito na norma, a relação tensão-extensão que se obtém num ensaio à tracção de uma peça de madeira, é praticamente linear até à rotura, observando-se uma rotura frágil no momento da rotura, como se pode observar no anexo a Figura 62. Este facto é de particular importância na obtenção da relação estabelecida entre os valores característicos da resistência da madeira à tracção e à flexão, uma vez que obriga a um cuidado especial no coeficiente de segurança para esta propriedade (Cachim, 2007).

A determinação do módulo de elasticidade em tracção paralela às fibras pode ser realizada através da norma EN 408:2003, medindo a deformação sobre um comprimento de referência na zona central do provete distando da zona das pegas de um comprimento não inferior a duas vezes a menor dimensão da secção transversal e utilizando dois extensómetros, colocados um de cada lado da peça, de forma a captar eventuais distorções durante o ensaio (Cachim, 2007).

2.2.2.4. Compressão Paralela às Fibras

A resistência da madeira, à compressão paralela à fibra é elevada, sendo no entanto, no caso da madeira livre de defeitos, inferior à da resistência à flexão.

A solicitação de compressão no sentido axial provoca a separação das fibras longitudinais, diminuindo assim a coesão do elemento estrutural, e conseqüentemente, a sua resistência global (Negrão e Faria, 2009).

Também segundo Negrão e Faria, 2009, a resistência dos elementos estruturais de madeira à compressão axial está intrinsecamente ligada: ao **teor em água** (atinge-se o valor máximo de resistência à compressão quando a madeira está sob o estado anidro, e mínimo, quando supera o PSF, ou seja, cerca de 30% de teor em água), à **massa volúmica** (quanto maior for esta grandeza, maior será o valor de resistência à compressão axial), aos **defeitos** (pouca influência nos valores obtidos para esta grandeza).

A determinação da resistência à compressão da madeira livre de defeitos pode ser avaliada de acordo com a norma NP 618:1973. Madeiras. Ensaio de compressão axial., enquanto para uso estrutural e determinação do respectivo valor característico deve ser determinada de acordo com a norma EN 480:2003. A NP 618:1973 utiliza provetes de dimensão 60x20x20 mm³, enquanto a norma europeia utiliza elementos com qualquer secção, desde que o comprimento ultrapasse seis vezes a menor dimensão da secção transversal.

A norma europeia EN 384:1995 estabelece uma correlação entre a resistência característica à flexão, $f_{m,k}$, e á compressão paralela, $f_{c,0,k}$, quando apenas são realizados ensaios de flexão para classificar a madeira, dada pela equação:

$$f_{c,0,k} = 5f_{m,k}^{0.45} \quad (11)$$

A resistência à compressão paralela à fibra da madeira, na madeira classificada, atinge valores característicos que variam entre os 16 e os 29 MPa para as resinosas e entre os 23 e os 34 MPa para as folhosas. A existência de defeitos na determinação da capacidade resistente da madeira na direcção paralela à fibra é muito menor do que no caso da tracção, o que explica que a equação de correlação conduza a valores superiores da resistência da madeira à compressão do que à tracção para valores da resistência à flexão inferiores a 50 MPa (ver Tabela 7 do anexo).

A resistência à compressão da madeira é muito importante em peças como pilares e montantes, a encurvadura é a causa da resistência à compressão da madeira livre de defeitos ser inferior à sua resistência à tracção, pois o que ocorre num ensaio de compressão, é que devido à sua estrutura anatómica, as fibras da madeira quando comprimidas, sofrem elas próprias o fenómeno da encurvadura, reduzindo assim a carga limite que a madeira poderia suportar. Em compressão simples, a madeira apresenta um comportamento linear até aproximadamente 75% da tensão de rotura. A determinação do módulo de elasticidade em compressão paralelo às fibras pode ser realizada através da norma EN408:2003, medindo a deformação sobre um comprimento de referência na zona central do provete com comprimento não inferior a quatro vezes a menor dimensão da secção transversal e utilizando dois extensómetros, colocados um de cada lado da peça, de forma a captar eventuais distorções durante o ensaio (Cachim, 2007).

2.2.2.5. Tracção Perpendicular às Fibras

A resistência da madeira à tracção perpendicular à fibra é muito baixa (da ordem dos 30 a 70 vezes menor que a tracção paralela) devido à sua estrutura fibro-anatómica. O valor característico da madeira classificada desta propriedade varia entre os 0,4 e os 0,6 MPa. A baixa resistência deve-se à disposição das fibras de celulose, preferencialmente no sentido longitudinal do tronco da árvore, sendo o número de fibras reduzido na direcção perpendicular ao eixo da árvore (raios medulares) e na consequente falta de travação transversal das fibras longitudinais (Negrão e Faria, 2009).

Na Figura 13 pode-se observar o comportamento da madeira solicitada desta forma comparando o caso da peça com o correspondente efeito a nível celular. Na prática, na aplicação a estruturas, esta solicitação é crítica apenas em peças de directriz curva tais como arcos ou vigas curvas (Cachim, 2007).

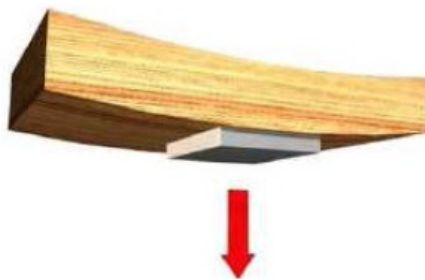


Figura 13 - Tracção perpendicular à fibra (CORMA)

Tabela 2 - Tensão de rotura à tracção perpendicular às fibras de algumas espécies de madeira (Cachim, 2007)

Espécie de madeira	Tensão de rotura à tracção perpendicular (MPa)	
Resinosas	Pinho bravo	2,7
	Pinho silvestre (Casquinha)	2,5
	Espruce	2,2
Folhosas	Eucalipto vulgar	4,5
	Carvalho português	5,0
	Faia	4,4

2.2.2.6. Compressão Perpendicular às Fibras

A resistência da madeira à compressão perpendicular à fibra é, tal como todas as propriedades transversais, muito inferior à correspondente na direcção paralela, e segundo (Santos, 2007) a compressão perpendicular tem semelhanças com o procedimento de ensaio da tracção perpendicular. Segundo Negrão e Faria, 2009, a resistência à compressão, no sentido perpendicular às fibras, pode ser traduzida pela sua resistência ao esmagamento, sendo função da massa volúmica do material.

Os valores característicos da resistência variam entre os 2,0 e os 3,2 MPa para as resinosas e entre os 8,0 e os 12,5 para as folhosas, o que representa cerca de 11% da resistência na direcção paralela à fibra para resinosas e 36% para as folhosas. A relação tensão deformação mostra um comportamento que apenas é linear numa fase inicial, e que a rotura se atinge por plastificação sem se chegar a observar uma rotura clara.

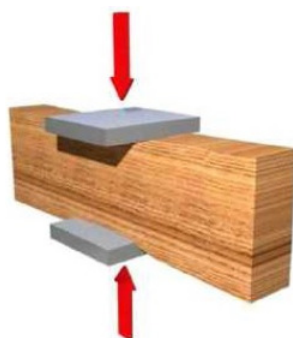


Figura 14 - Compressão perpendicular à fibra (CORMA)

A Figura 14 ilustra o comportamento da madeira solicitada desta forma comparando o caso da peça com o correspondente efeito a nível celular. Este tipo de esforço ocorre sobretudo nas

zonas de apoio das vigas, onde se concentra toda a carga em pequenas superfícies que devem ser capazes de transmitir a reacção de apoio sem sofrer deformações importantes e plastificação (Cachim, 2007).

2.2.2.7. Flexão

A resistência à flexão é uma das características mais exigentes para materiais estruturais, pois as aplicações estruturais em que está presente são as mais diversas como acontece em coberturas de edifícios, em suportes de pisos, em pontes, entre muitas mais, sempre que se tem de vencer a força da gravidade e se dispor de uma área livre debaixo de apoios pontuais. O paradoxo com que se depara a flexão nas suas mais variadas aplicações, é a relação entre as cargas a suportar e o peso próprio do material estrutural, pois os componentes em serviço têm de se suportar a si próprios mais a cargas aplicadas (Santos, 2007).

Esta importância é visível nas normas de classificação de madeira para estruturas através da atribuição das classes de resistência da madeira em função da sua resistência à flexão, sendo as restantes propriedades de resistência paralela ao fio (tracção, compressão e corte) determinadas a partir da resistência à flexão. Quando comparada com outros materiais estruturais, a madeira apresenta uma elevada resistência à flexão, sobretudo quando comparada com a sua densidade (Cachim, 2007).

A resistência à flexão é avaliada por meio de ensaios com três ou quatro pontos de carga, em primas rectangulares, em que as cargas vão gradualmente crescendo até se atingir a rotura do provete. Apesar dos esforços de flexão provocarem fundamentalmente tensões de tracção e compressão paralelas ao fio nas secções das peças, a resistência à flexão não pode ser directamente determinada a partir de tensões de rotura à tracção e à compressão sendo por isso mais conveniente falar-se de uma **resistência à flexão**, quando nos referimos ao material madeira, uma vez que, o comportamento mecânico da madeira em tracção e compressão é diferente. Como a resistência da madeira à compressão é aproximadamente 2 a 2,5 vezes inferior à resistência à tracção quando se ensaia um provete de madeira até à rotura, o limite de resistência em compressão é atingido antes de se atingir a resistência à tracção. Como consequência, as fibras da face superior começam a plastificar, ver a Figura 15, e o eixo neutro vai-se progressivamente deslocando para baixo, em direcção às fibras mais traccionadas. A rotura acaba por ocorrer por tracção com estilhaçamento das fibras quando se atinge a tensão de rotura à tracção das fibras inferiores (Cachim, 2007).

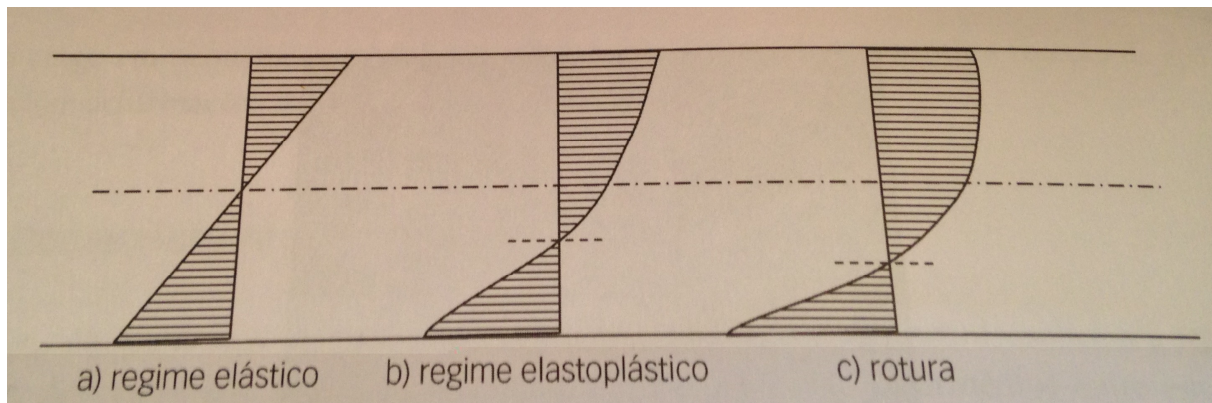


Figura 15 - Diagramas de distribuição de tensões em peças de madeira flectidas (Cachim, 2007)

A determinação da resistência à flexão é realizada sobre provetes prismáticos em que, para se obter um comportamento linear da secção transversal o comprimento é bastante superior à dimensão da secção transversal. A determinação da resistência à flexão da madeira pode ser determinada pela norma NP 619:1973. Madeiras. Ensaio de flexão estática, utilizando o dispositivo de ensaio apresentado na Figura 16, que pretende avaliar a resistência à rotura da madeira livre de defeitos. Para considerar o efeito não linear do comportamento da madeira, a norma utiliza para o cálculo da tensão de rotura a expressão:

$$\sigma_{m,H} = 1.5 \frac{Fl}{bh^{5/3}} \quad (13)$$

onde:

F – carga aplicada a meio vão

l - vão

b – largura

h- altura da secção transversal

Os valores da resistência calculados para um teor de água da madeira de H %, podem ser convertidos para o teor de água de referência de 12% através da expressão:

$$\sigma_{m,12} = \sigma_{m,H} = (1 + K_m(H - 12)) \quad (14)$$

Onde K_m é um parâmetro que pode ser determinado experimentalmente realizando ensaios de flexão a diversos teores de água, mas que simplifadamente pode ser considerado igual a

0,04. Para além da resistência à rotura, é igualmente importante avaliar a deformação na rotura de forma a perceber se a rotura é mais dúctil ou frágil. A norma NP 619:1973 estabelece para este efeito o cálculo da denominada **cota de rigidez** que se obtém dividindo o vão pela flecha na rotura. Este valor é constante para qualquer secção transversal de uma dada espécie arbórea se se mantiver constante a relação L/h do ensaio, sendo uma madeira tanto mais rígida quanto maior for esta grandeza. Na Tabela 3 apresentam-se valores correntes da tensão de rotura em flexão estática e da cota de rigidez para algumas espécies de madeira nacional (Cachim, 2007).

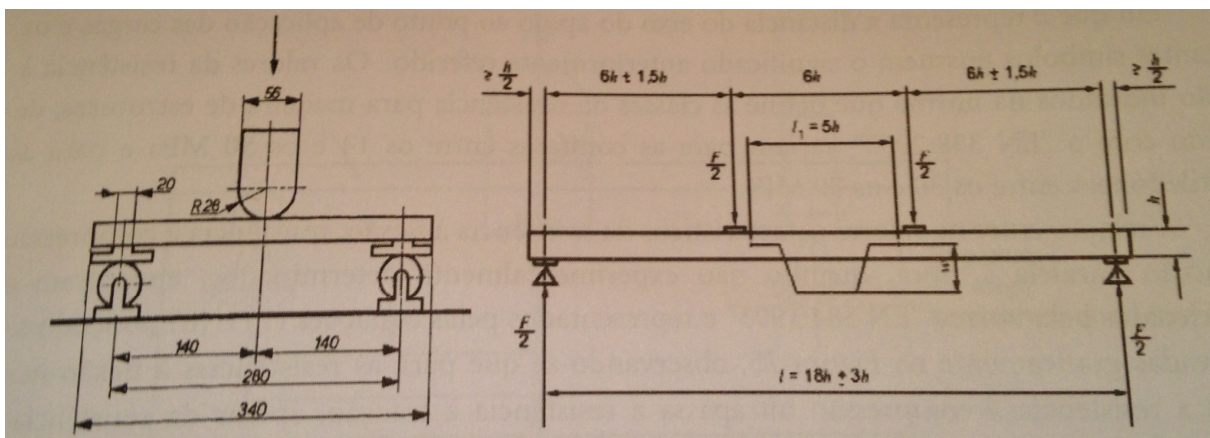


Figura 16 - Dispositivos para determinação da resistência à flexão

(NP 619:1973 à esquerda e da EN 408:2003 à direita)

Tabela 3 - Tensão de rotura à flexão de algumas espécies de madeira (Cachim, 2007)

Espécie de madeira	Tensão de rotura à flexão (MPa)	Cota de rigidez (NP 619:1973)
Resinosas	Pinho bravo	2.1
	Pinho silvestre (Casquinha)	3.3
	Espruce	3.2
Folhosas	Eucalipto vulgar	2.3
	Carvalho português	2.0
	Faia	3.0

No caso de pretender determinar a resistência da madeira à flexão para elementos estruturais, torna-se necessário ensaiar peças de madeira de maior dimensão deixando por isso as madeiras de ser livres de defeitos. A norma europeia, EN 408:2003 mostra o dispositivo de ensaio apresentado na Figura 16, que tem a particularidade de obrigar a que o vão da peça a

ensaiar seja pelo menos igual a 15 vezes a altura da peça (preferencialmente cerca de 18 vezes) de forma a eliminar o efeito das deformações por corte e assegurar um comportamento mais próximo da teoria das peças lineares. A resistência à flexão pode ser obtida a partir de:

$$f_m = 3 \frac{aF}{bh^2}, \quad (15)$$

em que a representa a distância do eixo do apoio ao ponto de aplicação das cargas e os restantes símbolos possuem o significado anteriormente referido. Os valores da resistência à flexão indicados na norma que define as classes de resistência para a madeira de estruturas, de acordo com EN 338:2003 variam para as resinosas entre os 14 e os 50 MPa e para as folhosas entre os 30 e os 70 MPa.

A relação entre os valores característicos da resistência à flexão, resistência à compressão e tracção paralela à fibra, quando não experimentalmente determinados, encontram-se estabelecidos pela norma “EN 384:1995”, ver Figura 63 do anexo, observa-se que para as resistências à flexão mais baixas a resistência à compressão ultrapassa a resistência à tracção, apesar da resistência à tracção da madeira livre de defeitos ser superior à resistência à compressão, devido à maior influência dos defeitos da madeira na resistência à tracção (Cachim, 2007).

Pode-se observar no anexo, as Figuras 64 e 65, sobre a flexão.

2.2.2.8. Corte

O corte é o que resulta da acção de uma força numa direcção perpendicular à direcção das fibras. Geometricamente é possível que o plano de corte seja paralelo ou perpendicular às fibras. No primeiro caso temos forças na direcção perpendicular mas num plano de corte paralelo às fibras, Figura 17 (a) é o esforço designado como “rolling shear” (na bibliografia em língua inglesa). É uma característica mecânica que, embora não seja responsável por grande risco e responsável por ocorrências de fracturas, é possível de acontecer. Relativamente à outra hipótese de forças na direcção perpendicular e um plano de corte também perpendicular, Figura 17 (b), teremos uma situação em que nunca acontece rotura, porque se atingem outros limites de resistência, nomeadamente a compressão perpendicular, muito antes da cedência por corte. Em todo o caso é possível avaliar estas características,

tirando partido de provetes de ensaio adaptados em que é reduzida a área da superfície ao corte, de modo a não se atingirem as tensões limites devidas a outros esforços (Santos, 2007).

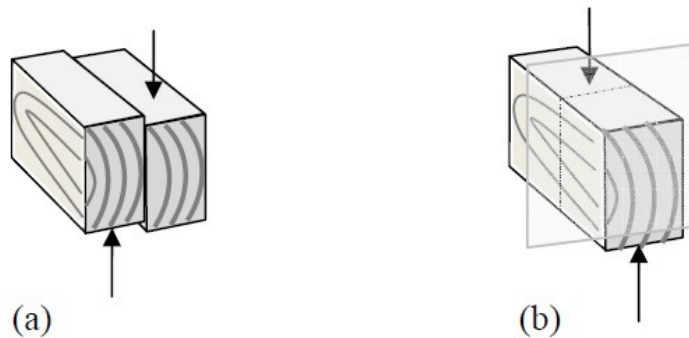


Figura 17 - Corte. (a) – Paralelo às fibras;(b) – Perpendicular às fibras (Santos, 2007)

Nas peças submetidas à flexão e ao corte, que constitui a quase totalidade das peças flectidas, as tensões que intervêm são simultaneamente de corte no plano perpendicular em relação ao plano das fibras (Figura 18), (e ver anexo, Figura 66) acontecendo que pelo princípio da reciprocidade das tensões tangenciais, o valor destas duas tensões é igual. Como consequência, a rotura dá-se pelo plano mais fraco que é o deslizamento das fibras, sendo por isso este o valor que é apresentado para a resistência da madeira ao corte nas normas de classificação de madeira (Cachim, 2007).

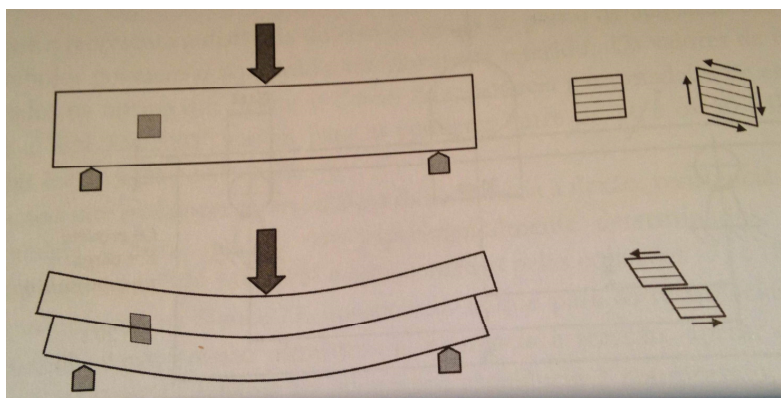


Figura 18 - Tensões de corte em vigas flectidas (Cachim, 2007)

Segundo Cachim, 2007 os valores característicos da resistência ao corte (por deslizamento) da madeira classificada variam entre os 1,7 e os 3,8 MPa para as resinosas e entre os 3,0 e os 6,0 MPa para as folhosas. As tensões de corte por deslizamento perpendicular às fibras apenas existem em casos muito especiais como o caso das uniões coladas entre a alma e o banzo de uma viga com secção em duplo T, sendo este valor cerca de 20 a 30% da resistência por

deslizamento. A correlação entre a resistência característica à flexão, $f_{m,k}$, e ao corte, $f_{v,h}$, estabelecida na norma EN 384:1995:

$$f_{v,k} = 0.2f_{m,k}^{0.8} \quad (16)$$

A determinação da resistência ao corte da madeira livre de defeitos pode ser determinada pela norma NP 623:1973. Madeira. Ensaio de corte., cujo dispositivo de ensaio se encontra ilustrado na Figura 67, no anexo. A tensão de corte, supondo a madeira com teor de água H, pode ser obtida dividindo a força pela área de corte:

$$\tau_{v,H} = \frac{F}{ab} \quad (17)$$

Para elementos estruturais, a determinação da resistência ao corte da madeira pode ser realizada através da norma EN 408:2003, utilizando o dispositivo de ensaio e esquema de provetes indicados na Figura 19, em que a resistência ao corte é obtida a partir de:

$$f_v = \frac{F \cos(14^\circ)}{lb} \quad (18)$$

onde:

- F - força aplicada;
- l - altura do provete;
- b – largura do provete.

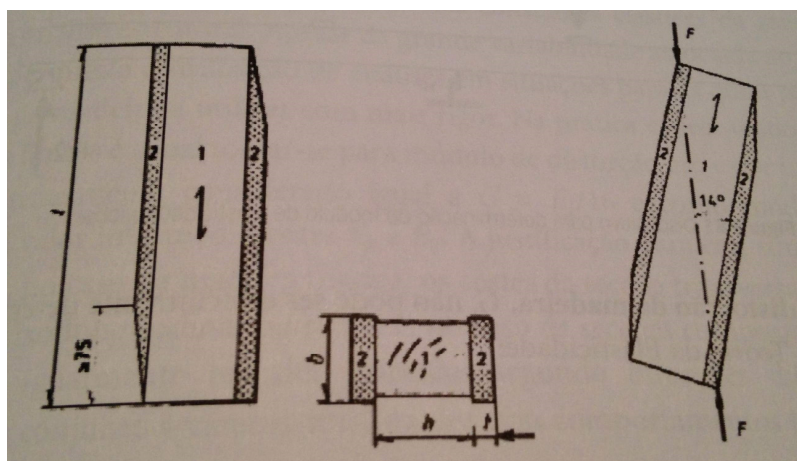


Figura 19 - Dispositivo para determinação da resistência ao corte (Cachim, 2007)

2.2.2.9. Fadiga

A resistência à fadiga ou a cargas alternadas, define-se como a capacidade que um elemento estrutural tem em se deformar sem atingir a rotura, quando sujeito a esforços alternados de compressão e tração (Negrão e Faria, 2009).

Segundo Carvalho, 1996, existem um conjunto de considerações, baseadas em dados experimentais e são os seguintes:

- O quociente entre a resistência à fadiga e a resistência à flexão estática é, em média, da ordem de um terço;
- A cota de fadiga (quociente entre a resistência à fadiga e a massa volúmica) da madeira é da ordem de 6 a 7, enquanto para o alumínio é de 5 e de 2 a 3, para alguns aços especiais;
- O teor em água tem grande influência no valor da resistência à fadiga, sendo que para cada diminuição de 1% do seu valor, se verifica uma redução de cerca de 3 a 4% do valor da resistência à fadiga.

2.2.2.10. Fluência

A fluência, resistência a cargas de longa duração, corresponde à deformação ou perda de resistência de um elemento estrutural, quando sujeito a cargas superiores ao limite de elasticidade do material com algum grau de permanência. Nestas condições, a madeira passa a deformar-se em regime plástico, atingindo a rotura para valores de tensão mais baixos do que os indicados pelos ensaios de carga de curta duração (Negrão e Faria, 2009).

Capuz Lladro, 2003, aponta que as resistências obtidas nestas condições são da ordem dos 60% das obtidas em ensaios de curta duração (5 minutos).

O teor em água da madeira tem grande influência na fluência das peças, sendo que para madeiras com maiores teores em água ou sujeitas a ciclos de humedificação/secagem frequentes, o valor da fluência é bastante superior.

Assim, a prevenção ou diminuição do impacto da fluência na resistência global de elementos estruturais de madeira pode ser garantida, se forem tomadas uma série de medidas previamente à sua aplicação:

- Garantir que o elemento estrutural não está sujeito a grandes variações térmicas e higrométricas;

- Montar os elementos estruturais devidamente estabilizados, em termos de teores em água;
- Sobrestimar as cargas actuantes sobre a estrutura ou subestimar o valor do módulo de elasticidade, para efeitos de dimensionamento, de forma a impedir que o elemento estrutural entre em regime plástico;
- Recorrer a contra-flechas.

2.2.2.11. Módulo de Elasticidade e Distorção

Entende-se como elasticidade de um modo lato, a propriedade que os materiais apresentam, em maior ou menor grau, de se deformarem dentro de certos limites, por efeito de uma acção exterior de flexão e recuperarem a sua forma ou dimensões iniciais quando essa acção exterior cessa. Todos os materiais estruturais, e muito particularmente a madeira, apresentam um certo grau de elasticidade, característica muito vantajosa no que diz respeito ao seu comportamento em serviço, uma vez que, se aproveitada neste sentido, permite uma redistribuição de cargas por todos os elementos de um conjunto estrutural e além disso a própria deformação pode ser um bom indicador do estado de esforço de um componente ou de toda a estrutura (Santos, 2007).

O **módulo de elasticidade** da madeira é diferente em tracção e em compressão, na prática apenas se utiliza um valor único para o módulo de elasticidade na direcção **paralela à fibra** (que resulta da adopção de um valor intermédio entre o de tracção e o de compressão). O seu valor varia entre os 7 e 16 GPa para as resinosas e entre os 10 e 20 GPa para as folhosas na madeira classificada. Na direcção **perpendicular à fibra** adopta-se um único módulo de elasticidade, cujo valor é 30 vezes inferior ao da direcção paralela para as resinosas, variando entre os 0,23 e 0,53 GPa e 15 vezes inferior para as folhosas, variando entre os 0,64 e 1,33 GPa, para a madeira classificada.

A determinação do módulo de elasticidade para elementos de madeira pode ser efectuada utilizando os procedimentos descritos na norma EN 408:2003, sendo apresentados métodos para determinação do módulo de elasticidade em flexão, local e global, módulo de elasticidade em tracção, paralela e perpendicular ao vão, e em compressão, paralela e perpendicular ao vão. Para a determinação do **módulo de elasticidade local** em flexão,

utiliza-se um dispositivo de ensaio, medindo as flechas, Δw , para valores da carga, ΔF , compreendidos entre 0,1 e 0,4 da carga de rotura:

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2 \Delta F}{16I \Delta w} \quad (19)$$

O **módulo de elasticidade global** em flexão pode ser determinado utilizando um dispositivo semelhante ao apresentado na Figura 20, obtendo o valor de $E_{m,g}$ a partir da expressão:

$$E_{m,g} = \frac{l^3 \Delta F}{12I \Delta w} \left(\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right) \quad (20)$$

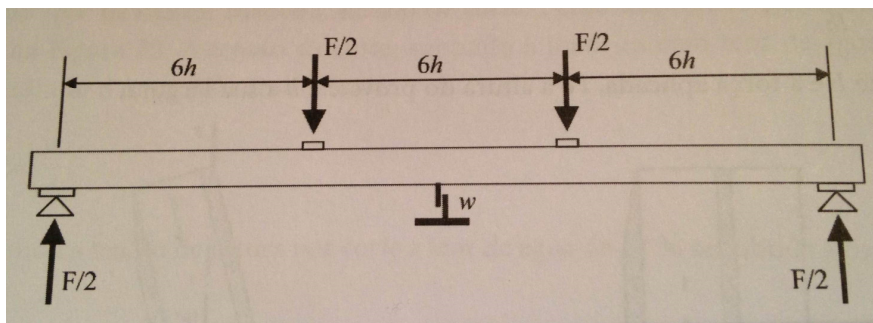


Figura 20 - Dispositivo para determinação do módulo de elasticidade global (Cachim, 2007)

O **módulo de distorção** da madeira, G , não pode ser directamente determinado a partir da clássica relação da Teoria da Elasticidade:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (21)$$

Atendendo à enorme anisotropia da madeira, sendo antes obtido recorrendo a ensaios laboratoriais ou de forma simplificada recorrendo à relação apresentada na “EN 384:1996”:

$$G = \frac{E}{16} \quad (22)$$

A norma “EN 408:2003” apresenta dois métodos para determinação do módulo de distorção de peças de madeira:

- Método do vão constante;
- Método do vão variável.

Em qualquer um dos casos recorre-se ao dispositivo de ensaio apresentado na Figura 16 (lado direito) e ensaiando diversas vigas (método do vão constante) mantendo o vão e variando a altura, ou, (método do vão variável) mantendo a altura e variando o vão, para os métodos do vão constante e do vão variável respectivamente.

O valor do módulo de distorção pode ser obtido a partir de:

$$G = \frac{k_G h^2}{l_1^2 \left(\frac{1}{E_{m,app}} - \frac{1}{E_{m,l}} \right)}, E_{m,app} \frac{l_1^3 \Delta F}{48 I \Delta w} \quad (23)$$

A lei de Hooke generalizada que relaciona as tensões e as extensões, pode, relativamente aos três eixos L, longitudinal, R, radial e T, tangencial, exprimir-se através da seguinte relação:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{LR} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_L & -\nu_{RL}/E_R & -\nu_{TL}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LR}/E_L & 1/E_R & -\nu_{TR}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LT}/E_L & -\nu_{RT}/E_R & 1/E_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{RT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{TL} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{TL} \\ \tau_{LR} \end{Bmatrix}$$

Figura 21 - Lei de Hooke generalizada (Cachim, 2007)

Na Tabela 4 ilustram-se os valores das constantes elásticas da madeira usualmente utilizados em análise estrutural. Apesar da grande variabilidade associada ao material madeira, estes valores permitem a realização de análises em situações para as quais não se conhecem as propriedades da madeira a utilizar com mais rigor. Na prática e efectuando uma análise plana por elementos finitos é usual tomar-se para módulo de distorção um valor intermédio entre G_{TL} e G_{LR} que é usualmente considerado igual a $G = E_l/16$ e como módulo de elasticidade transversal um valor intermédio entre E_R e E_T . A justificação para esta simplificação prende-se com o facto de, no caso da madeira maciça, os cortes da secção transversal do tronco poderem ser segundo o eixo longitudinal ou radial e, no caso de secções compostas por várias lâminas, estas poderem igualmente ter sido cortadas segundo direcções diferentes, pelo que o comportamento conjunto será uma mistura dos dois comportamentos transversais (Cachim, 2007).

Tabela 4 - Valores das constantes elásticas da madeira usualmente utilizadas (Cachim, 2007)

	E_L/E_R	E_L/E_T	E_R/E_T	ν_{RT}	ν_{LT}	ν_{LR}	ν_{TR}	ν_{RL}	ν_{TL}	E_L/G_{TL}	G_{TL}/G_{LR}	G_{TL}/G_{RT}
Resinosas	13.0	21.0	1.6	0.51	0.43	0.39	0.31	0.03	0.02	17.25	0.86	8.9
Folhosas	8.0	13.5	1.7	0.67	0.46	0.39	0.38	0.048	0.033	15.2	0.77	2.6

2.2.3. Propriedades Químicas

A composição química da madeira, não é definida com exactidão uma vez que ela varia com as diferentes partes da árvore (raízes, tronco, ramos e casca), com o tipo de lenho (normal ou de reacção) ou com as condições ambientais de crescimento (localização geográfica, clima, tipo de solo, etc.) (Pettersen, 1984).

Segundo Negrão e Faria, 2009, a celulose ($C_6H_{10}O_5$), é um polímero tridimensional, na forma de largas cadeias unidas por pontes de hidrogénio e ligações químicas do tipo Van der Waals. A celulose com a sua estrutura linear e arranjo nas microfibrilas, é o principal responsável pela elevada resistência axial da madeira à tracção. As hemiceluloses e a lenhina ao servirem de agregadores das moléculas de celulose dão consistência à parede celular conferindo à madeira elasticidade e resistência à compressão (Tsoumis, 1991). Também Hildebrandt (1960 citado por Zobel e Van Buijtenen, 1989) refere que quanto maior for o teor de lenhina presente na madeira, maior será a sua resistência ao esmagamento, tornando-se, no entanto, mais quebradiça. Por outro lado, a resistência à tracção, à ruptura e ao choque diminui com o aumento do teor de lenhina. O mesmo autor afirma que a produção de lenhina é favorecida pelos climas quentes, razão pela qual as madeiras tropicais são mais ricas em lenhina.

2.3. Higroscopicidade e Teor em Água

2.3.1. Higroscopicidade

A madeira é caracteristicamente higroscópica, ou seja, tende permanentemente a equilibrar o seu teor de humidade com o espaço higrométrico e com temperatura do ambiente em que se encontra (Esteves, 2009).

Segundo Negrão e Faria, 2009, a higroscopicidade é um parâmetro que caracteriza a capacidade de determinado material para fixar água por adsorção e de a restituir ao ambiente em que se encontra, em função das variações de temperatura e de pressão parcial de vapor de água do ambiente que o envolve.

A higroscopicidade da madeira, uma das suas principais propriedades responsável pelas variações dimensionais que a madeira sofre durante o seu uso, tem origem na sua composição química, mais propriamente nos grupos hidroxilo livres existentes nas moléculas de celulose. De facto, é através destes grupos funcionais que as moléculas de água estabelecem ligações com a madeira, permitindo trocas de humidade com o meio ambiente e obrigando a madeira a aumentar ou diminuir de dimensões conforme ganha ou perde humidade. Também a presença de componentes hidrófilos como as pectinas e as hemiceluloses contribuem para o aumento da higroscopicidade da madeira (Silva, 2010).

A lenhina, por seu lado, ao ser o componente da madeira menos hidrófilo e ao ocupar os espaços vazios que poderiam ser ocupados pelas moléculas de água, contribui para a estabilidade dimensional da madeira. As paredes celulares com baixos teores de lenhina sofrem retracções mais intensas do que as mais lenhificadas (Wardrop, 1957).

Cruz e Negrão e Faria, 2009, afirmam que a madeira assim que é abatida, contém ainda uma grande quantidade de água, que se encontra sob diversas formas tais como: água de constituição, água de impregnação (ou embebição) e água livre.

A água de **constituição** está associada à substância lenhosa por poderosas forças de sorção química, e só pode ser removida quando a estrutura molecular da madeira for destruída.

A água de **impregnação** ou de **embebição** preenche os espaços entre os constituintes da parede celular, mediante forças de atracção intermolecular ou infiltrada por capilaridade. A sua saída provoca aproximação das fibras e das micelas, provocando a retracção da madeira, fazendo assim aumentar a sua resistência e rigidez.

A água **livre** preenche os espaços vazios da estrutura alveolar da madeira, não possuindo qualquer ligação com a substância lenhosa. O seu movimento no interior da madeira não ocasiona variação do volume da madeira nem alterações da resistência mecânica.

Ciclos de perda e aumento de humidade, com consequentes retracções e aumentos de volume são responsáveis por tensões internas no material, associadas a gradientes de humidade entre a superfície e o interior dos elementos, resultando na abertura progressiva de fendas de secagem e eventualmente no desenvolvimento de distorções diversas (Nunes, 2001).

2.3.2. Teor de Água

O teor de água ou humidade da madeira, H , define-se como o valor percentual do peso de água da amostra em relação ao peso seco desta (após secagem em estufa a 103 °C):

$$H = 100 \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (24)$$

onde: m_h – massa do provete húmida e m_s – massa do provete seco.

A determinação do teor de água da madeira pode ser realizada pela norma portuguesa “NP 614:1973 Madeiras. Determinação do teor de água”, fornecendo também a norma europeia EN 13183 diversos métodos para a determinação do teor de água: secagem em estufa (EN 13183-1:2002), resistividade eléctrica (EN 13183-2:2002) e capacitância (EN 13183-3:2005). O teor de água padrão, para o qual são determinadas as propriedades da madeira foi convencionalmente definido como sendo $H=12\%$. A madeira recém cortada, denominada por madeira verde, contém geralmente teores de água superiores a 100% que se reduzem a cerca de 16 a 18% quando seca ao ar. Ver Tabela 8, no anexo (Cachim, 2007).

Partindo do estado verde, a madeira quando exposta ao ar vai gradualmente perdendo água praticamente sem qualquer variação dimensional numa fase inicial. Nesta fase a água que vai sendo expulsa é a água livre. A perda da água livre ocorre de forma relativamente rápida em secções de pequena dimensão, mesmo quando expostas à chuva, contudo, em secções de grande dimensão, a perda de água livre pode durar vários anos. A partir do momento em que toda a água livre foi expulsa da madeira, a restante água encontra-se quimicamente ligada,

sendo por isso necessária uma maior quantidade de energia para proceder à sua libertação (Cachim, 2007).

A saída da água de impregnação, pelo contrário, implica a contracção das paredes celulares, iniciando-se assim o fenómeno de retracção. A este estado de transição corresponde um teor em água que se situa para a maioria das espécies florestais entre 25 e 30%, sendo designado por ponto de saturação das fibras, *PSF* (M9 LNEC, 1997; Carvalho, 1996).

É também considerado o ponto abaixo do qual as propriedades físicas e mecânicas começam a alterar-se em função do teor de humidade (Wood Handbook).

O *PSF* é de extrema importância uma vez que abaixo deste valor do teor de água há alterações significativas na maioria das propriedades físicas e mecânicas da madeira ao contrário do que acontece acima deste valor em que as propriedades se mantêm praticamente constantes. Verifica-se assim que acima do *PSF* as trocas de água se traduzem apenas na variação do teor de água enquanto abaixo do *PSF* as trocas de água originam retracção ou dilatação da madeira, e consequentes distorções e empenamentos, para além da variação do teor de água (Cachim, 2007).

O teor de água abaixo do *PSF* é função da humidade relativa e da temperatura do ambiente. A secagem das paredes das células lenhosas progride até que se estabeleça um equilíbrio do teor de água entre a peça de madeira e as condições ambientais em que se encontra. (Apontamentos - Humidade Equilíbrio Madeira - Escola Superior de Tecnologia de Viseu) No anexo, Figura 68 podemos observar o ábaco das curvas de humidade de equilíbrio da madeira.

2.3.3. Retracção e Dilatação

A **retracção** é a propriedade que resulta do facto de uma peça de madeira variar as suas dimensões quando o teor em água se modifica. Designa-se por retracção a diminuição de dimensões, quando o teor em água diminui e por inchamento, ou entumescimento, o aumento de dimensões quando o teor em água aumenta.

A norma NP 615: 1963. Madeiras. Determinação da retracção. Permite determinar a retracção da madeira. Denomina-se **retracção volumétrica** de um provete de madeira, ϵ_v , ao quociente, expresso em percentagem, da variação de volume de um provete devido á diminuição de humidade, pelo volume correspondente ao valor do menor teor em água. Quando a retracção

volumétrica corresponde à variação volumétrica desde a saturação até ao estado anidro denomina-se **retracção volumétrica total**:

$$\varepsilon_v = 100 \frac{V_s - V_0}{V_0} \quad (25)$$

onde:

V_s – Volume da madeira à humidade de saturação das fibras ($H \approx 30\%$);

V_0 – Volume de madeira no estado anidro (seca em estufa a $103\text{ }^\circ\text{C}$ até peso constante correspondendo a $H = 0\%$).

A madeira, predominante e anisotrópica e heterogénea, não apresenta valores de retracção segundo as três direcções principais, axial ou longitudinal, tangencial e radial ver a seguinte Figura 22. (Coutinho, 1999)

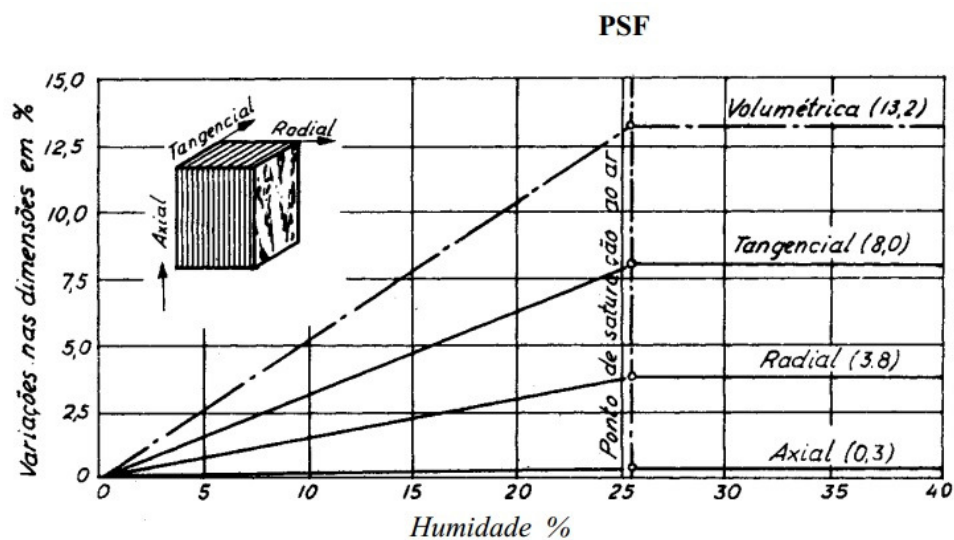


Figura 22 – Exemplo de Curvas de retracção (Coutinho, 1999)

Dentro de uma dada espécie caracterizam-se parâmetros ligados à retracção, como sejam, a retracção na direcção tangencial às camadas de crescimento (que apresentam os valores mais elevados), a retracção na direcção radial (retracções de 1/3 a metade das anteriores), e finalmente a retracção na direcção das fibras, ou axial (apresentando valores muito pouco significativos) (Santos, 2007).

Outras relações importantes são os coeficientes de retracção, linear (em cada uma das diferentes direcções) e volumétrico, e ainda a razão entre a retracção tangencial e a radial que dá uma primeira indicação quanto à tendência da madeira para empenar (Santos, 2007).

A anisotropia da madeira no que se refere à retracção e ao inchamento, é também diferente entre a direcção tangencial e radial, sendo os movimentos na direcção tangencial cerca do dobro dos movimentos na direcção radial (Figura 23), sendo que, do ponto de vista da engenharia, esta diferença não é significativa face à enorme diferença, cerca de 20 vezes superior, existente entre a retracção transversal e a retracção longitudinal.

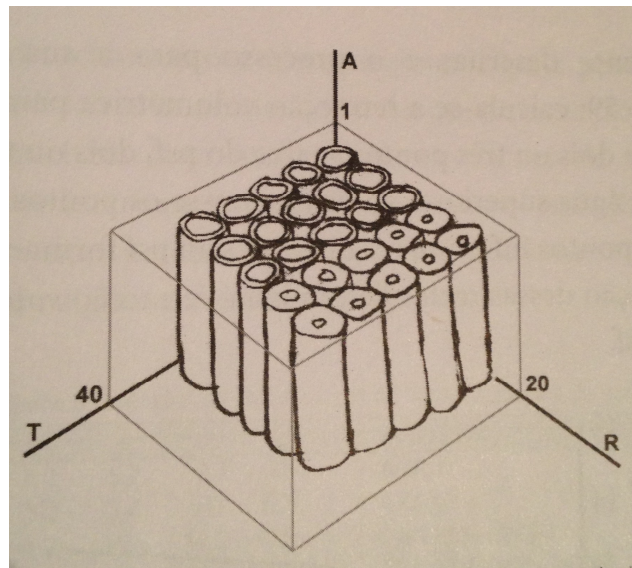


Figura 23 - Retracção e inchamento segundo as direcções principais (Cachim, 2007)

Uma ideia mais ajustada do comportamento da madeira é obtida com o denominado **coeficiente de retracção volumétrico**, α_v , que corresponde ao quociente entre a retracção volumétrica e o teor de água inicial, H, inferior a S, e que pode ser interpretado como a variação de volume da madeira quando existe uma variação do teor de água de 1%:

$$\alpha_v = 100 \frac{V_H - V_0}{HV_0} \quad (26)$$

onde:

V_H – Volume da madeira correspondente ao teor de água H.

Quanto menor for α_v menos sensível é a madeira à variação de humidade, temos também que o valor de α_v é praticamente constante para teores de humidade inferiores ao ponto de saturação das fibras para cada espécie. O valor do teor de água correspondente ao PSF, S_v , pode ser obtido a partir de:

$$S_v = \frac{\varepsilon_v}{\alpha_v} \quad (27)$$

Na Figura 69 do anexo pode-se observar o processo de determinação da retracção, anterior descrito, calcula-se a retracção volumétrica para diversos valores de teor de água, preferencialmente dois ou três pontos abaixo do PSF, dois ou três na zona do PSF e mais dois ou três para teores de água superiores ao PSF; unem-se os pontos de forma a obter a curva representada na Figura 69 do anexo; os pontos inferiores e superiores ao PSF formam aproximadamente duas rectas; o ponto de intersecção dessas rectas determina a retracção volumétrica total e o teor de água correspondente ao PSF.

O coeficiente de retracção volumétrico pode ser estimado por: $\alpha_v \approx$ densidade.

A retracção e o inchamento podem originar alguns problemas nas construções de madeira se não forem devidamente acautelados. Assim, a retracção origina folgas nas ligações que podem ser incompatíveis com as normais condições de utilização. A dilatação, se restringida, produz tensões internas. A relaxação do material pode depois resultar na ocorrência de folgas, quando este voltar a retrair. Na Tabela 9 do anexo ilustram-se valores da retracção e do coeficiente de retracção de algumas folhosas e resinosas (Cachim, 2007).

2.3.4. Distorções

A diferença entre a retracção tangencial e radial é o principal factor de empenamento da madeira durante processos de humedificação e de secagem. O quociente entre os dois coeficientes de retracção dá uma medida da anisotropia da madeira. Na tabela 5 pode-se observar a classificação da anisotropia. Quanto menor for a anisotropia da madeira, isto é a relação entre a retracção radial e tangencial é a tendência para a deformabilidade transversal das peças (Cachim, 2007).

Tabela 5 - Classificação da anisotropia da madeira (Cachim, 2007)

Anisotropia baixa	Anisotropia média	Anisotropia alta
$\frac{C_T}{C_R} < 1.5$	$1.5 \leq \frac{C_T}{C_R} \leq 2.0$	$\frac{C_T}{C_R} > 2.0$

Existem dois tipos básicos de secagem o natural e o artificial, quanto à origem e efeitos.

A **secagem natural** (ao ar livre) permite secagem da madeira sobrepondo as peças umas sobre as outras de modo a permitir um arejamento uniforme. Este processo é demorado, exige grandes espaços e imobiliza grandes quantidades de madeira. A secagem natural permite secar a madeira até uma humidade mínima de 12%. Abaixo dos 20% de humidade a madeira resiste à putrefacção. Abaixo dos 30% podem começar a surgir os defeitos de secagem: rachaduras, empenamentos, encruamentos, colapsos, abaulamentos, torções (Portal da Madeira).

A **secagem artificial** é feita através de estufas próprias, permite aumentar a velocidade da secagem da madeira ao mesmo tempo que a protege dos fungos e insectos. Exige instalações caras, torna a madeira menos flexível e escurece o seu tom. Na secagem artificial podem ser utilizadas diversas técnicas destinadas a acelerar o processo de secagem ou a conferir características específicas ao produto. Entre essas técnicas conta-se a utilização de vapor a alta pressão, a utilização de permutadores de calor, a retirada de seiva por imersão em água e o uso de vapor de creosote (líquido extraído de alcatrão de madeira por destilação) e de outros produtos para impregnar a madeira (Portal da Madeira).

Considera-se a madeira "comercialmente seca" logo que o seu teor de água atinja os 20%.

Pelo processo de secagem ao ar o teor de água pode descer até cerca de 18 a 14%, dependendo das condições ambientais. Para utilizações que requerem teores de água baixos, por exemplo (8 a 12%), é geralmente necessário proceder a uma secagem artificial (Portal da Madeira).

A heterogeneidade da taxa de retracção transversal gera distorções na secagem, Figura 24. As tensões produzidas pela retracção anisotrópica podem produzir fissuras radiais, tanto maiores quanto maior a secção e mais rápida a secagem. A madeira deve ser seca até um valor de teor de água próximo do valor de equilíbrio previsto para as suas condições de utilização.

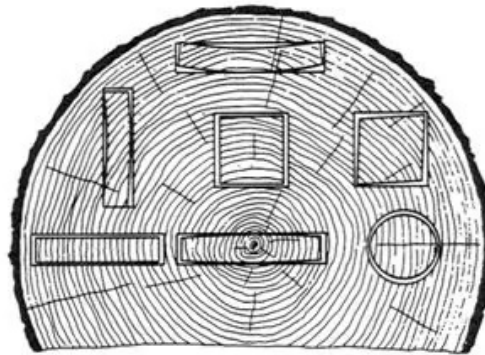


Figura 24 - Distorções na secagem conforme a localização do corte no tronco (Portal da Madeira)

As distorções ocorridas no processo de secagem traduzem-se não apenas na alteração da forma da secção transversal mas também no empeno das peças de madeira serrada (Figura 25).

Conforme o tipo de empeno, este pode ser classificado em:

- Arco de face;
- Arco de canto;
- Hélice;
- Meia cana.

Os empenos em arco são geralmente devidos a anomalias estruturais do lenho, como por exemplo o lenho de tracção ou lenho juvenil, que originam taxas de retracção longitudinal da mesma ordem de grandeza das retracções transversais.

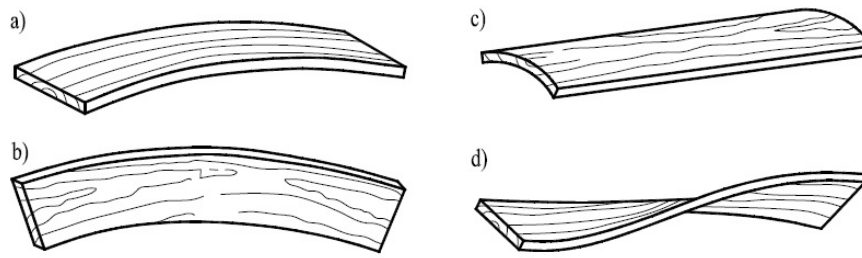


Figura 25 - Tipos de empenos – a) Arco de face; b) Arco de canto; c) Meia cana e d) Hélice (Handbook1-Timber Structures)

Os empenos podem provocar essencialmente uma inadequação para colocação em obra e não a perda de resistência resultante dos efeitos geométricos representados. O armazenamento de madeira seca deve ser feito de forma a dificultar as variações de teor de água, limitando assim empenos que possam ocorrer durante o processo de secagem (Cachim, 2007).

3. PATOLOGIAS

3.1. Acção dos Agentes Atmosféricos

Os agentes atmosféricos, implicam a degradação de estruturas, em ambiente interior ou exterior, mediante o seu grau de exposição, e estes podem ser: variações de temperatura, radiação solar, acção do vento e presença de água (humidade relativa, humidade de precipitação e do gelo/degelo).

Em ambiente interiores, a deterioração devida à acção de agentes atmosféricos encontra-se geralmente associada a ciclos de secagem/humidificação (correspondente a ciclos de temperatura e humidade relativas do ar), que se traduzem no desenvolvimento de fendas e de empenos. No caso das fendas, pode, dependendo da dimensão do elemento e da dimensão das fendas, acarretar uma diminuição não desprezável da resistência mecânica dos elementos ou afectar de forma significativa a capacidade resistente de ligações estruturais, caso ocorram na zona de influência destas ligações (Machado, 2009).

Em ambientes exteriores abrigados, a deterioração é normalmente observada pelo escurecimento dos elementos, intensificando numa primeira fase a sua cor característica e evoluindo subsequentemente para uma tonalidade cinzenta. Igualmente se observa uma fissuração da superfície da madeira. Ambos os acontecimentos são também observados na madeira lamelada colada. O fenómeno de alteração de cor decorre da acção dos raios ultravioletas, provocando uma fotodegradação dos constituintes da parede celular das fibras, nomeadamente da lenhina, sendo a sua acção tanto mais intensa e rápida consoante a exposição directa ou não dos elementos de madeira à radiação solar. A degradação causada pelos raios ultravioletas é muito lenta, levando à alteração da camada exterior dos elementos estruturais, com consequências que são sobretudo estéticas. Esta acção química é acelerada por um fenómeno de degradação física visível pela fendilhação acentuada dos elementos, devida aos ciclos de secagem/humidificação mais drásticos que num ambiente interior.

Em ambientes exteriores não abrigados, os elementos de madeira ou MLC são expostos à acção directa da chuva. A camada superficial, deteriorada pela acção da radiação solar e de ciclos de secagem/humidificação, encontra-se agora sujeita à acção da chuva que num processo de lixiviação e de remoção dessa mesma camada expõe o material lenhoso da camada subjacente, ainda sã, aos agentes atmosféricos reiniciando-se o processo. Esta

remoção pode ainda ser acelerada pela acção mecânica de erosão imposta pelo vento (Machado, 2009).

Os elementos de madeira empregues em ambiente marinho, mas fora do contacto com a água, podem apresentar uma deterioração mecânica devida à absorção de sais pela madeira.

Estes sais, uma vez difundidos na parede celular, vão cristalizar quando a madeira seca e em consequência aumentar de volume provocando a separação das fibras. A degradação devido a este mecanismo é lenta, sendo por isso desprezável do ponto de vista de deterioração da capacidade resistente dos elementos de madeira, sendo a sua importância do ponto de vista estético (Machado, 2009).

Embora os agentes atmosféricos, só por isso, conduzam a uma deterioração mecânica incipiente, podem favorecer uma degradação biológica, devida ao desenvolvimento de fungos de podridão, esta sim, já não é desprezável. O aumento da rugosidade da superfície da madeira facilita a deposição de poeiras e a retenção de água, a fissuração facilita a difusão de água para o interior dos elementos podendo levar a condições propícias ao desenvolvimento de podridão ou em certas circunstâncias (espécie de madeira, tipo de ligador, presença de sais metálicos), levar a situações graves de corrosão dos ligadores, levando a uma perda significativa da capacidade resistente da estrutura (Machado, 2009).

A deterioração devida a agentes atmosféricos pode ser minimizada pela aplicação de produtos de revestimento, como tintas, vernizes ou velaturas capazes de reflectir ou absorver a radiação ultravioleta, além de terem uma acção hidrófuga (Machado, 2009).

3.2. Acção dos Agentes Biológicos

A degradação biológica é uma das maiores causas de anomalias nas estruturas de madeira, provocada pela acção dos seres vivos, os fungos e insectos (térmitas e, carunchos).

Os **fungos de podridão** têm uma estrutura constituída por células filamentosas que se desenvolvem e penetram na madeira com um teor de água superior a 20-22%, mas não saturada, destruindo assim parte ou todos os constituintes por acção enzimática, dando origem a podridões (Cachim, 2007; Machado, 2009). Por norma os fungos atacam estruturas interiores que estão em contacto com humidades ocasionais ou frequentes, ou quando em

contacto com o solo. Nas resinosas a podridão é de cor acastanhada, e nas folhosas aparece uma podridão fibrosa branca, mas ambas podem apresentar a chamada podridão mole (Mc Gill, 2002).

Os fungos, que provocam podridão castanha, degradam a celulose e hemiceluloses das paredes celulares, deixando a lenhina praticamente intacta em forma de uma armação castanha e quimicamente alterada (Deacon, 2005; Oses *et al.*, 2006).

Para além da humidade a temperatura também favorece o desenvolvimento dos fungos, quando esta varia entre 18 e 26 °C.

Das espécies mais frequentes em Portugal destacam-se a *Coniophora puteana* Karst., *Gloeophyllum trabeum*, *Lentinus lepideus* Fr. e *Poria placenta*, Spp.



Figura 26 - *Corpos frutíferos de Gloeophyllum trabeum* à esquerda e *Lentinus lepideus* Fr. à direita

Em geral, é suficiente a adopção de medidas de carácter construtivo que permitam a eliminação da humidade da madeira para que o ataque cesse, no entanto o processo de secagem da madeira é lento o que pode originar a continuação do ataque por um período de tempo ainda considerável com a consequente degradação da madeira. Quando não é possível ter a madeira seca, poder-se-á aplicar produtos que permitam a limpeza da madeira (Cachim, 2007).

Os **carunchos** são insectos com ciclo larvar completo, na fase larvar provocam a destruição da madeira onde vivem e da qual se alimentam, escavando galerias, atacam geralmente a madeira seca, e suportam elevados níveis de humidade e temperatura. O insecto na forma adulta completa o ciclo saindo da madeira abrindo orifícios visíveis na sua superfície.

É preciso ter em conta as zonas de ligação e nos locais fechados ou pouco frequentados, como o exemplo dos desvãos de coberturas (Cachim, 2007).

O teor em água é um dos factores que podem condicionar a existência de determinadas espécies de insectos, isto é, existem espécies que atacam madeiras com teores em água inferiores, outras atacam madeiras teores em água mais elevados e, em certos casos, existem espécies que atacam perante qualquer teor em água. Os insectos dependem muito da temperatura, pois estes não conseguem controlar a temperatura do seu corpo (Arriaga *et al.*, 2002).

Hylotrupes bajulus L. – Caruncho Grande – É conhecido pelos enormes estragos e ruído que produzem ao roer a madeira. E segundo, Sánchez, 2001 e Cachim, 2007, por atacar madeira resinosa. Os adultos são de cor negra ou acastanhada com 1 a 3 cm de comprimento, as larvas são de cor branca e podem atingir os 36 mm. Os ataques efectuam-se sobretudo sobre o borne das resinosas sendo frequente as peças já estarem infectadas quando são colocadas em obra. A detecção visual do ataque pode fazer-se pela observação dos orifícios de saída, pelo aparecimento de montículos de serrim farináceo e ainda por enrugamento da superfície das peças. A madeira, de resinosas, utilizada na construção deve ser tratada com insecticidas líquidos de impregnação profunda com o objectivo de destruir as larvas já existentes no seu interior e também para prevenir futuras infestações (Cachim, 2007).



Figura 27 - Caruncho Grande

Anobium punctatum (De Geer) – Caruncho Pequeno – É conhecido por danificar mobiliário de resinosas e folhosas.

São de cor castanho escura com 3 a 5 mm de comprimento, (Sánchez, 2001), e as larvas de cor branca marfim têm comprimentos variáveis podendo atingir os 5 mm. Este insecto ataca indistintamente o borne das folhosas e resinosas não sendo necessário que se trate de madeiras antigas pelo que mesmo as madeiras recentemente cortadas e postas em obra podem ser

atacadas. Por vezes o ataque cessa ao fim de alguns anos, possivelmente pela falta de disponibilidade alimentar. A detecção do ataque pode fazer-se através dos orifícios circulares em média com 1 a 2/3 mm de diâmetro presentes na superfície e pelos montículos de serrim formados por pequenos grânulos elipsoidais acumulados junto destes (Sánchez, 2001; Cachim, 2007).

Para prevenir estes ataques, utiliza-se um tratamento por fumigação em câmara de expurgo antes da introdução na habitação de todas as peças de mobiliário, pelo emprego exclusivo de madeiras impregnadas e pela realização anual de uma cuidadosa inspecção visual do mobiliário, pavimento e estruturas de madeira (Cachim, 2007).



Figura 28 - Caruncho pequeno nas várias formas

Lyctus brunneus Steph – Ataca exclusivamente certas madeiras folhosas ricas em amido, (Ridout, 2000; Cachim, 2007), e segundo, Sánchez, 2001, as madeiras atacadas apresentam teores em água inferiores a 18 %.

De cor castanho avermelhada ou castanho escura com 3 a 7 mm de comprimento, as larvas são de cor branca e chegam a atingir os 6mm de comprimento. Estes insectos tanto atacam madeira colocada em obra como sobre fustes recém abatidos, a parte do lanho atacada é o borne e a zona de transição entre o borne e o cerne. Os orifícios que vulgarmente aparecem no cerne não correspondem a um ataque efectuado a esta madeira mas apenas à passagem dos adultos para o exterior. A superfície explodida é uma forma de identificação da degradação por *Lyctus brunneus*, (Ridout, 2000) e também após a emergência dos primeiros adultos

através da existência de inúmeros orifícios muito pequenos e de contorno circular (Cachim, 2007).



Figura 29 - *Lyctus brunneus* Steph

As **térmitas** são insectos que vivem em colónias, e escavam longas galerias na madeira, da qual se alimentam, desenvolvendo-se mais facilmente em condições de elevada humidade do ar e da madeira. Em Portugal é possível encontrarem-se térmitas em todos os distritos do continente, bem como nas Ilhas da Madeira e Açores. As espécies mais usuais são a *Reticulitermes lucifugus* (da família *Rhinotermitidae*), a *Cryptotermes brevis* (Walker) (da família *Kalotermitidae*), e a *Kalotermes flavicollis* (da família *Kalotermitidae*) (Nobre *et al.*, 2001; Martins, 2009; Henriques 2011).

Segundo Henriques, 2011, a espécie que ocorre com mais frequência em Portugal continental é a espécie *Reticulitermes grasseil*, ou térmita subterrânea, que só degrada a madeira com um teor em água superior a 20%. Esta é caracterizada por ter cor branca e medir cerca de 1 a 4 mm de comprimento, desloca-se em filas e sempre a coberto da luz, à qual é muito sensível, abrindo para o efeito galerias no solo e na madeira (Cachim, 2007).

Estas térmitas encontram-se largamente difundidas por todo o território, sendo susceptíveis ao seu ataque, embora com graus diferentes, todas as madeiras nacionais usadas na construção, em especial o pinho (Nunes & Nobre, 2001; Cruz & Nunes, 2005; Nobre *et al.*, 2006).

Contudo, as madeiras africanas, sobretudo do cerne, apresentam grande resistência ao ataque, não sendo este de reocar em madeiras colocadas em obra. A sua detecção é complicada visto não existir sinais exteriores. Num estado adiantado, os insectos constroem tubos ao longo das paredes ou pendentos das vigas através dos quais se deslocam ao abrigo da luz e cuja detecção é suficiente para a identificação da infestação.

Os danos provocados pelas térmitas são bastante severos, podendo levar os elementos de madeira ao colapso. Na maior parte das vezes os danos não são visíveis, até se tornarem identificáveis por situações mais gravosas, como grandes perdas de secção (originando perda de capacidade resistente) (Martins, 2009).

Perante uma peça destruída, a identificação faz-se pelo aspecto laminado da madeira resultante da destruição das camadas (anéis) de Primavera sem que tenham sido praticamente lesadas as de Outono. Como medida protectora pode interpor-se materiais não perfuráveis entre a madeira e o solo, obrigando as térmitas ao acesso pelo contorno exterior (Cachim, 2007).



Figura 30 - Térmitas - *Reticulitermes lucifugus* Rossi

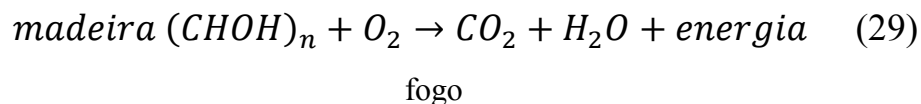
A deterioração devido a estes agentes pode também ser minimizada pela aplicação de produtos químicos, formando uma película protectora à volta da peça de madeira.

As peças de madeira utilizadas no fabrico de madeira lamelada colada têm este tratamento, fazendo com que este tipo de agente biológico seja pouco relevante para a deterioração destas estruturas, no entanto devido a outros factores como o exemplo da má manutenção da estrutura de madeira lamelada colada, podem surgir, com especial ênfase, os fungos.

3.3. Acção do Fogo

O fogo ao contrário dos outros agentes, destrói a madeira em algumas horas, uma vez que a madeira é constituída por carbono e hidrogénio, o que faz dela um bom combustível.

A degradação pelo fogo pode ser expressa através da seguinte equação:



A degradação pelo fogo necessita de oxigénio e liberta dióxido de carbono, e contrariamente à degradação por microorganismos, a energia gerada não é utilizada no crescimento do microorganismo mas sim libertada sob a forma de vapor de água a temperatura muito elevada. O fogo, tal como os outros agentes de degradação, é agente regulador ecológico florestal, pelo que, quando demasiada matéria orgânica se acumula, a degradação por fungos pode ser muito lenta sendo então os incêndios que fazem o seu papel.

A combustibilidade da madeira faz com que não exista uma percepção adequada do quanto as estruturas de madeira possuem bom comportamento ao fogo, e que este se deve à forma como se desenvolve o seu processo de combustão, existindo vários exemplos documentados de estruturas que resistiram a grandes incêndios, e no qual muitas delas foram reparadas/reutilizadas. Contudo, só as peças de grandes secções transversais, pelo menos superiores a 80 mm, exibem um bom comportamento ao fogo. Quando a madeira é submetida à acção do fogo, a sua superfície incendeia-se e arde rapidamente, fazendo com que a madeira ardida ganhe uma camada de carvão que isola a madeira maciça no interior protegendo-a da acção das chamas, ficando assim o seu interior com praticamente todas as propriedades intactas e conseqüentemente uma reserva de resistência considerável (Cachim, 2007).

Ver no anexo, Figura 70 esquema de secção ardida.

Relativamente à construção, o problema é posto de outra maneira, em primeiro lugar é preciso salvaguardar as vidas humanas e quando possível os bens e instalações. A verificação da segurança das estruturas pressupõe que a construção resista durante um determinado tempo à acção do fogo, sendo posteriormente necessário verificar a resistência dos elementos estruturais sob a acção do fogo, introduzindo protecções ou tratamentos ignífugos caso necessário.

Se uma estrutura de madeira lamelada colada, for exposta à acção do fogo, esta vai entrar em combustão, e este processo vai evoluindo a uma velocidade constante. A penetração é lenta, visto a camada carbonizada formada não só isola como também reduz o fluxo de ar para a zona queimada. Qualquer parte metálica, parafusos ou outros, vão provocar o alastramento rápido do fogo. As juntas coladas, por outro lado, são mais resistentes ao fogo que a própria madeira e em muitos dos casos não sofrem qualquer dano na parte da estrutura.

Mesmo que uma estrutura em madeira lamelada colada seja exposta a uma longa acção do fogo a sua temperatura nunca vai exceder os 100°C. A dilatação térmica é pequena quando em comparação com o aço, no qual a dilatação térmica longitudinal pode provocar danos secundários, por exemplo, nos apoios ou alvenarias (Carling, 2001).

3.4. Delaminação

O fenómeno de delaminação da madeira lamelada colada ocorre devido à acção dos agentes atmosféricos e/ou processo de fabrico deficiente.

Em primeira análise, verifica-se que a acção dos agentes atmosféricos, tais como a exposição solar, a chuva e a incidência de raios ultravioleta, contribuem para um desgaste da protecção da madeira lamelada colada, dando assim início ao processo de delaminação da madeira lamelada colada.

O processo de delaminação em si deve-se ao fabrico deficiente, que se pode dar por uso de colas inadequadas ao tipo de madeira, tratamento preservador incorrecto, secagem irregular da madeira, ou insuficiente pressão de aperto das lamelas, ver no anexo a Figura 71, delaminação de uma viga de MLC.

Segundo Gaspar, Cruz, Nunes e Gomes, 2005, a densidade é uma das propriedades da madeira que afecta a colagem.

A resistência das ligações coladas cresce com a densidade da madeira até um limite de 0,7 a 0,8 kg/m³, acima do qual a resistência da ligação decresce Vick (1999).

O aumento da densidade, e conseqüentemente da resistência ao corte da madeira, determina o aumento da resistência da ligação colada enquanto a rotura ocorrer pela madeira.

Para valores muito mais elevados de densidade, tem-se uma penetração de cola mais reduzida e uma resistência da madeira cada vez mais elevada, fazendo com que a rotura passe a ocorrer pela cola, passando o acréscimo de densidade a ter um efeito negativo. Para além disso, os extractivos existentes frequentemente em espécies de grande densidade podem afectar a penetração e a cura das colas (Gaspar, Cruz, Nunes e Gomes, 2005).

As variações dimensionais da madeira, ocorridas durante e após a cura da cola, podem contribuir para a deterioração das ligações coladas em presença de variações de humidade, por introduzirem tensões elevadas na junta colada. Por essa razão, coeficientes de retracção elevados serão uma potencial desvantagem (Gaspar, Cruz, Nunes e Gomes, 2005).

Alguns autores abordaram a questão do tratamento em profundidade de estruturas lameladas coladas (Tascioglu et al, 2003), sendo reconhecida a influência negativa em algumas propriedades do material, afectando nomeadamente a resistência à delaminação com o aumento de retenção da maior parte dos produtos ensaiados e em particular com os do tipo cobre-crómio e arsénio, vulgarmente designados por CCA (Sellers e Miller, 1997).

A madeira lamelada-colada pode ser tratada antes ou depois da colagem, dependendo de factores como a espécie de madeira, o tratamento especificado e o tamanho das peças a tratar permitido pelas autoclaves (Gaspar, Cruz, Nunes e Gomes, 2005).

O tratamento de madeira lamelada-colada depois da colagem garante protecção adequada quando realizada depois das operações de acabamento, tais como, furação e corte, para obtenção da peça final e evita a formação de desperdícios de madeira tratada (Tascioglu et al, 2003). No entanto, obriga à sujeição da madeira lamelada-colada às pressões necessárias para o tratamento e principalmente ao produto químico que se for de base aquosa implica um aumento de teor em água de madeira passível de ser causa de empenos e alterações dimensionais durante a secagem (AITC, 1998). Outra desvantagem que pode ser referida para o tratamento após colagem é o bloqueio da penetração do produto preservador pelas linhas de colagem. Quando as lamelas são tratadas antes da colagem permitem produzir membros de praticamente qualquer dimensão e forma; tal madeira lamelada-colada pode ser trabalhada e furada sem expor material não tratado (Gaspar, Cruz, Nunes e Gomes, 2005).

É preciso ser considerada a questão da compatibilidade entre a cola e o produto preservador e da influência do tratamento no comportamento mecânico da estrutura. As condições que conduzem a ligações duráveis e resistentes na madeira não tratada nem sempre se aplicam à madeira tratada; em geral, a colagem de madeira tratada requer temperatura superior ou mais tempo de cura do que a madeira não tratada (Gaspar, Cruz, Nunes e Gomes, 2005).

No processo de pressão de aperto das lamelas a colagem de madeira de elevada densidade e/ou tratada obriga a um maior cuidado na preparação das superfícies e porventura à aplicação de maiores tempos e pressões de aperto (Gaspar, Cruz, Nunes e Gomes, 2005).

4. CONSERVAÇÃO, PROTECÇÃO E MONITORIZAÇÃO

Entende-se por conservação o conjunto de técnicas e práticas utilizadas para fazer penetrar no lenho os produtos preservadores de forma a permitir uma penetração e fixação convenientes.

Segundo o ICOMOS, 2003, a conservação requer normalmente uma abordagem multidisciplinar, envolvendo uma variedade de profissionais e organizações.

Qualquer planeamento para a conservação estrutural requer tanto dados qualitativos, baseados na observação directa das degradações dos materiais e dos danos estruturais, pesquisa histórica etc., como também dados quantitativos baseados em ensaios específicos e modelos matemáticos do tipo dos utilizados na engenharia moderna (ICOMOS, 2003).

Segundo Córias, 2009, “monitorizar” quer dizer “observar de forma sistemática, com o fim de obter informação. Amostrar ou ensaiar de uma forma regular e continuada”. Através da integração no tempo de sucessivas medições de indicadores criteriosamente seleccionados (abertura de fissuras, desaprumos, desníveis, etc.), é possível determinar padrões que podem ser importantes para o controlo ou a compreensão do comportamento de uma construção.

4.1. Métodos de Conservação / Protecção

A preservação da madeira pode ser realizada pelos mais diversos processos, a ser aplicados quando a madeira não é durável, face à classe de risco a que está submetida. Existem os **processos físicos** a aplicar na madeira infestada (arrefecimento, aquecimento, electrificação, projecção de micro-ondas ou de raios gama) e o controlo de teor em água na madeira sã. Existem também **processos biológicos ou bioquímicos**, como a introdução na madeira infestada, de espécies inimigas, parasitas ou microorganismos, bem como o uso de feromonas, respectivamente. Por outro lado, existem os **processos químicos**, que incluem os fumigantes, os produtos absorvedores de oxigénio, a modificação química e os preservadores líquidos, em pó ou em pasta (Henriques, 2011).

Refere o Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004), na óptica da aplicação da madeira em estruturas de construção nova, que “*a madeira e produtos de madeira devem possuir durabilidade natural (...) ou ter um tratamento preservador de acordo com a EN 351-1 e a EN 460*”. As espécies naturalmente duráveis encontram-se sobretudo nas regiões tropicais. Nenhuma das espécies europeias é considerada como durável pela norma NP EN 350-2:2008. Para proteger

estas madeiras em ambientes variados, é necessário recorrer a tratamento químico (Edlund & Nilsson, 1998).

Os produtos biocidas preservadores de madeira, apresentam algumas exigências funcionais, tais como: elevada toxicidade aos organismos xilófagos, baixa toxicidade ao homem e ao ambiente (durante a aplicação, na madeira em serviço, ou como resíduo), poder de penetração e de permanência no interior da madeira, não alteração das características da madeira nem de outros materiais que com ela contactem, inodoro, de baixo custo e de fácil aquisição (Barnes, 2007).

Difícilmente existirá um produto que reúna todas estas características, mas por outro lado, nem todas serão necessárias face à situação de serviço do elemento a tratar (EN 335-1,2:2006), tipo de madeira e natureza do tratamento. Por essa razão, existem diversos tipos de produtos com diferentes campos de actuação (Henriques, 2011).

Hoje em dia, os métodos tradicionais de preservação de madeira estão a ser substituídos por métodos mais recentes, por diversas razões sendo uma delas a questão ambiental.

Quer os produtos clássicos quer os de desenvolvimento recente actuam por intermédio de diversos princípios activos, uns fungicidas e outros insecticidas (Ibach, 1999), os quais, em função do veículo condutor, representam os três grandes grupos: **aquosos, de solvente orgânico e oleosos**. Cada um destes grupos de produtos tem um diferente nível de eficácia, consoante as diferentes condições de exposição. Alguns ingredientes activos podem estar presentes em todos os grupos de preservadores.

Existem um conjunto de técnicas para aplicação destes métodos que visam forçar o produto a penetrar no interior da madeira, bem como diversos métodos com diferentes graus de eficácia, sendo a selecção feita em função da espécie a tratar, do valor de retenção necessário em função da classe de risco, do facto de se tratar de aplicação industrial ou doméstica, de se pretender aplicar tratamento preventivo ou curativo, entre outros factores (Nunes e Sousa, 1995).

A madeira a fornecer para uma obra é, em geral, tratada por processos de pressão industrial, que garantem uma impregnação profunda e adequados níveis de retenção (Henriques, 2011).

Quando a madeira entra em serviço, o factor mais importante na sua conservação é a actuação preventiva. Tem que se estimar os riscos a que a madeira vai estar exposta, e a definição da espécie mais adequada, no que diz respeito à sua durabilidade natural, para o fim em vista.

Deve-se adoptar um conjunto de medidas de protecção, que coloque a madeira ao abrigo das infecções ou infestações previsíveis, sendo essencialmente de dois tipos:

- As que reduzem ou eliminam as probabilidades de ataque, por colocarem a madeira em condições naturais que impedem a instalação e o desenvolvimento dos agentes biológicos, particularmente importante no caso de fungos de podridão ou térmitas, em que o teor de água da madeira é o factor fundamental;
- As que se opõem, pelo emprego de produtos químicos, a que se desenvolva a infestação ou infecção prováveis, quer tratando a madeira e/ou as alvenarias e solo circundante, quer actuando a um nível mais específico para a espécie praga, como utilização de armadilhas para o controlo de térmitas.

A madeira pode ser seleccionada de forma correcta para o ambiente final previsto, de acordo com a sequência dos seguintes passos, (NP EN 335-1,1994):

- Considerar o desempenho requerido para o elemento de madeira;
- Determinar a classe de risco para a situação na qual o elemento de madeira será usado e para os agentes biológicos que o ameaçam, (NP 335-2,1994; EN 335-3,1995);
- Avaliar se a durabilidade natural da madeira a utilizar é suficiente ou se é requerido um tratamento preservador, (EN 350-1, 1994; EN 350-2,1994; NP EN 460,1995);
- Seleccionar, para o elemento, espécies de madeira mais duráveis, ou escolher uma outra solução (concepção ou disposições construtivas) ou uma protecção por preservação;
- Se for requerido um tratamento preservador, escolher um tratamento adequado tendo em conta os agentes biológicos contra os quais é necessária protecção, (EN 351-1,1995; EN 351-2,1995; EN 599-1,1996; EN 599-2,1995).

Quando não é possível prever, com suficiente segurança, a classe de risco de um elemento em serviço, ou quando se estima que as diferentes zonas de um mesmo elemento estão em situações de risco diferentes, as decisões devem ser tomadas com base na classe de risco mais severa entre as classes aplicáveis (Cruz, 2004).

Quando ocorrem situações de degradação, é preciso reabilitar as estruturas tendo em vista por um lado sustar a progressão da degradação dos materiais ou estruturas, e por outro ou

melhorar o seu desempenho, ou seja as suas características de durabilidade, de resistência e funcionalidade (Cruz, 2004).

Segundo Machado, 2007, a durabilidade de elementos e estruturas de madeira pode ser afectada por uma série de factores, os quais podem ser reunidos em três grupos de eventos que são:

- Deficiências ao nível do projecto ou da execução, incluindo a utilização de materiais desadequados face à utilização prevista;
- Deficiências devidas a um inexistente ou deficiente plano de manutenção;
- Ocorrência de acções extremas (fogo, sismo, explosões, etc.).

4.2. Monitorização, Inspeção e Plano de Ensaios

A monitorização tem, normalmente, em vista a segurança ou durabilidade da construção; pode, no entanto, ser feito com o fim de diagnosticar anomalias que o comportamento dessa construção possa apresentar, como o exemplo da monitorização de fendas ou fissuras, com a finalidade de determinar se são activas ou passivas, isto é, se a sua largura varia ou não ao longo do tempo e se, variando, o faz ciclicamente, com correspondência com variações termohigrométricas, ou se apresenta qualquer tendência, por exemplo, para um progressivo agravamento. A monitorização é feita através de instrumentação da construção, a sua recolha pode ser feita pelo método simples, com visitas periódicas ao local, ou recolha automática, executados remotamente, por exemplo, com recurso à Internet (Cóias, 2009).

Segundo Cóias, 2009, os sistemas de monitorização automática tornam possível:

- O acompanhamento e avaliação da integridade estrutural das construções sob todas as condições, com base na medição de parâmetros estruturais como acções, extensões, frequências naturais, modos de vibração, etc., e a disponibilização de meios para a rápida visualização da informação crítica;
- Identificar a deterioração, possível localização, deformações excessivas e zonas danificadas, disponibilizando meios para a visualização da informação;
- Fornecer uma base racional para as decisões operacionais quanto à segurança, inspeção e manutenção das construções, melhorando, deste modo, as suas condições de utilização.

A monitorização pode ser útil antes, durante ou depois de uma intervenção de reabilitação ou de conservação de uma construção, onde se pode acompanhar as sucessivas etapas da intervenção (exame preliminar até ao acompanhamento do desempenho da construção intervencionada) (Cóias, 2009). Segundo Cruz, 2007, as estruturas devem ser avaliadas antes da sua entrada em funcionamento e novamente antes do fim do período de garantia da construção, devendo depois disso ser avaliadas periodicamente, por pessoas com conhecimentos sobre o material, formação adequada e reconhecida competência nesta matéria. O estabelecimento de um plano de monitorização deve, no entanto, atender às características específicas da estrutura. O tipo e a localização das medições, tal como o âmbito e a periodicidade das inspecções devem ter em conta o tipo de material, bem como as condições de exposição e o tipo de exploração. A monitorização é essencial como forma de verificar se o comportamento das estruturas está de acordo com o previsto, evitando surpresas que podem ser desastrosas em termos económicos e de perda de vidas humanas, permitindo igualmente estabelecer ou ajustar um plano de manutenção que favoreça o bom comportamento ao longo da sua vida útil, com o mínimo de custos e de perturbação (Cruz, 2007).

Os objectivos da monitorização são os seguintes:

- Validação dos modelos de comportamento estrutural (instantâneo e diferido) adoptados em fase de projecto;
- Detecção precoce de eventuais deficiências de comportamento;
- Avaliação da resposta da estrutura face às acções aplicadas: sobrecargas, ventos, variações térmicas diárias e sazonais, sismos;
- Avaliação dos níveis de segurança e funcionalidade da obra em fase de exploração.

Segundo Cóias, 2009, a **manutenção** de uma estrutura tem como objectivo prolongar a sua vida útil e promover o cumprimento das exigências de segurança e funcionalidade, tendo em conta os condicionalismos específicos de cada caso e as disponibilidades orçamentais. A adequada gestão da manutenção passa pela elaboração e implementação de um Plano de Manutenção, que deve ter em conta os aspectos técnicos (selecção de soluções de manutenção e reabilitação, ao nível das tecnologias e dos materiais), os aspectos económicos (minimização dos custos de exploração) e os aspectos funcionais (adequado funcionamento da estrutura). Segundo Cruz, 1994, é fundamental prever a realização de campanhas de

inspeção periódicas para avaliar o estado de conservação da madeira, com função estrutural ou não estrutural, e levar a cabo prontamente as acções de manutenção necessárias.

A inspecção deve ser sistemática, desejavelmente criando condições para observar os elementos de uma curta distância (ao alcance da mão), com a ajuda de escadas, andaimes ou plataformas elevatórias, conforme necessário.

No caso das estruturas de madeira lamelada colada, deve ser prestada especial atenção aos seguintes aspectos:

Em relação aos elementos de madeira lamelada colada:

- Deformação dos elementos resistentes (à vista desarmada);
- Fractura da madeira lamelada colada provocada por esforços excessivos;
- Delaminação (abertura das juntas coladas);
- Absorção de água a partir dos topos da madeira lamelada colada ou de fendas;
- Deterioração de elementos sujeitos à abrasão;

Em relação às ligações:

- Rotura ou escorregamento das ligações;
- Aperto de parafusos e ajustamento de outros elementos de ligação;
- Corrosão de ligadores ou de outros elementos metálicos (chapas, cabos);
- Ligadores (parafusos e anilhas) em falta;

E ainda:

- Falha do eventual esquema de pintura aplicado para protecção superficial;
- Falha de eventuais esquemas de protecção ignífuga (de elementos e de ligadores).

Os **métodos de avaliação não destrutivos (NDT)**, podem ser divididos em dois grupos distintos, **métodos globais (GTM - Global Test Method)** e **métodos locais (LTM - Local Test Method)**. Os métodos globais avaliam o elemento na sua totalidade, permitindo confirmar o seu estado de conservação ao longo da sua secção, fazem parte deste grupo os ultra-sons e os métodos vibracionais. Os métodos locais avaliam o elemento pontualmente, determinando a secção residual resistente dos elementos, analisando variações anormais de densidade associadas a perda de massa resultante da deterioração por insectos xilófagos (Feio, 2007).

Destacam-se os seguintes ensaios: “Resistógrafo” (perfil de densidade, detecção de “ocos” ou fendas anelares), Pylodin (dureza na direcção transversal), Raios Gama (perfil de densidade), Ultra-sons - Sylvatest/Pundit (estimação do módulo de elasticidade a partir da velocidade de propagação da onda sonora), Vibrações (estimação do módulo de elasticidade a partir da frequência própria de vibração) (Cruz, 2004).

Segundo Martins, 2009, a metodologia de inspecção e diagnóstico em estruturas de madeira pode ser observada na Tabela 10 do anexo.

5. MADEIRA LAMELADA COLADA

5.1. Origem

A madeira lamelada colada (MLC) é constituída por lâminas de espessura pré-dimensionada, de comprimento variável (secções de 8 a 12 cm por 4 a 5 cm) de madeira classificada e seleccionada, justapostas e firmemente ligadas por cola apropriada. As primeiras aplicações datam de finais do século XIX e início do século XX, mas o aumento da sua utilização surgiu no início do século XX por um alemão chamado Otto Hetzer que em 1906 obtém a patente da sua invenção, lâminas de madeira fortemente coladas entre si.

O aparecimento desta nova tecnologia contribuiu para o reaparecimento das estruturas de madeira, nomeadamente pontes pedonais que vencem maiores vãos.

Uma das madeiras utilizadas no fabrico de MLC é a casquinha, nome comercial de *pinus sylvestris L.*, a sua distribuição geográfica incide numa área muito extensa do continente europeu, desde a floresta de montanha no Ocidente (dos Pirinéus aos Vosgos) e de planícies do Centro e Leste, às regiões setentrionais de baixa altitude euro-asiáticas.

É uma espécie ávida de luz, indiferente a grandes variações de temperatura, com preferência pelos terrenos leves e ligeiramente ácidos.

O *pinus sylvestris L.*, pode atingir 30 a 40 m de altura com um fuste de 20 a 25 m, é direito e desprovido de ramificações. Como tem uma extensa área de distribuição, esta espécie possui bastantes variedades geográficas que se diferenciam pelo seu porte, rectidão do fuste, abundância de ramificações e conseqüentemente pela quantidade da madeira, tanto mais apreciada quanto mais elevada latitude de onde provém (Pinho de Riga, Pinho da Lapónia). Por sua vez, as variedades de montanha (Pinho dos Vosgos) são superiores às de planície (Pinho da Europa Central), as quais, sob clima mais benigno, apresentam com frequência fustes curtos, tortos e nodosos. A casca é espessa, de cor castanho-escura a avermelhada e mais ou menos fendida na base do tronco consoante as variedades. Árvore de crescimento bastante lento, explorada em rotações de 50 a 80 e mais anos, cultivada, regra geral, em povoamentos puros.

Ficha da espécie *Pinus sylvestris*





Dados do registo na Flora Digital de Portugal	Imagem de capa
<p>Espécie: <i>Pinus sylvestris</i></p> <p>Descritor: L.</p> <p>Família: Pinaceae</p> <p>Ordem: Pinales</p> <p>Sub-classe: Pinidae</p> <p>Classe: Pinatae</p> <p>Sub-divisão: Coniferophytina</p> <p>Divisão: Spermatophyta</p> <p>Tipo Fisionómico: Megafanerófito</p> <p>Distribuição Geral: Eurásia, frequentemente cultivado na Região Mediterrânica</p> <p>Nome Comum: Pinheiro-da-Flandres; Pinheiro-de-casquinha; Pinheiro-de-Riga; Pinheiro-silvestre;</p> <p>Habitat/Ecologia: Matos; Matagais;</p> <p>Sinonimias: Não tem</p> <p>Época Floração: Março - Março</p> <p>No JB-UTAD: Sim (C2C4)</p> <p>Colecção temática: N/E</p>	
	Distribuição em Portugal
	

Figura 31 – Ficha da Espécie *pinus sylvestris* L. (Jardim Botânico, 2013)

O **borne** é relativamente abundante (2 a 10 cm nos indivíduos adultos), de cor branco-amarelada e distinto do **cerne**, de cor castanho-pálida a castanho-escura, tanto mais acentuada quanto maior for a camada de Outono. Possui **camadas de crescimento** bem marcadas, de anel estreito ou largo consoante as variedades geográficas, e **veios** bem evidenciados nos cortes longitudinais. A casquinha é uma madeira heterogénea, de **textura** não uniforme e de **fio** recto, moderadamente retráctil, leve a pesada (os menores valores para árvores mais

jovens e os maiores para indivíduos com mais de 50 anos, de anéis em média mais apertados). Contudo, consoante as condições climáticas, altitude, exposição e tratamento florestal vão influenciar a constituição da madeira da mesma espécie, havendo por isso texturas diferentes e uma qualidade de material em relação directa com a densidade e inversa com o tamanho e o número de nós (M4 LNEC, 1997).

A casquinha consoante o seu comportamento, físico e mecânico, provem da Europa Central e do Reino Unido ou do Norte e Nordeste Europeu tendo como designação Scots Pine ou Redwood respectivamente.

Segundo Machado *et. al.*, 1997, como utilização não estrutural segundo a Tabela 11 – Propriedades físico-mecânicas da madeira de casquinha, ver anexo, encontram-se os valores médios das propriedades físicas e mecânicas, relativamente a madeira limpa, onde a casquinha apresenta regra geral densidade mais baixa. A taxa de crescimento, expressa pela largura média dos anéis anuais (medida segundo uma direcção radial), é um dos melhores aferidores da qualidade e da resistência mecânica desta espécie. A madeira de crescimento rápido, com largos anéis anuais, é de textura muito grosseira, menos resistente e consequentemente de inferior categoria. Segundo o Forest Products Research Laboratory, o valor óptimo atinge-se para uma taxa de crescimento próxima de 2 mm (cerca de 5 anéis por centímetro), enquanto para larguras menores dos anéis a madeira torna-se mais branda, de mais fácil preparo, mas com menor resistência mecânica.

Como utilização estrutural, segundo Machado *et. al.*, 1997, encontram-se no anexo nas Tabelas 12 e 13 os valores característicos de resistência mecânica da madeira de casquinha (Redwood ou Scots pine, respectivamente) retirados da Norma Europeia EN 338: Structural timber- Strength classes, a sua classificação feita de acordo com as normas de classificação visual mencionadas no projecto de norma Europeia prEN 1912:1995 – Structural timber – Strength classes – Assignment of visual grades and species.

A madeira de casquinha é fácil de trabalhar, tanto por meios mecânicos como manuais, embora esta facilidade se encontre dependente da largura média dos anéis anuais (taxa de crescimento). O material de anel largo exige lâminas de corte sempre bem afiadas, carece de maiores cuidados no seu preparo e é de laboração mais morosa. Quaisquer defeitos, como nós, fendas e outros, dificultam inevitavelmente o ritmo normal de trabalho. A madeira cola

com facilidade e segurança. É uma madeira que recebe e fixa bem os pregos e os parafusos e pode ser pintada ou envernizada com facilidade.

A madeira de casquinha pode ser submetida com bons resultados a secagem natural e artificial. Trata-se de um material que seca rapidamente e com facilidade, em que não é de prever o aparecimento de defeitos graves de secagem, desde que se tome um mínimo de preocupações indispensáveis a uma operação perfeita. Assim, após o abate, os toros devem ser imediatamente desfiados e as peças obtidas logo dispostas em pilhas bem arejadas e suficientemente espaçadas por réguas ou sarrafos com cerca de 2 a 3 cm de espessura. Deste modo consegue-se contrair o desenvolvimento de fungos responsáveis pelo azulado da madeira (M4 LNEC, 1997).

A classificação da madeira de casquinha em função da durabilidade e da impregnabilidade é apresentada na Tabela 14 do anexo.

A casquinha possui alguns inconvenientes tais como a presença frequente de nós de grandes dimensões e susceptibilidade elevada em relação aos fungos e aos insectos. O elevado número de variedades geográficas com características particulares justifica a grande amplitude de variação do valor comercial desta madeira. As suas vantagens são possuir um campo de aplicações vastíssimo, mercê das suas boas propriedades mecânicas aliadas a uma grande facilidade de trabalho.

Uma outra espécie, também muito utilizada no fabrico de madeira lamelada colada é o espruce, (*picea abies* L., Karst ou *picea excelsa*, Link), nome comum Norway Spruce, árvore de grande porte, muito comum nos países nórdicos, mas também Norte da Ásia e regiões montanhosas da Europa Central.

É uma árvore que pode viver aproximadamente 450 anos, é resistente às baixas temperaturas inverniais e aos nevões, mas sensível aos ventos, desenvolve-se em quase todo o tipo de solos exceptuando os calcários e áridos, preferindo os drenados, frescos, arenosos e ligeiramente húmidos. Possui uma copa cónica e estreita, em forma de pirâmide, um tronco forte e rectilíneo, adelgaçando junto ao topo, podendo atingir os 50-60m de altura, o seu ritidoma é liso, avermelhado, tornando-se castanho avermelhado com a idade; apresenta pequenas escamas que se destacam.

O espruce, é uma madeira leve, de fácil serragem apesar dos numerosos nós, secagem rápida e fácil. Massa volúmica: 450 kg/m³ a 12% de teor em água.

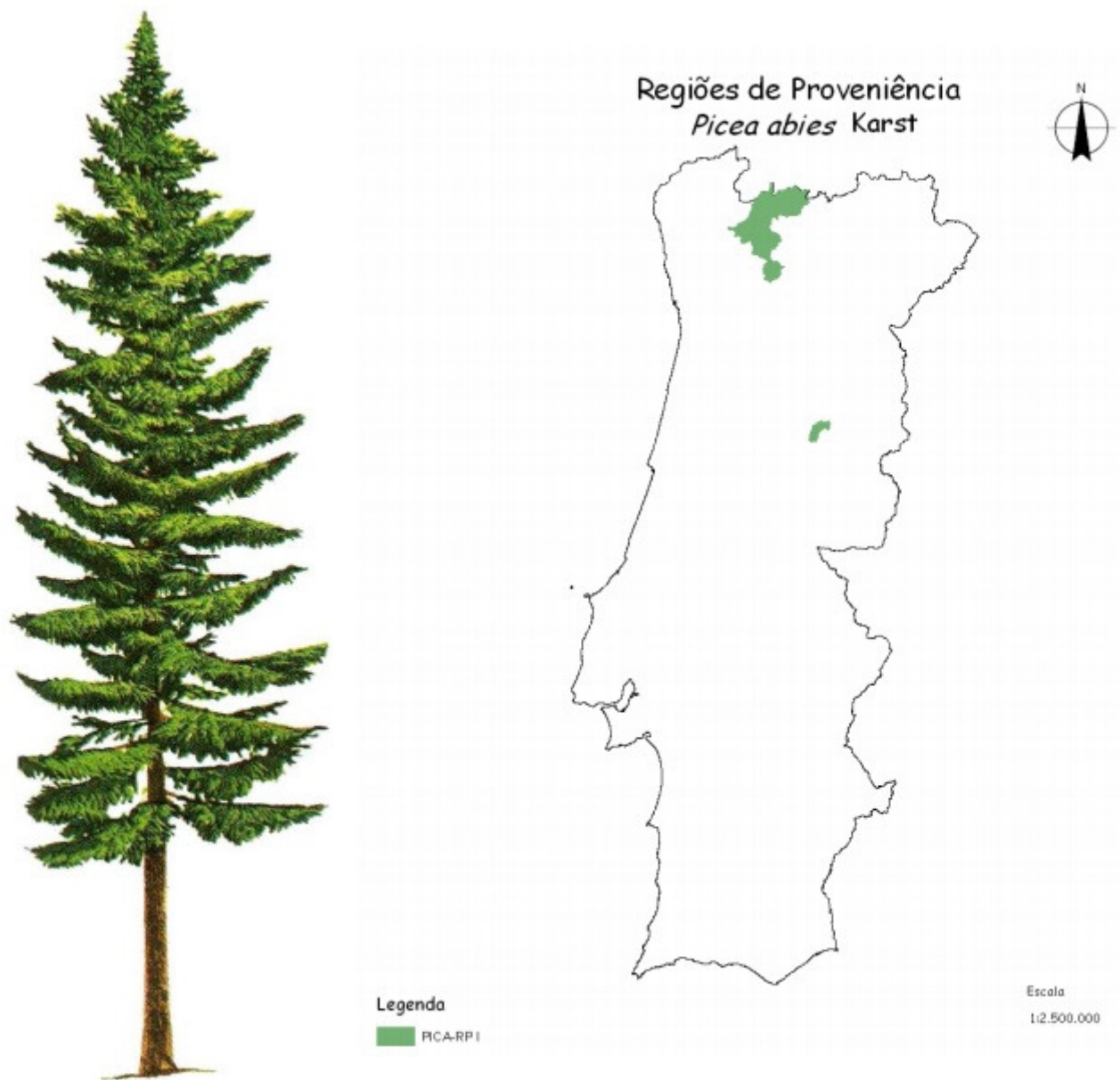


Figura 32 - À esquerda – espruce e à direita regiões de proveniência da espécie *picea abies* L., Karst (Ribeiro, 2008)

5.2. Vantagens e Desvantagens

As estruturas de madeira lamelada colada apresentam um conjunto de vantagens comparativamente às restantes estruturas que são as seguintes:

1. Harmonia de formas e beleza natural do material;
2. Adaptabilidade, possibilitando as mais variadas formas;
3. Excepcional estabilidade e comportamento ao fogo;
4. Material inalterável quando sujeito a ambientes corrosivos e húmidos;

5. Leveza;
6. Melhoramento das características próprias da madeira;
7. Rapidez na montagem;
8. Fiabilidade com o decorrer do tempo;
9. Características antimagnéticas e comportamento dielétrico;
10. Excelente isolamento térmico, anulando as “pontes térmicas”;
11. Supressão de juntas de dilatação em coberturas;
12. É um produto ecológico uma vez que a madeira utilizada (Pinho Nórdico) é proveniente de viveiros próprios localizados no País de origem da madeira;
13. Não existem grandes limitações em termos de dimensionamento comparativamente às estruturas metálicas, além de serem bastante mais leves;
14. Uma melhoria das tensões médias de ruptura e uma redução na dispersão estatística dos seus valores;
15. Produto certificado;
16. Baixa condutibilidade térmica;
17. Ausência de dilatação térmica;
18. Uma grande inércia química;
19. Características mecânicas muito pouco alteradas em função da temperatura.

A madeira lamelada colada apresenta poucas desvantagens, que são as seguintes:

1. Vulnerável aos agentes externos;
2. Durabilidade limitada, quando não são tomadas as devidas preocupações;
3. Localizações restritas, devido à sua composição;
4. Equipamento específico o que leva a investimento dispendioso;
5. Transporte especial de elementos de grandes dimensões, implica um custo elevado
6. Controlo de qualidade minucioso.

5.3. Aplicação

A aplicação da MLC pode ser vista sob as mais variadas formas estruturais. O seu emprego vai desde pequenos passadiços, escadas e abrigos até grandes estruturas concebidas sob as mais variadas formas estéticas. São destinadas a cobrir vãos de até 100 metros sem apoio

intermediário. Como exemplo, pode-se citar a obra do Hall de Tours, na França, com 98 metros de vão livre, assim como, o Palais d'Exposition d'Avignon, também na França, que tem mais de 100 metros de vão livre. Uma outra estrutura, também arrojada e onde os projectistas souberam bem explorar estética e plasticamente a aplicação da madeira sob a técnica do lamelado-colado, foi na antiga sede do Parlamento Europeu, em Estrasburgo na França. Uma estrutura em arcos, formando um conjunto semicircular, onde aconteciam as reuniões dos parlamentares representantes dos países da Comunidade Económica Europeia. Apenas para mostrar o potencial do mercado das estruturas de MLC, verifica-se que só na França, chegou a existir mais de 40 indústrias a trabalhar no fabrico de estruturas de MLC, distribuídas nas diversas regiões do país. Essas indústrias atendem ao mercado francês, mas também exportam para outros países como a Bélgica, Argélia e China (Portal da Madeira). Ver formas Standarts no anexo, Figura 72.

5.3.1. Processo de fabrico

Segundo (Henriques,2002) a produção de peças de madeira lamelada colada de alta qualidade requer uma indústria altamente especializada. Descrevem-se de seguida os seis princípios gerais de fabrico, nomeadamente:

1ª Operação: Secagem

A madeira deve estar armazenada em pranchas e a primeira operação consiste em conduzir a sua humidade aos valores requeridos para o fabrico, que dependerão do tipo de madeira e do facto desta ter recebido tratamento anterior ou não.

2ª Operação: Limpeza, corte e ligação topo a topo

Devem nesta fase ser cortadas as peças que constituirão as lamelas, por forma a rejeitar os nós, bolsas de resina ou defeitos da secagem. Um nó é considerado ponto de fraqueza quando é perpendicular à fibra da madeira e o seu tamanho é 2/3 da largura da lamela. São então cortados os topos, no formato requerido para os entalhes e procede-se à união das peças topo-a-topo, até se obter o comprimento desejado de lamela. A limpeza das pranchas e os cortes efectuados para as diferentes ligações, conduzem a cerca de 30% de desperdícios.

3ª Operação: Aplainamento das lamelas.

Antes de serem coladas, as lamelas de madeira devem ser aparelhadas até adquirirem a dimensão desejada, e se remover quaisquer resíduos como os extractivos e outros possíveis contaminantes que interferem com a colagem. Esta operação é efectuada no máximo, 24 h antes da colagem. O procedimento de aparelhar a madeira proporciona, a remoção de algumas desigualdades dimensionais (ligeiros empenos devidos à alteração do teor de água, por exemplo).

Nos casos em que a madeira possui um elevado teor de resina ou quando foi tratada com produto preservador, é indicado na norma NP EN 386 (2009) que o aparelhamento deve ser realizado dentro das 6 horas que antecedem a colagem. Na prática, o ideal será efectuar o aparelhamento imediatamente antes da aplicação da cola (Lampreia, 2010).

4ª Operação: Colagem das lamelas

A colagem é constituída por duas fases: fase de montagem em aberto e fase de montagem em fechado. A primeira consiste na aplicação da cola sobre as lamelas, mas sem as sobrepor. A segunda fase consiste na montagem das lamelas na posição definitiva, esperando a aplicação da pressão de colagem. Actualmente, estão a ser aplicadas com êxito as colas resorcinas mussantes ou expansivas. A expansão da cola permite compensar as irregularidades das superfícies até cerca de 2mm, assegurando também uma melhor segurança da colagem, uma vez que diminui os riscos de fraca aderência devida às irregularidades do aplainamento.

Para cada tipo de cola, o fabricante deve indicar o tempo de espera (tempo que decorre entre a aplicação da cola e a aplicação da pressão de aperto), assim como a quantidade mínima de cola a utilizar para cada espécie de madeira. Segundo a norma NP EN 386 (2009), a quantidade mínima de cola necessária é de 350 g/m², com excepção da utilização de colas com cura por alta frequência, onde o mínimo é de 200 g/m² (Lampreia, 2010).

5ª Operação: Colagem sob pressão

A pressão a aplicar sobre o elemento deve ser a necessária para permitir um perfeito contacto das faces a colar, bem como para assegurar a exsudação do excesso de cola ao longo da linha de colagem. Deve ser constante e de cerca de 686,5 kN/m² para resinosas (com o mínimo de 608 kN/m²). O tempo de colagem é variável consoante o tipo de cola empregue, a higrometria do ar ambiente e as condições de aquecimento, se este for aplicado.

6ª Operação: Aplainamento, preservação e acabamento

Tratam-se essencialmente de operações de aplainamento até se obter a espessura desejada. Procede-se depois ao lixamento e regularização das superfícies, por forma a se conseguir uma superfície lisa e “macia”. Depois deste tratamento devem ser aplicados os produtos preservadores por um processo de auto-clave. Finalmente, são aplicados vernizes, ceras ou velaturas para proteger a superfície final e dotá-la do aspecto estético desejado.

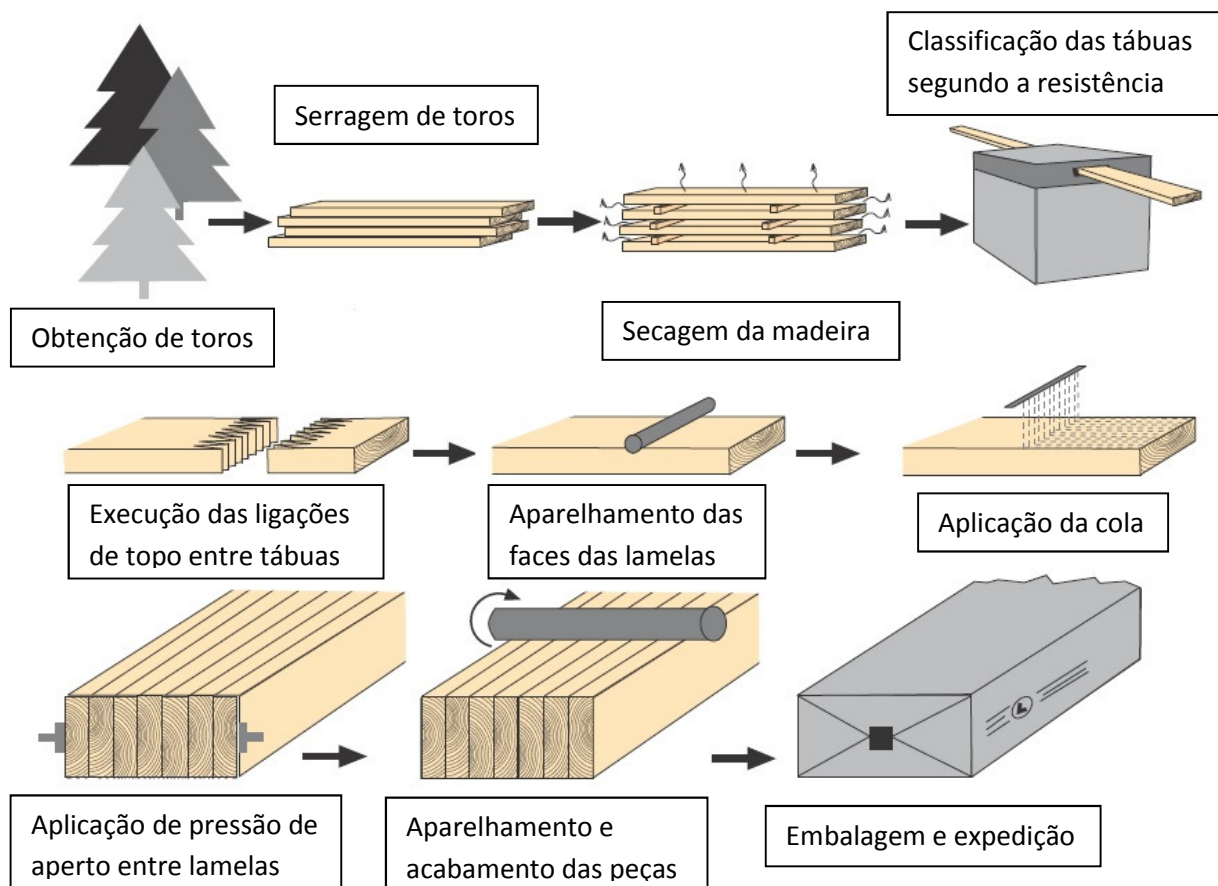


Figura 33- Produção de MLC (fonte Svenskt Limträ AB)

Segundo (Lampreira, 2010) a NP EN 386 (2009), estabelece valores máximos para a espessura e para a área da secção transversal das lamelas, sendo estes tanto menores quanto mais exigentes forem as condições de serviço e quanto maior for a massa volúmica da espécie (caso em que são previsíveis maiores variações dimensionais da madeira), Tabela 15, adaptada da norma mencionada anteriormente, no anexo.

No caso de elementos curvos em que é necessário flectir as lamelas, a espessura será função da resistência à flexão das ligações finger joint e do raio pretendido. Assim, de acordo com a

norma NP EN 386 (2009), a espessura final das lamelas deverá estar de acordo com a seguinte equação:

$$e \leq \frac{r}{250} \left(1 + \frac{f_{m,dc,k}}{80} \right) \quad (28)$$

onde:

e - É a espessura das lamelas, (mm);

r - É o raio de curvatura, (mm);

$f_{m,dc,k}$ - É o valor característico de resistência à flexão de face das ligações finger joint declarado pelo fabricante, (N/mm²).

De acordo com o estipulado na norma NP EN 386 (2009), o posicionamento recomendado das lamelas deve ser tal que a medula se encontre para o mesmo lado em todas as lamelas (Figura 34a) para que os eventuais empenos em meia cana desenvolvidos pelas lamelas tenham a concavidade para o mesmo lado, o que minimiza as tensões nas linhas de cola. A mesma norma recomenda ainda que, no caso de madeira lamelada colada para a classe de serviço 3, nas lamelas extremas deve orientar-se a medula para o exterior do elemento, uma vez que o lado da medula tem menor retracção do que a face do lado oposto (Figura 34b) e a propensão da face exposta para fender é deste modo menor (Lampreia, 2010).

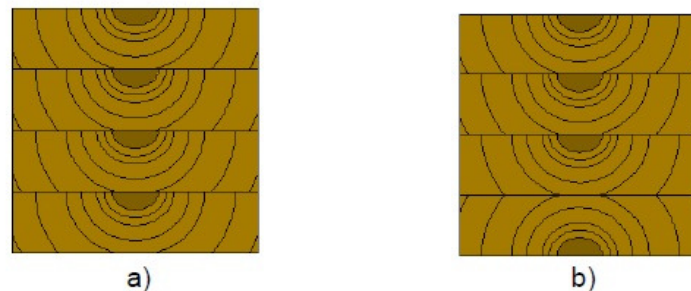


Figura 34 - Orientação das lamelas na secção transversal (NP EN 386, 2009)

5.3.2. Certificação

O **controlo de qualidade** é importante na produção de madeira lamelada colada, e consiste numa parte interna realizada pelo fabricante, e uma parte externa realizada por uma entidade independente. O controlo de qualidade inclui os ensaios de flexão e tracção das juntas dentadas, e ensaios de delaminação ou ensaios de corte para verificar a integridade da linha de colas. A regulamentação é a seguinte:

- EN 301: Synthetic resin adhesives (phenolic and amino plastic) for wood;
- EN 385: Manufacture of finger joints of structural softwood;
- EN 386: Manufacture of glued-laminated timber structural members.



Figura 35 - Juntas dentadas – Finger Joints

A madeira lamelada colada, para estruturas, tem que ser certificada, e desde 01-04-2007, deve ser baseada na Norma Europeia harmonizada EN 14080 – Timber structures – Glued Laminated timber. Requirements, em vigor desde 01-04-2006.

No seu anexo ZA, A EN 14080 define o sistema de comprovação de conformidade aplicável aos elementos de madeira lamelada colada, como sendo o sistema 1, que pressupõe a actuação permanente de uma entidade independente (organismo notificado), garantido a existência de um controlo de qualidade na fábrica adequado.

A conformidade da madeira lamelada colada com as exigências desta norma e com os valores declarados (incluindo as classes de resistência) deve ser demonstrada através de:

- Ensaios ou avaliação de tipo inicial (em laboratório aprovado);
- Controlo de produção pelo fabricante.

A marcação CE da madeira lamelada colada corresponde ao nível mais elevado de garantia de qualidade, rastreabilidade e consistência do produto, trazendo ao mercado vários benefícios de que se destacam uma correcta facilidade de identificação do produto e a garantia de fornecimento de produtos submetidos a um controlo de qualidade adequado.

A marcação CE deve ser aposta de uma forma visível, facilmente legível e indelével, no próprio produto, num rótulo nele fixado, na respectiva embalagem ou nos documentos comerciais de acompanhamento, com informação completa (ver anexo, Figura 73), que inclui

os valores característicos de resistência ou a classe de resistência definida na NP EN 1194 e o tipo de cola (Cruz, 2007).

Segundo (Lampreia, 2010) o fabrico e controlo de qualidade da colagem entre lamelas, pode ser apresentado num esquema, que se pode observar no anexo, Figura 74.

6. PONTES DE MADEIRA

6.1.História das Pontes

6.1.1. As Primeiras Pontes

As primeiras pontes surgiram para ajudar o homem a superar os obstáculos, e eram feitas simplesmente por troncos pouco ou nada trabalhados. A primeira ponte de madeira que se encontra documentada é a do Faraó Menses da primeira dinastia, que atravessa o Nilo, datada de 3000 a.C. Os sumérios construíram também várias pontes de madeira na Mesopotâmia entre Eufrates e Tigre entre os anos 3000 e 2000 a.C., onde a forma e o sistema de suporte estavam adaptados às possibilidades e experiência dos construtores.

A construção das pontes era baseada nas tradições e características de cada região, as técnicas eram passadas de pais para filhos, e adaptavam-se adequadamente às condições climáticas e geográficas do lugar e empregando os materiais dessas regiões.

O bambu, por exemplo, é de rápido crescimento e é constituído por tubos de uma certa largura que permite a construção de pontes cujo sistema construtivo é baseado em tubos atados entre si.

Na América Latina e na Ásia, existem pontes suspensas que vencem vãos até 120 metros com bom comportamento até aos dias de hoje, constituídas por fibras naturais em trança, utilizadas em climas secos. Nas regiões húmidas estas fibras têm uma menor durabilidade, o que faz com que tenham que ser substituídas. Em épocas mais recentes há quem já substitua este material por cabos de aço.

6.1.2. A Evolução das Pontes

Os construtores de pontes eram entendidos em todas as especialidades inerentes à construção, os seus conhecimentos permitiram-lhes fazer o papel de projectistas e construtores, bem como de artesãos, o que por sua vez repercutiu na evolução dos sistemas construtivos. Estes construtores assumiam o papel que hoje é dos arquitectos e engenheiros, assim como na área de trabalho de empresas de transformação de madeira.

Porém a evolução só se poderia verificar se estes construtores se aventurassem a fazer diferentes projectos, podendo resultar assim em danos e catástrofes que permitiam uma maior

e melhor compressão do sistema estrutural, do comportamento e deformações de uma ponte de madeira.

A evolução técnica e o desenvolvimento de novas formas estiveram em muitos dos casos relacionados com fins militares. O exemplo é o da ponte que Júlio Cesar descreve em detalhe no seu livro “ De bello Gallico” onde mandou construir uma ponte no verão do ano de 55 a.C, com 12 metros de largura e 400 metros de comprimento. A ponte foi realizada em 10 dias perto de Neuwied sobre o rio Reno, unicamente com troncos, com pilares afastados de 8 metros apoiados no rio. Esta técnica para a altura só foi possível devido a um apoio logístico e uma percentagem de elementos pré-fabricados em combinação com juntas simples de se montar. A debilidade da ponte devia-se ao fato da subida da água e dos degelos na estrutura, a grande humidade e a falta de uma protecção adequada levou a que mesma apodrecesse rapidamente.

Problemas característicos das estruturas em madeira.

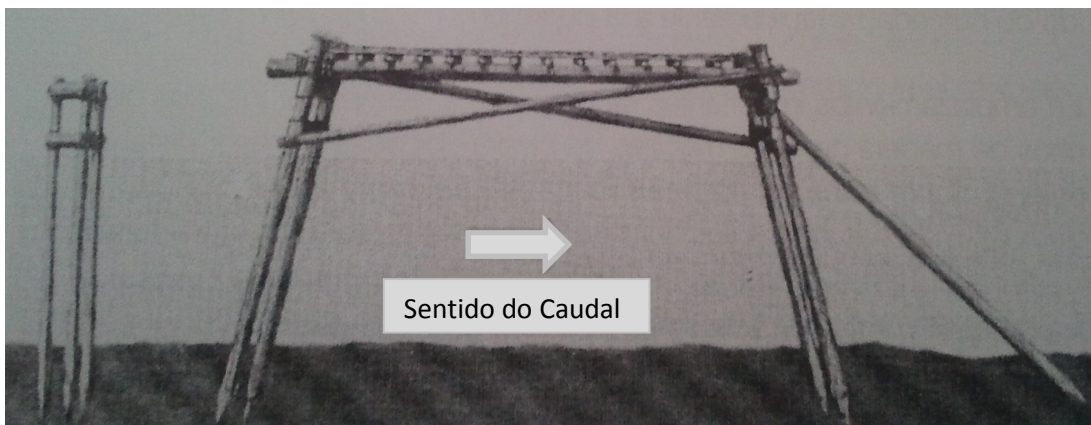


Figura 36 - Ponte descrita por Júlio César em " De bello Gallico" (Schwaner, 2004)

Em locais importantes os pilares de madeira foram substituídos por pilares de pedra a uma maior distância entre si, e sobre estas estruturas de pedra já se conseguia construir em madeira. As estruturas de madeira estariam assim mais protegida e por outro lado a passagem de grandes barcos seria possível, temos o exemplo, da Ponte sobre o rio Reno em Colónia, construída aproximadamente no ano 310 d.C. Com a queda do império Romano as pontes em madeira foram desaparecendo, bem como o desenvolvimento tecnológico alcançado.

O Arquitecto italiano Andrea Palladio dedicava-se a desenhar e construir palácios e casas, e publicou em 1570 um tratado com desenhos e cálculos estruturais de diversas pontes de madeira.

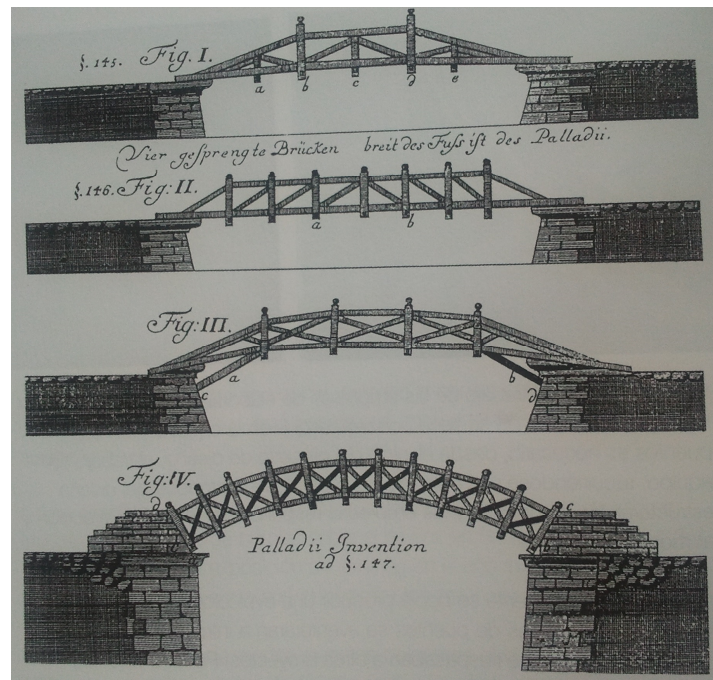


Figura 37 - Sistemas Estruturais de Pontes - Andrea Palladio (Schwaner, 2004)

Com o evoluir das culturas e das civilizações, as pontes foram perdendo o seu carácter de construção funcional, cuja finalidade era responder a requisitos funcionais e técnicos. As pontes passaram a ter a estética como objectivo, e foram atribuídas propriedades religiosas e místicas.

6.1.2.1. As Pontes do Século XVIII

Os construtores suíços Hans Ulrich Grubenmann de Teufen e Josef Ritter de Lucerna, deram um novo impulso na construção de pontes voltando assim a dar grande ênfase a este tipo de obras. Entre os anos de 1755 e 1758 construiu-se uma ponte coberta de madeira sobre o rio Reno em Schaffhausen para substituir a já deteriorada ponte de pedra construída na idade média.

Hans Ulrich Grubenmann propôs aproveitar os apoios laterais já existentes da antiga ponte e projectou uma ponte de vão único com 119 metros de comprimento, sabe-se também que o conselho municipal exigiu que o apoio intermédio da antiga ponte fosse aproveitado.

Hans Ulrich Grubenmann conhecendo a má qualidade do cimento do apoio central e a pouca resistência não quis carregar o apoio central com a totalidade das cargas, por isso passou uma

parte das cargas para os apoios laterais por meio de um arco que vai de uma ponta a outra por cima do apoio central.



Figura 38 - Ponte sobre o rio Rin – Existente (Schwaner, 2004)

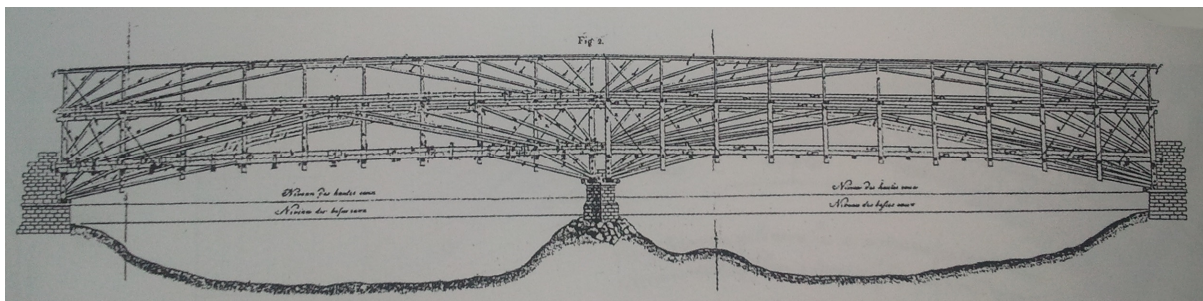


Figura 39 - Desenho da Ponte sobre o Rin - Novo Projecto (Schwaner, 2004)

6.1.2.2. As Pontes do Século XIX – Arcos e Treliças - Howe

Uma das pontes mais interessantes do século XIX é a ponte Schüpbach-Brücke sobre o rio Emme construída em 1839, com 5.85 metros de largura e 4.85 metros de altura. Tem um arco composto por peças duplas acopladas e um vão de 48.70 metros. A superfície da estrada está suspensa por tirantes duplos de madeira de carvalho, que foram posteriormente reforçados por tirantes de aço.



Figura 40 - Ponte Schüpbach-Brücke sobre o Rio Emme (fonte: <http://www.hikr.org/gallery/photo53980.html>)

Trezentos anos antes, Leonardo da Vinci tinha inventado o método de construir os arcos com peças acopladas, e nos seus desenhos indicava como se podia solidarizar duas peças numa só secção através de reentrâncias nas faces dos elementos de madeira como se pode observar na seguinte imagem.

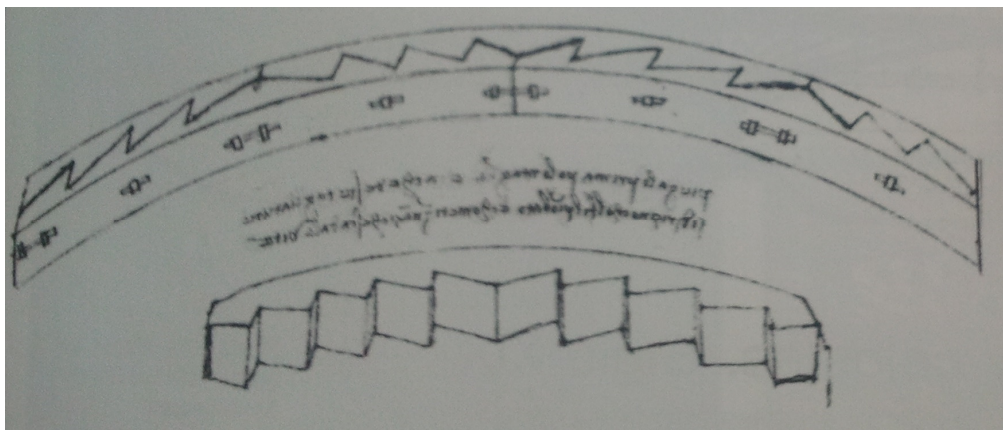


Figura 41 - Arcos construídos mediante peças acopladas (Schwaner, 2004)

No princípio do século XIX, a construção de pontes de madeira voltou-se a desenvolver no Norte da América. As grandes distâncias e a pouca densidade populacional exigiram a rápida construção de vias de comunicação, e para a construção da rede ferroviária era necessário uma grande quantidade de pontes de grandes vãos que deveriam suportar grandes cargas. Devido à precariedade dos caminhos de acesso, a existência de rios largos, a escassez de operários especializados e a existência de grandes florestas, a maioria das pontes era de madeira.

A partir de 1820 e como consequência de uma patente de um sistema construtivo por parte dos Americanos Ithiel Town, Stephan Long e William Howe, começaram-se aplicar o sistema de treliças com diagonais, essas treliças eram constituídas por uma densa malha de barras na

diagonal e permitiu desenvolver uniões traccionadas ou comprimidas por meio de passadores de madeira.

Uma das grandes invenções da época, diz respeito a Howe, que pensou num sistema estrutural, baseado em pilares de aço a funcionar à tracção e com diagonais de madeira a funcionar à compressão. Este sistema foi bastante utilizado por empresas ferroviárias, pois permitia uma grande percentagem de peças pré-fabricadas para a estrutura da ponte, e com o uso de ligações de ferro fundido em combinação com as barras traccionadas de aço ancoradas com anilha e porca facilitavam a montagem e permitiam um melhor ajuste do sistema.

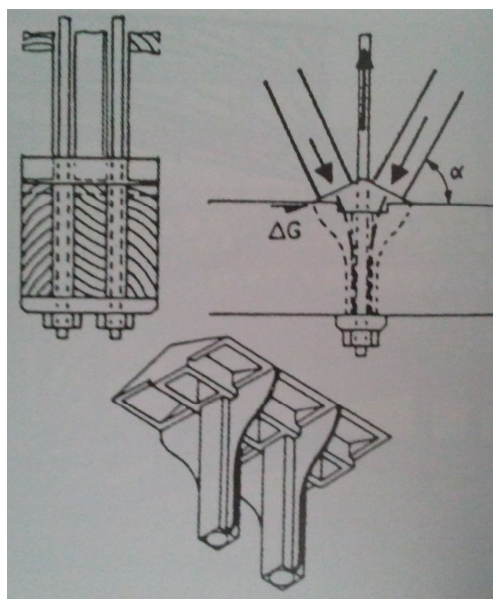


Figura 42- Sistema Howe (Schwaner, 2004)

O Suíço Karl Culmann, ficou a ser conhecido através do rei da Baviera que o financiou para estudar os sistemas construtivos que estavam a ser desenvolvidos nos Estados Unidos da América para assim os transmitir aos engenheiros alemães, entre os anos 1849 e 1850.

No seu estudo de 1851 recolheu informação sobre a Ponte Ferroviária Cascade (Cascade Bridge) a ponte mais fascinante da América construída em 1849 por Thompson S. Brow e composta por um arco com um vão de 90 metros.

Na construção da Ponte Ferroviária de Cascade foram utilizados 306 m² de madeira de carvalho, 1037 m² de abeto, 31921 kg de ferro forjado e 21070 kg de ferro fundido ficando a obra com um custo de 45550 US\$.

Como em todas as obras realizadas, há que ter em conta a durabilidade, e no caso da Cascade Bridge ao deixar de cumprir com os requisitos iniciais de trânsito ferroviário, projectou-se uma solução simples que consistiu em deixar uma condução na parte inferior para a passagem de água e a construção de um aterro.

A primeira ponte a utilizar o sistema de vigas reticuladas de Howe foi a Ponte Punt Russien construída, numa ravina com 46 metros de altura, no ano de 1857, perto de Somvix na Suíça, com 56 metros de comprimentos, uma largura de 4,2 metros e uma altura de 4,5 metros. Em 1938 esta ponte foi demolida pois foi construída uma mais recente de betão, e visto o seu estado de degradação ser avançado optaram pela sua demolição.

Uma outra obra foi a Ponte sobre o rio Iller, que entrou em funcionamento em 1852 e era constituída por uma viga em Carvalho com um vão de 39 metros, de estrutura dupla, seguia os princípios construtivos das vigas de Howe. Durou 27 anos sem sofrer qualquer tipo de reforço, e após esse tempo e graças ao peso das locomotivas que triplicou a ponte foi reforçada, mais tarde e visto que as cargas iam aumentando a ponte deixou de ser ferroviária e passou a ser rodoviária. Nesta mesma ponte no ano de 1945 foi demolido um dos lados, e fez-se a substituição por uma viga que mais tarde por problemas de podridão teve que ser substituída. Foi uma ponte que sofreu grandes reconstruções e hoje em dia é uma ponte pedonal que serve também os ciclistas, é uma obra que demonstra todo o desenvolvimento da engenharia e construção.

Os países colonizadores da Europa, por forma a obter a matéria-prima das zonas montanhosas, tiveram que recorrer à construção de pontes sobre profundos vales, como o caso do norte da Índia. Por meio de troncos dos arredores formavam-se grandes estruturas, constituídas geralmente por treliças, denominadas de «trestle works». Este sistema permitiu a construção de pontes adaptadas a ferrovias em curva.

A Ponte Portage Viaduct, construída por Seymour em 1851 é um dos exemplos «trestle works», com 260 metros de comprimento atravessava o vale de Genesee a uma altura de 71 metros. Tinha 14 apoios a uma distância de 15,70 metros, e passava por baixo um rio com 16,90 metros de largura. A viga superior era uma viga Howe de 4,40 metros de altura que assentava sobre pilares de 57,40 metros de altura. No ano de 1875 o fogo destruiu a ponte e esta foi substituída por uma ponte de aço. Ver anexo Figura 75 e Figura 76.

6.1.2.3. As Pontes do Século XX

No século XX a maioria das pontes eram de pouca durabilidade pois não tinham qualquer tipo de protecção e estavam sempre expostas às intempéries. Devido ao grande consumo de madeira dessa época o material começou a escassear e era necessário percorrer grandes distâncias para o poderem aplicar nas construções.

Com o desenvolvimento dos vários materiais, ferro fundido, betão, aço, as construções em madeira caíram no desuso. As crescentes exigências, o aumento das cargas, maiores vãos com menos deformações correspondiam melhor aos materiais cujas resistências podiam ser calculadas, em vez da madeira que era utilizada de forma tradicional. O campo de aplicação da madeira caiu também devido ao facto do aparecimento de normas de protecção contra o fogo.

6.1.3. Pontes Pedonais em Madeira Lamelada Colada

6.1.3.1. Sistemas Estruturais

Existem diferentes tipos estruturais de pontes de madeira, mas dois dos grandes grupos podem ser classificados como:

- Sistema Estrutural de Placas;
- Sistema Estrutural de Barras.

Estruturas com placas de madeira são constituídas por elementos cujo comportamento consiste na colocação de várias peças de madeira dispostas longitudinalmente umas ao lado das outras formando assim a placa rígida. Têm a restrição de não poderem vencer grandes vãos mas combinadas com outro tipo de estruturas pode vencer grandes vãos.

Estruturas com barras de madeira são caracterizadas por conterem elementos lineares, os vãos variam consoante o tipo de sistema, exemplos do sistema de vigas, sistema de arco, etc.

6.1.3.2. Pontes com Sistema Estrutural de Placas

O sistema estrutural de placas de madeira traccionada é o mais utilizado na construção de pontes de madeira.

Para garantir a colaboração de todos os elementos entre si, empregam-se barras de aço que atravessam transversalmente os elementos de madeira ficando logo traccionadas. É uma das mais novas tecnologias com várias vantagens em relação a outro tipo de placas.

A tensão das barras transversais evita o deslizamento individual de cada elemento de madeira, e desta forma consegue-se que as forças resistam em conjunto e a carga concentrada de um veículo se distribua numa maior superfície. A compressão entre as lâminas e a resistência de fricção são os mecanismos que permitem aos componentes trabalharem como uma única placa. Segundo Duwadi, 2001, o tamanho máximo para uma placa traccionada é de aproximadamente 8 metros, o sistema de tensão permite aumentar a resistência necessária para assegurar uma colaboração das lâminas que não directamente carregadas.

Neste tipo de placas traccionadas, não há delaminação entre as lâminas e têm um comportamento mais seguro em caso de sobrecargas. Para o cálculo destas placas considera-se o comportamento de vigas uma ao lado da outra e num e noutro sentido, o projecto tem que assegurar as tensões admissíveis dos materiais, uma rigidez suficiente, deflexão limitada e evitar compressões altas na madeira.

Metodologia de projecto segundo Davalos, 1993: Definir cargas e geometria da placa; Definir tensões admissíveis; Estimar espessura da placa e largura da distribuição da carga pontual; Calcular os momentos das cargas; Determinar a espessura requerida com a tensão admissível; Determinar a espessura requerida com a flexão admissível; Verificar a espessura escolhida; Calcular a flexão devido ao peso próprio; Determinar o nível requerido de tensão; Seleccionar os espaçamentos dos tirantes; Determinar o tamanho dos tirantes; Determinar o tamanho dos elementos de encaixe. Ver anexo, as Figuras 77, 78 e 79, que correspondem ao alçado, e cortes de uma ponte pedonal.

6.1.3.3. Pontes com Sistema Estrutural de Barras

O sistema estrutural de barras tem como princípio o comportamento que se baseia na transmissão de cargas através de linhas ou barras.

Alguns exemplos de Sistemas Estruturais de Barras:

- Sistema de vigas;
- Sistema de ponte atirantada;
- Sistema de viga reticulada;
- Sistema de ponte em arco;
- Sistema de ponte suspensa.

6.1.3.3.1. Sistema de Viga Simples

O sistema de viga consiste num princípio básico em que a ponte é constituída por uma viga com uma distância entre dois apoios, e constituída por uma viga simples ou viga em madeira lamelada colada, os apoios podem também ser construídos em betão para garantir uma maior durabilidade da estrutura. Estas vigas são projectadas para resistir à flexão simples da carga do tabuleiro. O comprimento da ponte depende do tipo e quantidade de apoios a que estão sujeitas as vigas, e estas podem ser vigas simplesmente apoiadas, vigas com consola, vigas contínuas e vigas simplesmente apoiadas e com rótulas.

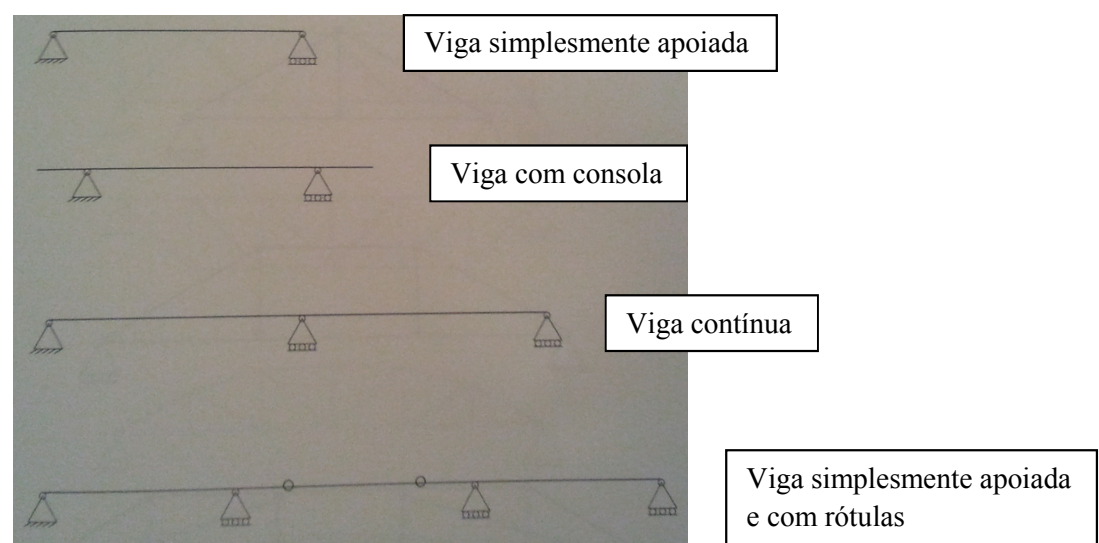


Figura 43 - Sistema de Viga Simples (Schwaner, 2004)

Os sistemas de viga simples são os mais viáveis, e os mais económicos, tendo como restrição os vãos máximos, que dependem do tipo de viga que se utiliza.

6.1.3.3.2. Sistema de Ponte Atirantada

O sistema de ponte atirantada é constituído por vigas em forma de V invertido, geralmente triarticuladas. A plataforma, que trabalha à flexão, está ligada por tirantes a uma torre permitindo assim a suspensão da estrutura.

A ponte atirantada é constituída por vigas horizontais, transversais, as quais podem estar suspensas a partir de uma estrutura triangular, rectangular ou trapezoidal, e consoante o número de tirantes temos pontes suspensas simples, duplas ou múltiplas. Estas estruturas à excepção da treliça requerem uma plataforma horizontal rígida, pois sem ela seria uma estrutura instável. São estruturas que necessitam de protecção devido às intempéries. Ver exemplos de pontes atirantadas no anexo, Figura 80.

6.1.3.3.3. Sistema Reticulado

Constituído por vigas planas unidas por barras lineares de modo alcançar a máxima convergência possível dos eixos das barras que vão a cada nó, formando assim o sistema triangular.

O sistema reticulado pode ter vigas com ambos os tramos rectos, superior e inferior, bem como tramos curvos na parte superior e vãos rectos na parte inferior, ou ambos os tramos curvos. A plataforma de circulação encontra-se geralmente no tramo inferior da viga reticulada, e este tipo de estrutura está associada às pontes com cobertura. São simples de projectar e construir, visto que quase todos os esforços são axiais, facilitando as ligações. Tem a vantagem de ter um baixo custo pois a madeira está sujeita apenas a esforços axiais.

O sistema reticulado pode-se dispor de forma vertical bem como inclinado.

Ver exemplos de sistemas reticulados no anexo, Figura 81.

6.1.3.3.4. Sistema em Arco

O sistema arco surge devido aos novos materiais em madeira como a madeira lamelada colada. O arco triarticulado é o mais utilizado por ser de fácil transporte e porque não apresenta problemas nas fundações.

A vantagem deste tipo de pontes é a distribuição de esforços, nomeadamente, por esforço axial de compressão, otimizando o uso da capacidade resistente do material.

Os arcos podem ter a forma de parábolas, círculos ou linha sinusoidal, diferenciando-se entre si pela altura e vão.

A plataforma de circulação tem três soluções:

- Arco com plataforma sobreposta – A plataforma protege parte da estrutura em arco;
- Arco com plataforma intermédia – A plataforma serve como apoio entre os dois arcos, funcionando como contraventamento.
- Arco com plataforma suspensa – A estrutura está exposta aos efeitos do clima, e os arcos têm que ser protegidos.

No anexo, Figura 82 podemos ver exemplos de pontes em arco.

7. DIMENSIONAMENTO

7.1. Resistência Mecânica da Madeira

O processo de classificação da madeira baseia-se no pressuposto que é possível estimar a resistência da madeira através de características com ela relacionada. Uma vez que as peças de madeira têm de ficar aptas a poderem ser utilizadas, o processo de classificação da madeira terá de ser realizado através de métodos não destrutivos, sendo ainda necessário que cada peça de madeira seja classificada individualmente.

A origem orgânica da madeira aumenta a lista de defeitos que podem prejudicar a sua resistência, o aspecto ou a durabilidade.

A norma NP 180:1962. Anomalias e defeitos da madeira, descreve os vários tipos de anomalias e defeitos da madeira agrupando-os em quatro classes:

- Anomalias e defeitos relacionados com a estrutura do lenho ou com particularidades da morfologia da árvore;
- Anomalias e defeitos resultantes de práticas culturais, de acidentes meteorológicos ou de outras influências externas;
- Anomalias e defeitos devidos ao ataque de fungos ou de animais xilófagos;
- Anomalias e defeitos devidos ao abate, à secagem e à laboração.

7.1.1. Classes de Qualidade

Segundo Negrão e Faria, 2009, o sistema europeu de classificação de madeiras em classes de qualidade baseia-se em 4 normas da série EN 14801 e são as seguintes:

- EN 14081.1 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1 – General requirements;
- EN 14081.2 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 2 – Machine grading: additional requirements for initial type testing;
- EN 14081.3 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3 – Machine grading: additional requirements for factory production control;

- EN 14081.4 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 4 – Machine grading: grading machine settings for machine controlled systems.

Segundo Cachim, 2007, a madeira pode ser classificada através de inspecção visual e ensaios não destrutivos, e os métodos de classificação dividem-se em dois grupos:

- **Métodos de classificação visual:** As peças são inspeccionadas de forma a não possuírem defeitos além de determinados limites;
- **Métodos de classificação por ensaio:** As peças são ensaiadas de forma não destrutiva e onde uma ou várias propriedades são medidas estimando-se a resistência e rigidez a partir destas medições.

As normas de classificação visual aplicam-se a madeira serrada, ou seja, madeira maciça do borne ou cerne, obtida directamente do tronco da árvore, sem se proceder a qualquer colagem, e cuja secção transversal apresenta o formato de vigas ou pranchas (Negrão e Faria, 2009).

Segundo Negrão e Faria, 2009, a técnica de classificação visual apresenta inconvenientes e vantagens na sua aplicação que se descrevem a seguir:

- Constitui uma técnica simples e de fácil compreensão, não sendo necessário uma perícia especial, sendo bastante expedita se for bem aplicada; implica, no entanto, uma preparação prévia do operador;
- Carece de falta de objectividade e rigor, que depende sobretudo do classificador;
- É segura para o cliente, mas ineficiente para o produtor; a classificação visual subestima a qualidade resistente da madeira, sendo para o consumidor uma garantia de que nunca terá problemas, mas para o produtor pode ser considerada uma perda económica significativa que se poderia eventualmente ajustar melhor; para minimizar este factor, é usual combinar a classificação visual com métodos não destrutivos de determinação da resistência;
- Tem de ser feita peça a peça, e com alguma rapidez para ser economicamente viável;
- Não necessita da utilização de equipamentos dispendiosos, e permite a confirmação de resultados em qualquer altura.

7.1.2. Classes de Resistência

Segundo Negrão e Faria, 2009, o princípio das classes de resistência é o da atribuição das principais propriedades físicas e mecânicas a uma dada população de madeiras para estruturas, de forma simples e objectiva, de modo a facilitar a sua aplicação em trabalhos concretos.

O conceito de classes de resistência, implantado na Europa através da norma EN 338, pretende tratar a madeira para estruturas exactamente da mesma forma que o betão ou o aço, introduzindo assim um factor de segurança adicional na especificação dos materiais, já que bastará ao projectista definir a classe de resistência que usou no cálculo. Assim, passa a ser obrigação do construtor e da fiscalização garantir que as madeiras aplicadas sofreram um processo de classificação em classes de qualidade que valida a sua inclusão na classe de resistência especificada pelo projectista (Negrão e Faria, 2009).

As classes de resistência mecânica definidas na norma europeia EN 338:2003 Structural Timber – Strength classes, encontram-se divididas em C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45, C50, para as resinosas, e D30, D35, D40, D50, D60 e D70, para as folhosas.

Para a madeira lamelada colada existe também regulamentação específica para as classes de resistência bem como para os valores característicos, estando definidos na norma NP EN 1194:1999 “Estruturas de Madeira. Madeira lamelada colada. Classes de resistência e determinação dos valores característicos.” Nas Tabelas 16, 17 e 18 do anexo, podemos observar os respectivos valores característicos correspondentes a cada classe de resistência para a Glulam e Glulam combinada.

A norma EN 386 (2009), Glued laminated timber — Performance requirements and minimum production requirements define a produção e controlo da madeira lamelada colada.

Na norma EN 14080, Timber structures - Glued laminated timber – Requirements, especifica os requisitos da madeira lamelada colada para uso em estruturas de suporte, esta norma também especifica a madeira lamelada colada produzida a partir de madeira tratada ou não contra os agentes biológicos.

7.2. Metodologia Geral de Cálculo de Estruturas de Madeira

Segundo (Negrão e Faria, 2009), a Figura 44, ilustra a metodologia correntemente seguida no cálculo de estruturas de madeira.

Realizar projectos de estruturas de madeira implica assim conhecimento de:

- Dados e disponibilidade relativa a materiais;
- Dados relativos a acções;
- Modelos de cálculo dos esforços actuantes e das deformações e vibrações provocadas pelas acções actuantes;
- Como avaliar a capacidade resistente das estruturas considerando a resistência individual dos elementos de madeira, os efeitos das ligações entre as peças e entre estas e as fundações e usando metodologias de verificação da segurança estrutural definidas no Eurocódigo 5 (EC5);
- Acesso à informação técnica e disponibilidade de soluções ao nível de pré-fabricação e sistemas de ligação que permitam aos técnicos projectar soluções que o mercado esteja apto a realizar;
- Modelos de cálculo dos esforços actuantes e das deformações e vibrações provocadas pelas acções actuantes.

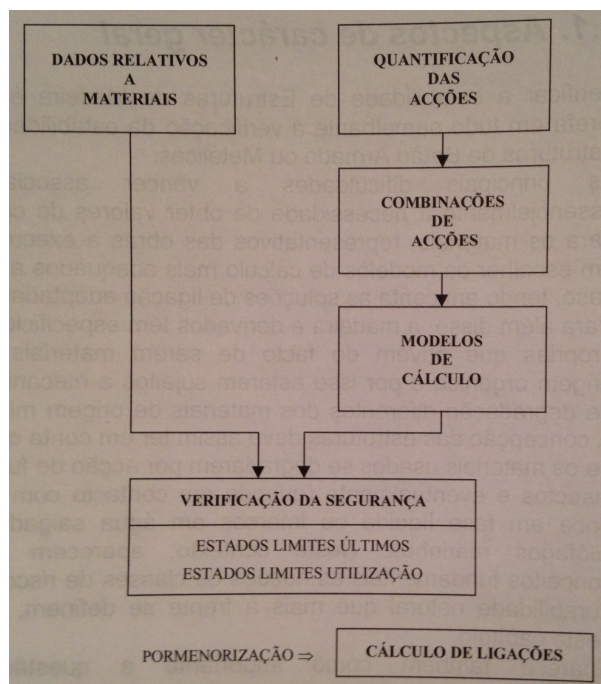


Figura 44 - Metodologia de cálculo de estruturas de madeira (Negrão e Faria, 2009)

7.3. Aplicação do EC5

O EC5 veio colmatar a deficiente regulamentação, para o dimensionamento de estruturas de madeira, que havia em Portugal, e é composto por três partes:

- EN 1995-1-1 Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings;
- EN 1995-1-2 Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design;
- EN 1995-2 Design of timber structures – Part 2: Bridges.

O EC5 Parte 1-1 estabelece os princípios gerais para o projecto de estruturas de madeira, assim como as regras específicas para edifícios, incluindo os seguintes capítulos:

- Generalidades;
- Bases para o projecto;
- Propriedades dos materiais;
- Durabilidade;
- Bases para a análise estrutural;
- Estados-limite últimos;
- Estados-limite de utilização;
- Ligações com ligadores metálicos;
- Componentes e sistemas estruturais;
- Disposições construtivas e controlo.

Do primeiro ao quinto capítulo são definidos os princípios gerais a utilizar na verificação da estabilidade das estruturas. No sexto e sétimo capítulos são definidas as regras particulares de cálculo para elementos e sistemas estruturais, fazendo parte também a definição das regras para a combinação de esforços e para esforços simples.

7.3.1. Quantificação das Acções

Para quantificar as acções utiliza-se o Eurocódigo 1 (NP EN 1911-1 e NP EN 1991-2) e o EC5 para a verificação da segurança. (Negrão e Faria, 2009)

As acções são definidas como sendo:

- **Acções permanentes (G):** o peso próprio das estruturas, dos equipamentos fixos e dos pavimentos rodoviários, e as acções indirectas causadas por retracção e assentamentos diferenciais;
- **Acções variáveis (Q):** as sobrecargas nos pavimentos, vigas e coberturas dos edifícios, a acção do vento ou a acção da neve;
- **Acções de acidente (A):** explosões ou choque provocado por veículos.

Segundo Negrão e Faria, 2009, devem ser consideradas todas as acções de aplicação directas tais como cargas permanentes, sobrecargas, vento, neve e sismos, bem como as acções indirectas aplicáveis (assentamento de apoios e acções induzidas pelas variações de teores de água das peças).

As normas preferencialmente a seguir são as seguintes:

- EN 1991-1-1: Pesos volúmicos, próprios e sobrecarga;
- EN 1991-1-3: Acções da neve;
- EN 1991-1-4: Acções do vento;
- EN 1991-1-5: Acções térmicas;
- EN 1991-1-6: Acções durante a execução;
- EN 1991-1-7: Acções de acidente;

Segundo Negrão e Faria, 2009, consoante o ambiente em que se encontram as estruturas de madeira, estas devem ser calculadas de maneira diferente, devido ao equilíbrio termohigrométrico.

A norma EN 335.1 especifica cinco classes de risco:

- Classe de risco 1 – ambiente interior protegido;
- Classe de risco 2 – ambiente interior não protegido ou exterior não sujeito à acção directa da água das chuvas e com contactos muito esporádicos com água líquida;
- Classe de risco 3 – ambiente exterior com contactos frequentes com água das chuvas, muitas vezes em períodos longos;
- Classe de risco 4 – em contacto permanentemente com água doce em fase líquida;
- Classe de risco 5 – permanentemente imerso em água salgada.

Quanto à duração das acções, o EC5 prevê cinco categorias, associadas à duração acumulada dos valores das acções conforme se resume a seguir:

- Permanentes: mais de 10 anos de duração (peso próprio);
- Longa duração: entre 6 meses a 10 anos de duração (sobrecargas de carácter permanente);
- Média duração. Entre 1 mês e 6 meses (sobrecargas correntes ou neve em certos casos);
- Curta duração: menos de uma semana (vento, neve em certos casos);
- Instantâneas: vento, sismo, acções de acidente.

O Eurocódigo 5 estabelece cinco classes de serviço no que diz respeito à divisão dos materiais. A classe de serviço define-se como sendo uma combinação de dois factores: a temperatura e a humidade relativa do ambiente em que a estrutura irá ser construída.

As classes de serviço são:

- **Classe de serviço 1** – caracterizada por um teor de água, dos materiais, correspondente ao teor de água de equilíbrio para um ambiente caracterizado por uma temperatura de 20 °C e uma humidade relativa do ar ambiente excedendo 65% somente durante algumas semanas por ano.
- **Classe de serviço 2** – caracterizada por um teor de água, dos materiais, correspondente ao teor de água de equilíbrio para um ambiente caracterizado por uma temperatura de 20 °C e uma humidade relativa do ar ambiente excedendo 65% somente durante algumas semanas por ano.
- **Classe de serviço 3** – caracterizada por condições climáticas conduzindo a valores do teor de água dos materiais superiores aos que se verificam na classe de serviço 2.

7.3.2. Estados-Limite

Uma estrutura seja ela de que natureza for, tem que cumprir requisitos, sendo um deles a verificação dos estados-limites.

Um estado limite é definido como a condição que uma vez atingida ou ultrapassada, a estrutura (ou qualquer um dos seus elementos) deixa de ser capaz de satisfazer os objectivos

para os quais estavam projectados. Existe uma distinção fundamental entre Estado Limite Último e Estado Limite de Utilização ou Serviço (Pacheco, 2011).

Os **Estados Limites Últimos** estão estritamente relacionados com a capacidade resistente ou, em qualquer altura, com o atingir de situações extremas, ou seja, referem-se a todas as situações que comprometem a segurança quer das pessoas quer da estrutura. (EN1990, secção 3.3)

Os **Estados Limites de Utilização**, estão relacionados com os critérios que regem a funcionalidade das estruturas, com os requisitos necessários para a durabilidade, utilização normal, conforto para o utilizador e a aparência da estrutura. No âmbito dos estados limites de utilização, existem 3 aspectos a ser considerados: deformação, vibração e fendilhação. (EN 1990, secção 3.4.)

Segundo Negrão e Faria, 2009, os modelos de cálculo para os diferentes estados-limites devem ter em conta, conforme o caso:

- As diferentes propriedades dos materiais (exemplo: resistência e rigidez);
- Os diferentes comportamentos no tempo dos materiais (duração da acção, fluência);
- As diferentes condições climáticas (temperatura, variações de humidade);
- As diferentes situações de cálculo (fases de construção, alteração das condições de apoio).

Para a verificação da segurança em relação aos **estados-limite de utilização**, se a estrutura for constituída por elementos ou componentes com diferentes propriedades no tempo, os valores médios finais do módulo de elasticidade, $E_{mean,fin}$, do módulo de distorção, $G_{mean,fin}$, e do módulo de deslizamento, $K_{ser,fin}$, utilizados para o cálculo da deformação final, são obtidos através das seguintes expressões:

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1+k_{def})} \quad (29)$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1+k_{def})} \quad (30)$$

$$K_{ser,fin} = \frac{K_{ser}}{(1+k_{def})} \quad (31)$$

Tabela 6 - Valores de K_{edf} (CEN, 2004)

	Norma	Classes de Serviço		
		1	2	3
Madeira Lamela colada	EN 14080	0.60	0.80	2

Para a verificação da segurança em relação aos **estados-limite de últimos**, em que a distribuição dos esforços nos elementos é afectada pela distribuição de rigidez na estrutura, os valores médios finais do módulo de elasticidade, $E_{mean,fin}$, do módulo de distorção, $G_{mean,fin}$, e do módulo de deslizamento, $K_{ser,fin}$, deverão ser calculados através das seguintes expressões:

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1+\psi_2 k_{def})} \quad (32)$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1+\psi_2 k_{def})} \quad (33)$$

$$K_{ser,fin} = \frac{K_{ser}}{(1+\psi_2 k_{def})} \quad (34)$$

onde:

E_{mean} – Valor médio do módulo de elasticidade;

G_{mean} - Valor médio do módulo de distorção;

K_{ser} – Modelo de deslizamento, em N/mm, aplicável ao cálculo do deslizamento de uma ligação (em mm) em função do esforço aplicado em Newton;

k_{def} – Factor para a avaliação da deformação devida à fluência e que tem em conta a classe de serviço pertinente;

Ψ_2 – Coeficiente para o valor quase-permanente da acção.

Verificação pelo método dos coeficientes parciais - O critério utilizado neste método dita que para qualquer situação de projecto a segurança é satisfeita desde que não seja excedido nenhum estado limite relevante quando se comparam valores de cálculo dos efeitos das acções e das resistências obtidos nos modelos de cálculo (Martins, 2010).

Os valores de cálculo das acções e das propriedades dos materiais são obtidos a partir dos valores característicos e afectados do coeficiente parcial de segurança, γ_M . As propriedades de cálculo, X_d , resultam da seguinte forma:

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (35)$$

onde:

X_d – Valor característico de uma propriedade de resistência;

γ_M – Coeficiente parcial de segurança para uma propriedade de um material;

k_{mod} – Facto de modificação da resistência, que tem em conta o efeito da duração das acções e do teor em água.

O valor de γ_M para a madeira lamelada colada é de **1,25**.

O valor de cálculo de uma propriedade de rigidez de um elemento, E_d , ou G_d , é calculado segundo as seguintes expressões:

$$E_d = \frac{E_{mean}}{\gamma_M} \quad (36)$$

$$G_d = \frac{G_{mean}}{\gamma_M} \quad (37)$$

7.3.3. Dimensionamento dos Elementos de Madeira

7.3.3.1. Tracção e Compressão

É necessário ter em conta que a madeira limpa no geral só é possível de conseguir em provetes pequenos, e a madeira estrutural é constituída por elementos de dimensão real (Negrão e Faria, 2009).

A madeira limpa é conseguida em provetes de dimensão reduzida, cujos ensaios revelam a resistência intrínseca às fibras de madeira. Neste tipo de madeira excluem-se os defeitos de crescimento que afectam o seu comportamento. Em elementos estruturais de madeira de dimensão real estes defeitos já não se conseguem evitar, visto estes se encontrarem relacionados com o processo natural de crescimento da árvore. Consequentemente os provetes de dimensão reduzida apresentam valores de resistência mecânica superiores aos que se obtêm em elementos de madeira estrutural (Martins, 2010).

A maior sensibilidade do comportamento à tracção e o tipo de rotura frágil a que está associado resultam, na maioria das espécies de madeira, na atribuição de valores característicos da resistência à tracção inferiores aos de compressão, o que não impede que o valor médio da resistência à tracção de provetes de madeira limpa seja superior ao da resistência à compressão (Negrão e Faria, 2009).

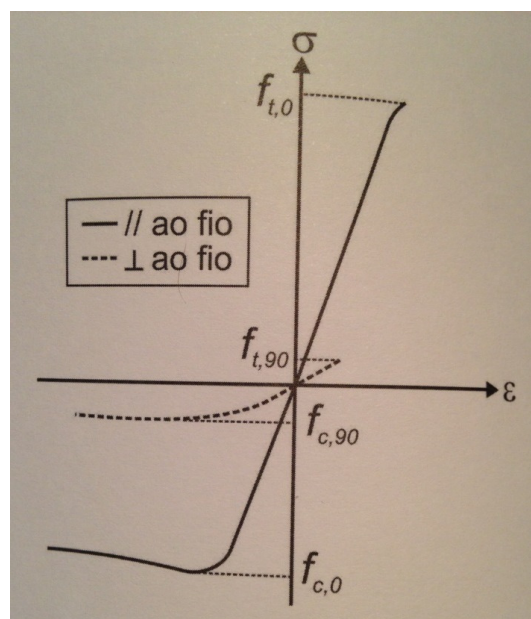


Figura 45 - Curva de tensão-extensão de provetes de madeira limpa (Negrão e Faria, 2009)

A Figura 45 representa, qualitativamente, a curva tensão-extensão para provetes de madeira limpa carregados na direcção do fio perpendicular ao fio.

É possível verificar que o comportamento em tracção paralela ao fio é praticamente linear até ao momento em que ocorre a rotura. Esta situação ocorre, para as madeiras de construção resinosas correntes, quando se atingem valores entre os 80 e os 90 N/mm². É ainda possível concluir que a rotura por tracção é frágil, na medida em que não se desenvolve nenhum patamar de plastificação (Negrão e Faria, 2009).

7.3.3.1.1. Tracção Paralela ao fio

O critério de verificação de segurança para a tracção paralela ao fio é expresso na disposição 6.1.2 (1) do EC5 1-1 e é dado por:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (38)$$

onde:

$\sigma_{t,0,d}$ - Valor de cálculo da tensão actuante de tracção;

$f_{t,0,d}$ - Valor de cálculo da resistência à tracção paralela ao fio.

Este último valor pode ser utilizado, conservadoramente, tal como se mostra na expressão (35). Contudo existem casos em que a secção transversal é de dimensões reduzidas e devido ao efeito de volume, é possível considerar-se um aumento do valor da resistência. Para este efeito, na expressão anterior (35) deve ser corrigido o valor da resistência para da seguinte forma:

$$f'_{t,0,d} = k_h f_{t,0,d} \quad (39)$$

O parâmetro, k_h , tem em conta o efeito acima descrito e é aplicado na verificação de segurança de esforços simples de compressão e tracção, na direcção paralela às fibras. Este coeficiente, não inferior à unidade, depende da maior dimensão, h , da secção transversal. O EC5 propõe para secções rectangulares as seguintes expressões:

Para a madeira lamelada colada:

$$k_h = \min \begin{cases} \frac{600^{0.1}}{h} \\ 1.10 \end{cases} \quad (h \leq 600\text{mm}) \quad (40)$$

A expressão (40) é referida no Eurocódigo 5 parte 1-1, 3.3 (3).

7.3.3.1.2. Tracção Perpendicular ao fio

O EC5 não prevê a solicitação directa da madeira em tracção perpendicular ao fio, mas introduz uma cláusula (6.1.3.1) que menciona a necessidade de consideração do efeito de volume para casos em que este esforço esteja presente como característica inerente ao sistema estrutural.

7.3.3.1.3. Compressão Paralela ao fio

A verificação da segurança para a compressão paralela ao fio resume-se na limitação do valor de cálculo da tensão actuante de compressão ao valor máximo da resistência à compressão paralela ao fio. O EC5 parte 1-1 define em 6.1.4 (1) a seguinte expressão:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (41)$$

onde:

$\sigma_{c,0,d}$ - Valor de cálculo da tensão actuante de compressão;

$f_{c,0,d}$ - Valor de cálculo da resistência à compressão paralela ao fio.

No caso de elementos esbeltos, esta verificação deverá ser complementada por uma verificação do risco de encurvadura.

7.3.3.1.4. Compressão Perpendicular ao fio

A verificação da compressão perpendicular ao fio é, definida pela imposição de um limite superior ao cálculo da tensão actuante de compressão.

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} f_{c,90,d} \quad (42)$$

onde:

$\sigma_{c,90,d}$ - Valor de cálculo da tensão actuante de compressão perpendicular ao fio;

$f_{c,90,d}$ - Valor de cálculo da tensão resistente de compressão perpendicular ao fio;

$k_{c,90}$ - Coeficiente que traduz o efeito da variação da resistência da peça com a geometria e com a extensão da zona carregada.

O EC5-1-1, define em 6.1.5 (1), para valores elevados de $\sigma_{c,90,d}$ a seguinte expressão:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \quad (43)$$

onde:

A_{ef} - Área de contacto efectiva.

Por norma o factor, $k_{c,90}$, deve ser considerado unitário, nos seguintes casos particulares:

- Em vigas continuamente apoiadas com $h \leq l_1/2$ (Figura 46) os valores de $k_{c,90}$ a adoptar são os seguintes:
Madeira lamelada colada de resinosas, $k_{c,90} = 1.50$
- Em vigas sobre apoios discretos, com $h \leq l_1/2$ (Figura 47) os valores de $k_{c,90}$ a adoptar são os seguintes:
Madeira lamelada colada de resinosas e $l \leq 400\text{mm}$, $k_{c,90} = 1.75$

onde:

l_1 - Distância entre as zonas de carregamento;

l - comprimento carregado.

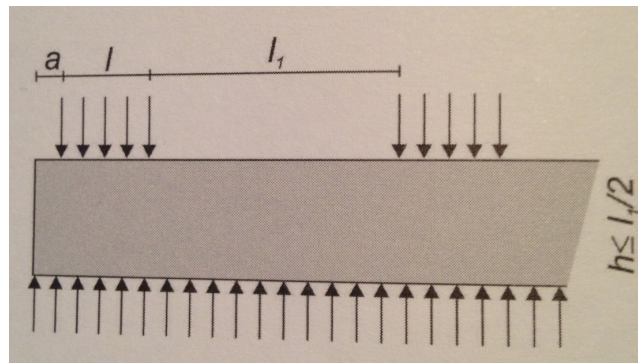


Figura 46 - Viga continuamente apoiada (Negrão e Faria, 2009)

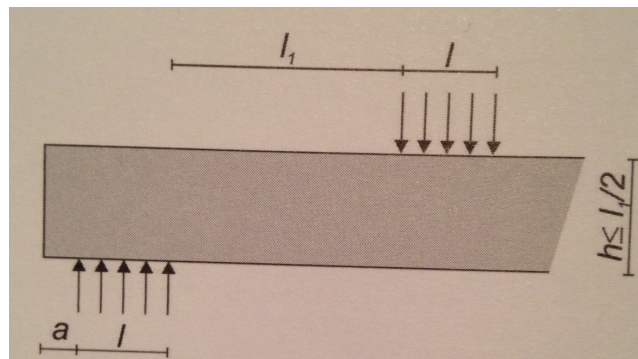


Figura 47 - Viga sobre apoios discretos (Negrão e Faria, 2009)

7.3.3.2. Flexão

A observação da segurança em relação aos estados-limite últimos (ELU) de peças flectidas envolve, em regra, as seguintes verificações:

- Resistência das secções à flexão;
- Instabilidade da viga (bambeamento);
- Resistência ao corte (e, eventualmente, à torção);
- Resistência ao esmagamento dos apoios;
- Resistência de ligações (quando existentes).

Complementarmente, devem ser observados os limites que configuram a ocorrência de estados-limite de utilização (ELS), no que respeita a:

- Deformação;
- Vibração.

7.3.3.2.1. Flexão Simples

O critério de segurança genérico consiste na limitação do valor máximo (em módulo) da tensão de cálculo actuante de flexão à tensão de cálculo resistente à flexão. Resultando assim na seguinte inequação:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (44)$$

A tensão de cálculo resistente à flexão, $f_{m,d}$, deve ser calculada de maneira a que o valor característico definido na EN 338 (para madeira maciça) ou na NP EN 1194 (para madeira lamelada colada) venha afectado do respectivo coeficiente parcial de segurança e do coeficiente de modificação da resistência, tal como se apresentou na secção 5.3.2 (Coeficientes Parciais) (Martins, 2010).

De acordo com Negrão e Faria, 2009, as tensões mais elevadas ocorrem na proximidade dos vértices opostos (Figura 48). Na zona intermédia, as fibras ficam sujeitas a um regime de tensões mais moderado. Por outro lado, pelo facto de existir um "patamar" de plastificação no ramo de compressão na curva tensão-extensão da Figura 45 é possível redistribuir tensões, que no fundo significa uma resistência maior do que a que é expressa na inequação (44).

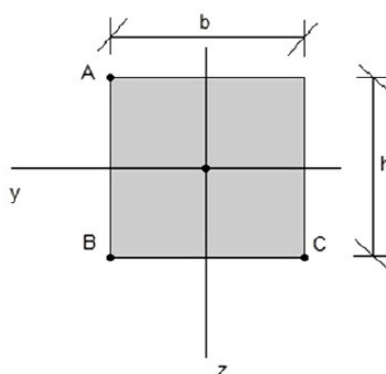


Figura 48 - Secção transversal genérica (Martins, 2010)

Se numa secção se verificar actuação de momentos flectores nas duas direcções principais (flexão simples desviada), admite-se uma redução da contribuição de apenas uma das componentes do momento flector. Esta convenção é fundamentada pelos motivos citados anteriormente. Visto não haver um motivo explícito para determinar qual das componentes deve ser reduzida, o EC5-1-1 preconiza a verificação simultânea das seguintes contribuições:

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (45)$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (46)$$

onde:

$\sigma_{m,y,d}$ - Valor de cálculo da tensão máxima de flexão devida ao momento flector M_y ;

$f_{m,y,d}$ - Valor de cálculo da tensão resistente à flexão no plano xOy;

$\sigma_{m,z,d}$ - Valor de cálculo da tensão máxima de flexão devida ao momento flector M_z ;

$f_{m,z,d}$ - Valor de cálculo da tensão resistente à flexão no plano xOz.

$k_m = 0.7$ para secções rectangulares de madeira lamelada colada.

No caso de flexão plana o factor de redução na verificação de segurança, não se utiliza pois a condição que prevalece é sempre a seguinte:

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (47)$$

7.3.3.2.2. Flexão Composta com Tracção

No caso da flexão composta com tracção o EC5-1-1 propõe uma metodologia semelhante à utilizada para a flexão simples, sendo acrescentada a componente axial às inequações anteriores:

$$\frac{\sigma_{t,o,d}}{f_{t,o,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (48)$$

$$\frac{\sigma_{t,o,d}}{f_{t,o,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (49)$$

Estas expressões baseiam-se no pressuposto de uma interacção linear entre o momento flector e o esforço axial de tracção o que, em face da linearidade do ramo de tracções da curva tensões-extensões da madeira (ver Figura 45), parece inteiramente justificado. (Negrão e Faria, 2009)

7.3.3.2.3. Flexão Composta com Compressão

Ao introduzirmos a contribuição da parcela de compressão, a verificação da flexão composta resulta da seguinte forma, segundo o EC5-1-1:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (50)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (51)$$

Quando só existe um momento flector, não faz sentido a utilização do factor de redução, k_m , visto que a inequação condicionante é sempre a seguinte:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (52)$$

7.3.3.3. Corte

Como a madeira é um material com anisotropia, a resistência ao corte varia consoante o plano solicitado.

Segundo o EC5-1-1 o critério de verificação da segurança ao corte de elementos de madeira consiste em limitar o valor de cálculo da tensão actuante de corte ao valor de cálculo da resistência ao corte da madeira, ou seja:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (53)$$

Esta expressão é aplicável tanto nos casos de esforço transversal $\tau_{xz/zx}$ (ver Figura 83a no anexo) como nos de $\tau_{xy/yy}$ (ver Figura 83b no anexo), e $\tau_{yz/zy}$ (ver Figura 83c no anexo).

No caso de elementos à flexão, uma largura reduzida da secção deve ser considerada, devido ao efeito das fendas, a largura é dada por:

$$b_{ef} = k_{cr} b \quad (54)$$

onde:

b_{ef} – Largura reduzida;

k_{cr} – Factor de redução.

$k_{cr} = 0.67$ – madeira lamelada colada

7.3.3.4. Encurvadura

A encurvadura é um modo de instabilidade caracterizado pela deformação transversal de uma barra comprimida (ver anexo, Figura 84). A encurvadura, é um fenómeno que, pode resultar da aplicação de uma carga de compressão excêntrica, assim como de elementos com desvios de linearidade ou outros defeitos provenientes do processo de fabrico. Desta forma geram-se momentos flectores que originam deformações que, por sua vez, podem vir a agravar significativamente os efeitos das imperfeições iniciais. De notar que nos casos em que a barra esteja a trabalhar à tracção este fenómeno atenua os efeitos das imperfeições iniciais.

Estabelece-se como procedimento geral que a verificação da segurança à encurvadura deverá ser conduzida, simultaneamente, em dois planos perpendiculares do elemento, como é patente no procedimento regulamentar a seguir descrito:

Primeiro definem-se as esbeltezas λ_y e λ_z :

$$\lambda_y = \frac{L_{v,y}}{i_y} \quad e \quad \lambda_z = \frac{L_{v,z}}{i_z} \quad (55)$$

onde:

λ_y – Esbelteza segundo o eixo y;

λ_z – Esbelteza segundo o eixo z;

$L_{v,y}$ – Comprimento de encurvadura para flexão em torno do eixo y;

$L_{v,z}$ – Comprimento de encurvadura para flexão em torno do eixo z;

i_y – Raio de giração segundo o eixo y;

i_z – Raio de giração segundo o eixo z.

Segundo o EC5-1-1, as curvas de encurvadura são expressas em termos das esbeltezas relativas:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad e \quad \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (56)$$

A encurvadura é um fenómeno típico de elementos esbeltos, sendo a tensão máxima suportável pelo elemento tanto menor quanto maior a sua esbelteza. Assim pode-se admitir que a interacção entre momentos flectores e esforço axial de compressão é, neste caso, linear, uma vez que o regime de compressão se encontra ainda distante do patamar “plástico”.

As expressões de interacção linear previstas no EC5 são:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (57)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (58)$$

onde:

$k_{c,y}$ – Coeficiente de encurvadura segundo o eixo y;

$k_{c,z}$ – Coeficiente de encurvadura segundo o eixo z.

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (59)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (60)$$

$$k_y = 0.5 (1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad (61)$$

$$k_z = 0.5 (1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad (62)$$

$\beta_c = 0.1$ – Madeira lamelada colada.

8. ESTUDO DE CASOS

Este capítulo retracts o estudo de quatro pontes em madeira lamelada colada, (MLC), duas em Portugal (concelho de Lisboa) e duas na Noruega (Stavanger na zona oeste da Noruega e Ås no interior da Noruega perto da capital Oslo).

É feita uma pequena abordagem e descrição da constituição de cada ponte, e comparação relativamente ao estado de conservação de cada uma em relação à sua localização/manutenção/data de colocação.

Uma das pontes em estudo situa-se no Parque das Nações, no concelho de Lisboa, (ver Figura 49), foi construída pela empresa Flexilam (não existente no mercado), e colocada a meados/fins de 2006, tem uma secção transversal rectangular de 115 x 360 mm² e uma largura de 1.7 metros, possui ligações aparafusadas em ambas as extremidades, e é revestida por uma camada espessa de tinta fraca quando exposta directamente às intempéries, (ver mais Figuras no anexo, 85 a 88) (Fortino, 2013).

É uma estrutura que apresenta uma baixa degradação aos diferentes agentes, relativamente ao tempo de exposição, mas que devido à sua orientação não é uniforme, (ver Figura 50). A orientação da ponte é Nascente-Poente, ver orientação da ponte na Figura 89 do anexo, logo as suas faces estão viradas a Norte e Sul, fazendo com que as faces a Sul sejam as mais desfavoráveis, quanto à exposição solar, a degradação pode-se observar na Figura 50.



Figura 49 - Ponte Pedonal em Madeira Lamelada Colada - Parque das Nações – Lisboa (Almeida, 2013)

A madeira utilizada na construção da ponte é espruce da Noruega - [*picea abies* L., Karst], os elementos longitudinais estão protegidos da exposição directa do sol e chuva por revestimento de madeira e folha de zinco, e os elementos transversais protegidos pelas placas da plataforma

(Fortino, 2013), e segundo a classificação do tipo de clima da Europa - Köppen-Geiger, Lisboa está incluída no clima Mediterrâneo quente (Fragiacomo 2011).



Figura 50 - Vista a Nascente - Face Sul deteriorada - à esquerda e Face Norte sem problemas - à direita (Almeida, 2013)

Foi realizado um estudo ao nível da monitorização da ponte, e um dos ensaios foi realizar medições da humidade na viga de madeira lamelada colada a partir da resistência eléctrica e temperatura da madeira de 17.01.2007 a 11.09.2007, consistindo numa média de quatro medições diárias (um valor de dados por dia) (Fortino, 2013).

A medição da resistência eléctrica da madeira é utilizada para avaliar localmente o teor de humidade, (Rossel, 2006) e apto para monitorização a longo prazo, (Brischke, 2008; Tannert,2010). Para a medição da resistência eléctrica foi utilizado o Scantronik Materialfox, um mini sensor (com três canais de leitura) e eléctrodos penetrantes (parafusos de aço inoxidável), dois pares de eléctrodos foram colocados nas extremidades da viga e o terceiro no centro, como mostram as Figuras 51 e 52 (Fortino, 2013).



Figura 51 - Posição dos sensores (Fortino, 2013)

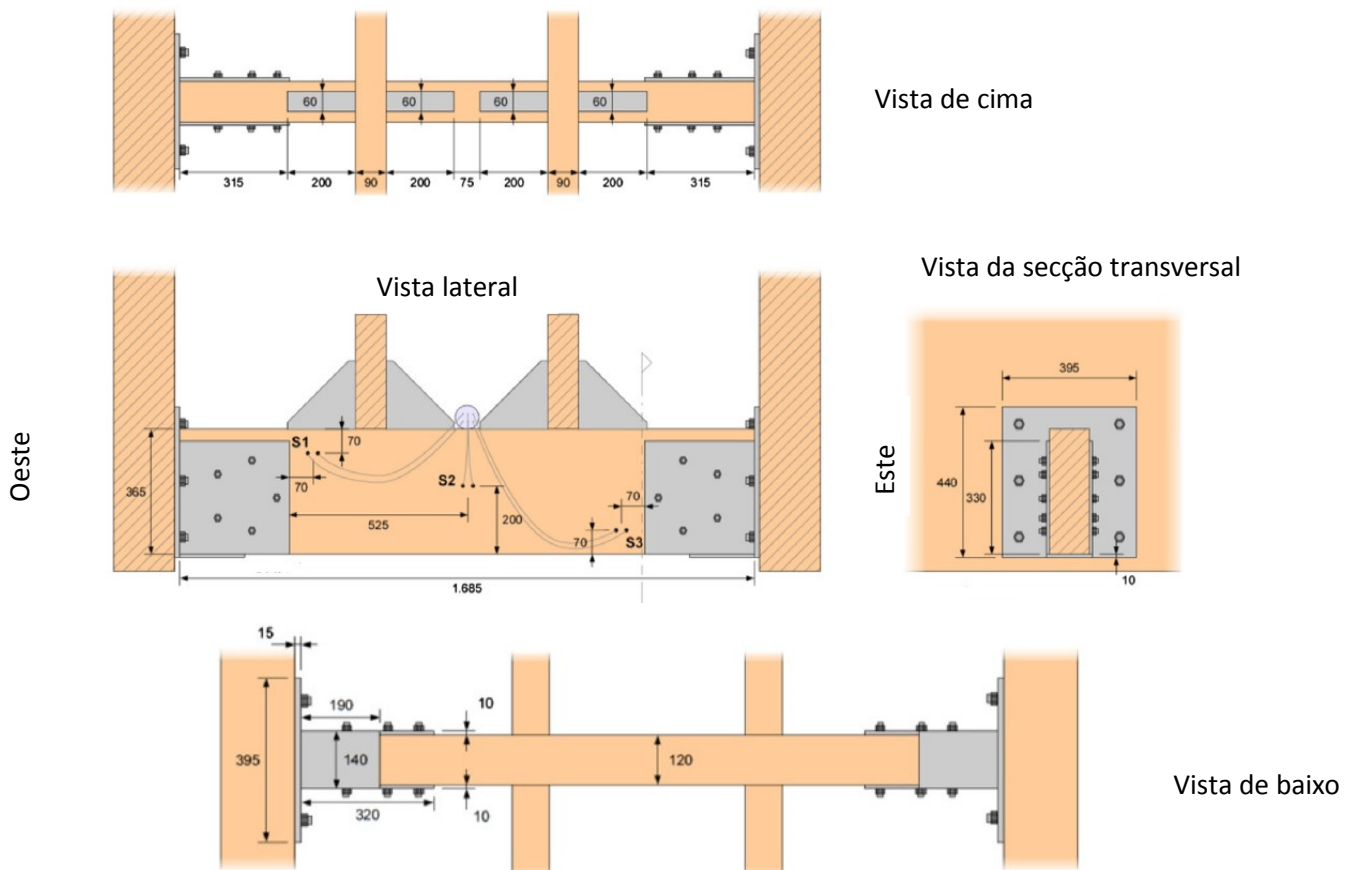


Figura 52 - Pormenor da posição dos sensores (Fortino, 2013)

Os testes, realizados em laboratório, mostraram que não houve influência significativa das chapas de aço nas medições. Os eléctrodos foram colocados numa cavidade maior e depois essa cavidade foi selada, para evitar que a água sobre a superfície não conduzisse a valores elevados (errados) de teor de humidade (Fortino, 2013). Os valores obtidos das medições in situ são os da resistência eléctrica, R , temperatura do ar, T_{air} , e humidade relativa, RH , correspondendo aos três sensores (Fortino, 2013).

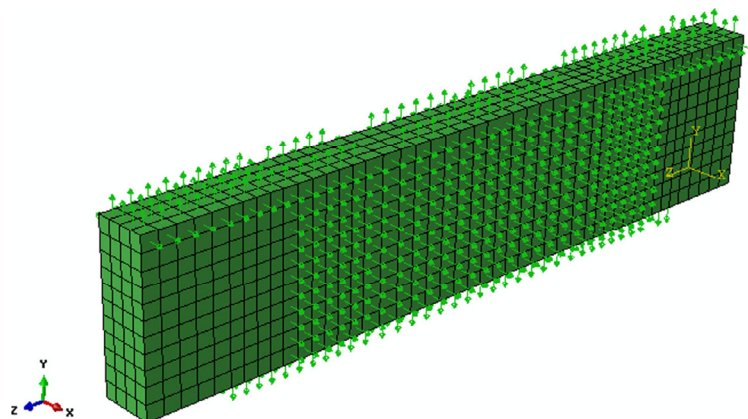


Figura 53 - Modelo Abaqus –fluxos da humidade (ou temperatura) na madeira (Fortino, 2013)

Segundo Forsén, 2000, as equações que relacionam a temperatura da madeira, resistência eléctrica e teor de humidade são:

$$\log(\log(R) + 1) = a.MC + b \quad (63)$$

onde:

R – resistência eléctrica;

MC – teor em água;

a e b – parâmetros de calibração.

$$MC_{corr} = \frac{0.00147 \ln(10) + \ln(\exp(aMC_{meas} \ln(10) + b \ln(10)) + 1) - 1.075 \ln(10)}{\ln(10) \cdot (0.000158T + 0.0262)} \quad (64)$$

onde:

MC_{meas} – teor em água medido;

T – temperatura.

Numa calibração, com gamas entre os $-10 \text{ °C} \leq T \leq 70 \text{ °C}$, os parâmetros de calibração para o Espruce da Noruega são $a = -0.037$ e $b = 1.054$. (Forsén, 2000)

No caso das simulações numéricas, os dados relativos ao teor de humidade não são suficientes para levar em conta o efeito das variações diárias de RH e que são importantes para estimar as variações dos gradientes de humidade próximo da superfície da viga. Além disso, existe uma lacuna na informação das condições iniciais da viga de madeira laminada colada, no início da sua vida útil antes de se iniciarem as medições. No caso da realização das simulações numéricas são descritos os seguintes pressupostos:

- São só considerados os efeitos de humidade relativa e temperatura, devido ao facto das vigas de madeira lamelada colada não estarem expostas à precipitação e radiação solar, ver Figura 53 (Fortino, 2013);
- O clima sob a ponte é assumido como sendo igual ao da estação meteorológica localizada na zona do aeroporto de Lisboa (Figura 54). Os dados fornecidos a cada 6h, são fornecidos pelo Instituto Meteorológico da Finlândia (IMF), esta suposição é considerada razoável, pois a localização da ponte estudada não está muito longe da área do aeroporto (Fortino, 2013);

- O teor de humidade inicial, é assumido como sendo $MC0 = 17\%$, que é o valor médio das medições correspondentes aos três sensores a 17.01.2007. O estado de humidade inicial é então identificado por $MC0$ e pelo valor inicial correspondente à humidade relativa $RH0 = 0,828$, deste modo, a análise começa a partir de um ponto de equilíbrio. A massa volúmica da madeira seca utilizada é $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$ (Fortino, 2013).
- De modo a evitar uma forte influência das condições iniciais sobre os resultados numéricos, as comparações com as medições começaram a partir de 01.02.2007. Assim, o período de análise inclui 238 dias (de 17.01.2007 a 11.09.2007), enquanto as comparações entre os valores numéricos e medidos referem-se a um período de 223 dias (de 01.02.2007 a 11.09.2007) (Fortino, 2013).

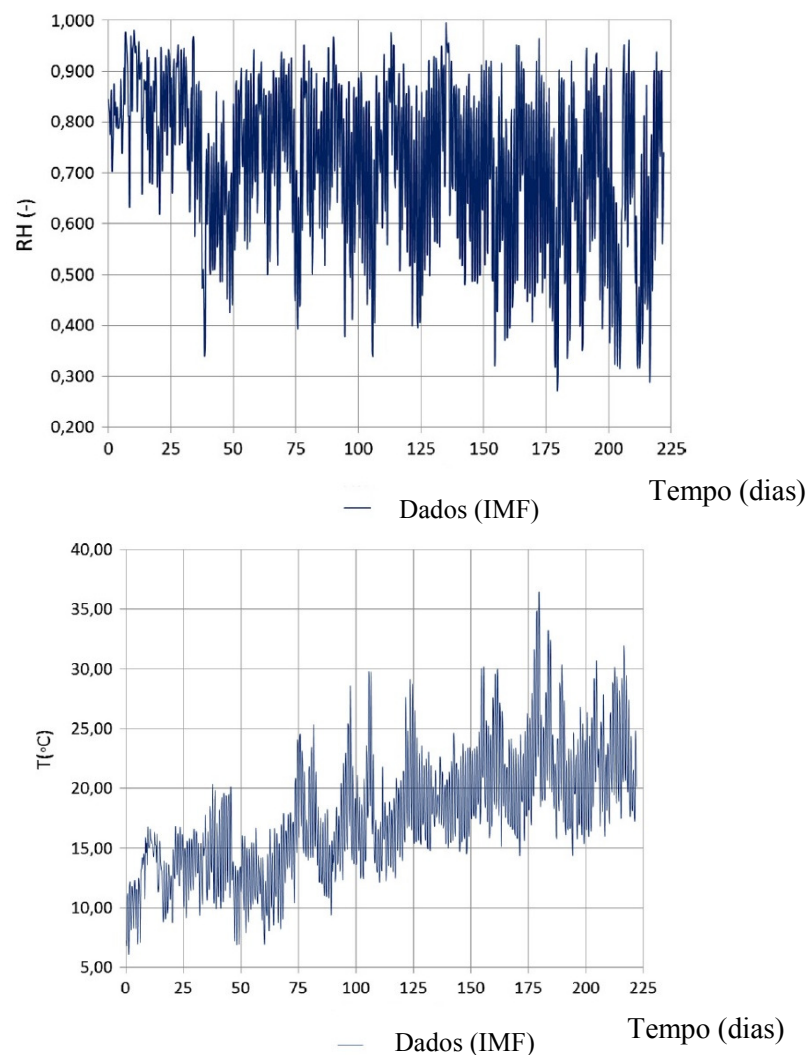


Figura 54 - Curvas de humidade relativa (RH), cima, Curvas de temperatura (T), baixo, Instituto de Meteorologia da Finlândia (IMF). Período de 01.02.2007 (tempo - 0 dias) a 11.09.2007 (tempo - 222 dias) (Fortino, 2013)

Os resultados numéricos obtidos, em termos de MC durante o ensaio foram obtidos na superfície, a uma profundidade de 1,5 cm da superfície da viga. Os resultados numéricos mostram concordância com as medições efectuadas, ver anexo Figura 90 (Fortino, 2013).

Pode-se observar que os valores do sensor 1 são ligeiramente maiores, tal facto pode dever-se à localização do sensor 1, que está mais próximo da superfície, quando comparado com as localizações dos sensores 2 e 3, pois fica sujeito à água que vem da passagem superior (Fortino, 2013).

Foi, também, realizada uma análise do estudo de caso com um coeficiente de permeabilidade correspondente a um revestimento resina alquídica, a fim de estudar a influência de revestimentos mais eficazes, os resultados obtidos podem ser observados na Figura 91, do anexo, para o caso do sensor 2 a uma profundidade de 1,5 cm (Fortino, 2013).

Analisando a Figura 91, do anexo, observa-se que os valores obtidos de humidade, no tempo, na presença de resinas alquídicas, parecem muito mais suave do que os da situação real com tinta fraca sobre a superfície (Fortino, 2013).

Foram realizados ensaios do teor de humidade ao longo da espessura da viga, em diferentes períodos de 2007, começando na Primavera (10.3.2007 a 10.4.2007), no início do verão (Junho de 2007) e fim do verão (Agosto de 2007) e podem ser observados na Figura 92, do anexo. (Fortino,2013) Com base nos dados fornecidos pelo IMF, os valores máximos das variações diárias da humidade relativa ($\Delta RH_{d,max}$) para os períodos de estudo estão apresentados na Tabela 19, do anexo, juntamente com as datas em que esses valores foram alcançados e os picos de humidade relativa (RH_{peak}) nessas datas. Nos mesmos períodos, os valores máximos numéricos dos gradientes positivos (calculados 10 mm a partir da superfície, correspondentes aos três sensores) estão apresentados na Tabela 20, do anexo (Fortino, 2013).

A Tabela 20, do anexo mostra que os gradientes alcançados em agosto (final do Verão) são ligeiramente mais elevados do que os do início da Primavera, enquanto os menores valores são atingidos em Junho (início do verão) em relação aos períodos estudados. Isto está relacionado com mudanças mais uniformes de picos de RH em Junho de 2007 (Fortino, 2013).

Segundo Fortino, 2013, os elementos de madeira directamente expostos ao sol e à chuva, vão ter maiores gradientes de teor de humidade, entre a camada exterior e as camadas interiores da madeira, aumentando assim as fissuras relacionadas com as intempéries. Os resultados do estudo mostram que a modelagem numérica pode ser usada juntamente com os dados meteorológicos para melhorar a avaliação e monitorização de pontes de madeira. O modelo numérico apresentado também pode ser usado para avaliar o detalhe de áreas sensíveis em relação à humidade durante a fase de projecto (como recantos, conexões e outras zonas de acumulação de água).

Segundo Frühwald, 2008, metade dos fracassos com a madeira, e outras estruturas, estão relacionadas com a fase de projecto. Melhorar o projecto relativamente à influência da humidade é importante para a operacionalidade e segurança das pontes de madeira, especialmente para prevenir riscos ligados a variações significativas de humidade relativa.

Em forma de síntese pode-se concluir que:

- O método é capaz de simular os estados de humidade em cada ponto de um elemento de madeira da ponte (protegido do sol e da chuva) usando como base os dados da humidade relativa e temperaturas históricas fornecidas por uma estação meteorológica próxima da ponte (Fortino, 2013);
- Gradientes de humidade elevados na periferia das superfícies externas são causados por variações diárias de humidade relativa em diferentes períodos sazonais (Fortino, 2013);
- A influência de um possível revestimento protector é importante para reduzir significativamente os picos de humidade nos elementos de madeira, bem como os gradientes de humidade (Fortino, 2013).

A ponte situada na Avenida Marquês da Fronteira, em Lisboa, foi construída pela empresa Carmo, é uma ponte relativamente recente, inaugurada a 14.12.2012, tem cerca de 100 metros de comprimento e uma largura de 5 metros, a sua forma é em Zig Zag, descendo de um patamar mais elevado para outro, vencendo um vão livre de 50 metros, (ver mais Figuras no anexo, 93 a 98) (Newsletter Carmo n.º31, Julho de 2013).

Tal como a ponte do Parque Expo, e segundo a classificação do tipo de clima da Europa - Köppen-Geiger, para Lisboa, esta ponte está incluída no clima Mediterrâneo quente (Fragiacomo, 2011).



Figura 55 – Ponte Pedonal em Madeira Lamelada Colada - Avenida Marquês da Fronteira – Lisboa (Almeida, 2013)

A orientação da ponte é Noroeste-Sudeste logo as suas faces estão viradas a Nordeste e Sudoeste, ver orientação da ponte na Figura 99, do anexo.

A maior degradação dar-se-á nas faces a Sudoeste, devido ao facto da incidência solar se dar maioritariamente nas mesmas. Esta ponte por ser relativamente nova, não apresenta degradação relevante, embora em certas zonas haja elementos de madeira que apresentam resina, como mostra a Figura 100, do anexo, e na entrada a ponte alguns elementos de madeira que formam o passadiço estão empenados, como se pode observar no anexo, na Figura 101.

A ponte situada em Stavanger na Noruega, (ver Figura 102, do anexo) foi construída pelo grupo Stangeland Maskin AS, e erguida em Abril de 2009, tem um vão de 25,2 metros e uma largura de 3,5 metros (ver mais Figuras no anexo, 103 a 108).

Esta ponte tem uma estrutura mista de madeira lamelada colada e aço, em que as vigas de madeira lamelada estão protegidas por placas de aço, e com protecções laterais em aço visto ser uma ponte sobre a linha férrea.

A ponte apresenta alguns problemas de degradação, devido à exposição solar, efeitos gelo degelo, e pela sua proximidade ao mar, como se pode observar nas seguintes Figuras 56 e 57.



Figura 56 - Degradação da viga principal (Almeida, 2013)



Figura 57 - Degradação da plataforma da ponte/Pate inferior da ponte (Almeida, 2013)

Tal como ponte do Parque Expo, em Lisboa, esta ponte está orientada a Nascente-Poente, (ver orientação da ponte na Figura 109, do anexo), sendo que as faces a Sul serão as mais desfavoráveis devido ao facto da incidência solar se dar maioritariamente nas mesmas. A classificação do tipo de clima da Europa - Köppen-Geiger, para Stavanger, desta ponte é o clima temperado húmido com verão temperado (Vetmeduni Vienna, 2013).

Por último a ponte Leonardo situada em Ås, perto de Oslo, (ver Figura 58) foi construída pela empresa Moelven, Limtre AS e erguida em 2001. É uma ponte com 108 metros de comprimento, um vão principal de 40 metros, 10 metros de altura e 5 metros de largura. (ver mais Figuras no anexo, 110 e 111, 113, 114 e 115) (<http://broer.no>, 2013).



Figura 58 - Ponte Pedonal em Madeira Lamelada Colada - Ås – Noruega (Rage, 2011)

Os principais sistemas utilizados foram:

- Cada lamela dos arcos foi tratada sob pressão com Scanimp, um metal pesado;
- As peças de madeira lamelada colada que formam o arco foram tratadas com uma emulsão de resina à base de água com o nome de Ultrawood de modo a obter uma superfície impermeável;
- De modo a prevenir a penetração de água na estrutura, esta foi tratada com duas camadas de verniz, (este tratamento tem que se repetir de poucos em poucos anos);
- Para assegurar protecção extra à madeira lamelada colada dos arcos, devido à sua exposição à humidade, foram introduzidas barras em buracos pré feitos junto dos suportes laterais. Estas barras permanecem inactivas enquanto a madeira se mantiver seca (Structure Magazine, 2005).

Tal como ponte do Parque Expo, em Lisboa, e a ponte e, Stavanger, esta ponte está orientada a Nascente-Poente, (ver orientação da ponte na Figura 112, do anexo), sendo que as faces a Sul serão as mais desfavoráveis devido ao facto da incidência solar se dar maioritariamente nas mesmas. A classificação do tipo de clima da Europa - Köppen-Geiger, para Ås, desta ponte é o clima temperado frio sem estação seca e com Verão curto e fresco. A classe de resistência da madeira utilizada é GL 36c (Structure Magazine, 2005) (Vetmeduni Vienna, 2013).

9. CONCLUSÃO

9.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A madeira é um material bastante complexo, devido à sua constituição, e é utilizado há inúmeros anos pelo homem para diferentes fins, como o caso de abrigos, pontes, etc.

As propriedades físicas e mecânicas da madeira são influenciadas por diversos factores, tais como agentes biológicos, atmosféricos, etc. De forma, a reduzir o impacto destes factores na madeira e a obter um produto com melhores características, esta tem sido submetida, ao longo dos tempos, a testes/ensaios, com o fim de, assim, melhorar o seu desempenho.

A madeira lamelada colada, sendo um produto derivado da madeira, foi descoberta através desses mesmos testes/ensaios, com vista a obter um produto com melhores características, quando comparada com a madeira tradicional. Para que isto se consiga, torna-se necessário submeter a madeira a vários tratamentos descritos em detalhe no decorrer deste trabalho.

A MLC, possui inúmeras vantagens, como por exemplo a possibilidade de se criarem elementos curvos e/ou de secção variável, leveza, harmonia de formas e beleza natural do material, adaptabilidade, possibilitando as mais variadas formas, e excepcional estabilidade e comportamento ao fogo, entre outras também descritas na dissertação.

Material sustentável bastante utilizado, nos dias de hoje, na construção de estruturas, pode ser aplicado em coberturas ou pontes, principalmente em pontes pedonais, devido ao facto das suas características físicas e mecânicas permitirem o seu fácil enquadramento na natureza.

Pode ser utilizada em diversos tipos de pontes, tais como pontes em arco, consola, com tirantes etc.

Existem também normas específicas à utilização de madeira lamelada colada, que complementam a regulamentação em vigor, como por exemplo, a EN 386 (norma de produção e controlo), EN 14080 (Características), NP EN 1194 (Classes de Resistência).

A madeira é atacada por diferentes agentes: atmosféricos, biológicos e acção do fogo. Consoante as diferentes espécies de madeira, estas são mais ou menos atacadas pelos agentes biológicos, sendo que estes são considerados os maiores causadores de anomalias na madeira.

A inspecção visual também é um método importante na inspecção e diagnóstico de estruturas de madeira. Ao visualizarmos a estrutura podemos saber que tipos de problemas estão a afectá-la e assim proceder à sua reparação, conforme descrito no plano de monitorização.

Deve existir também um plano de ensaios, para se poder controlar a resistência da estrutura ao longo do tempo, ou seja, com o passar dos anos a estrutura vai perdendo capacidades, e assim podemos ter um histórico da sua resistência, podendo ser adoptadas medidas para o seu reforço, caso este seja necessário.

Analisaram-se quatro pontes pedonais em madeira lamelada colada, em dois países, Portugal e Noruega, sendo que as duas situadas na Noruega se encontram em zonas geográficas e climáticas distintas, uma na costa oeste e outra no interior, perto da capital, Oslo.

Três das pontes têm a mesma orientação (nascente-poente), como é o caso da ponte no Parque das Nações, Lisboa e das duas na Noruega (Stavanger e Oslo). A ponte situada na Av. Marquês da Fronteira, em Lisboa, projecto da empresa Carmo, tem uma orientação diferente, sendo a mesma Noroeste-Sudeste.

Nenhuma das pontes analisadas apresenta um elevado estado de degradação, contudo, a ponte em Stavanger, Noruega apresenta um maior grau de degradação quando comparada com as restantes. A ponte situada no Parque das Nações, Lisboa, apresenta também uma acentuada degradação nas faces a Sul, devido à maior exposição solar.

A ponte da Av. Marquês da Fronteira, em Lisboa é relativamente recente, não apresentando degradação relevante. O único facto a referir será o de, em alguns elementos, serem visíveis pontos de concentração de resina, e de alguns elementos de madeira no passadiço apresentarem empenamentos.

De todas as pontes analisadas, a que se encontra em melhor estado de conservação é a ponte Leonardo, apesar de ser a mais antiga das quatro. Provavelmente terá um melhor processo de monitorização, pois não apresenta quaisquer indícios de degradação. Na Noruega, consoante a importância das estruturas, estas são mais ou menos monitorizadas. A ponte Leonardo foi um projecto bastante conhecido, tornando assim importante uma regular monitorização da mesma com um nível superior face às restantes.

9.2. PROJECTOS FUTUROS

As seguintes alíneas poderão constituir desenvolvimentos de projectos futuros:

- O levantamento de todas as patologias de algumas pontes pedonais em madeira lamelada colada, podendo assim fazer uma comparação, segundo a sua localização/constituição;
- A monitorização da ponte na Av. Marquês da Fronteira em Lisboa;
- Realização de um estudo de caso similar ao deste trabalho mas aplicado a outro tipo de estruturas de madeira lamelada colada (coberturas, terraços, etc.);
- A utilização de elementos de madeira lamelada colada em conjunto com outros tipos de materiais para ligações, e saber qual a melhor combinação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACS: Wood deterioration and preservation: advances in our changing world, American Chemical Society symposium series 845, edited by Barry Goodell, Darrel D. Nicolas and Tor P. Schultz, Washington, 2003.

AITC (1998) AITC 109-98 - Standard for preservative treatment of structural glued laminated timber. American Institute of Timber Construction. Englewood (CO).

ARRIAGA, F.; BOBADILLA, I. ; ESTEBAN, M.; GARCIA, F. ; PERAZA, F.: Intervención en estructuras de madera, 2002.

BARNES, H. M.: “Wood preservation“, *Encyclopedia of pest management*, volume II, edited by David Pimentel, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, FL, 2007.

Bois Lamellés Collés en Europe: France, 1992.

BONDUELLE, G.: Propriedades Térmicas da Madeira, 2008.

BRISCHKE, C, RAPP AO, BAYERBACH R.: Measurement system for with internal conductively glued electrodes. *Build Environ* 2008;43(10):1566–74.

CACHIM, PAULO B.; Construções em madeira - A madeira como material de construção. Publindústria, Porto, 2007.

CAPUZ LLADRÓ, R.: Métodos de ensayos no destructivos para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Espanha, 2003.

CARLING, O.: Livro MLC – MLC Sueca AB, Estocolmo, 2001.

CARVALHO, A.: Madeiras Portuguesas – Estrutura Anatômica, Propriedades, Utilizações, Instituto Florestal Vol. I, 1996.

CARVALHO, A.: Madeiras Portuguesas – Estrutura Anatômica, Propriedades, Utilizações, Vol. II, Direcção Geral de Florestas, Lisboa, 1996.

CARVALHO, A.: Isotérmica de sorção da madeira de pinho marítimo (*Pinus Pinaster* Ait.), Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2009.

CARVALHO, P. A.: Avaliação técnica e económica de estruturas de cobertura de grande vão em madeira lamelada colada, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Construções Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

CÓIAS, V.; Inspeções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios, IST, 2009.

CORMA, CORPORACION CHILENA DE LA MADERA - Manual - La construccion de viviendas en madera. Chile.

COUTINHO, J.: Materiais de Construção 1 – Madeiras, 1999.

CRUZ, H; MACHADO, J. S.; NUNES, L.: Problemas de conservação de madeira em edifícios. 2ª ENCORE, LNEC, Junho 1994.

CRUZ, H.; RODRIGUES, M.: Madeira para construção – M9 – Humidade da madeira, LNEC, Lisboa, 1997.

CRUZ, H; MACHADO, J. S.; NUNES, L.: Inspeção e avaliação de estruturas de madeira. Seminário sobre Estruturas de Madeira, Reabilitação e Inovação. Organizado por GECORPA. LNEC, Setembro 2000.

CRUZ, H.: Patologias, avaliação e conservação de estruturas de madeira. II Curso Livre Internacional de Património. Associação Portuguesa dos Municípios com centro histórico. Fórum UNESCO Portugal. Lisboa: LNEC, 2004.

CRUZ, H.; NUNES, L.: “Madeira”, *Materiais de construção - Guia de utilização*. Edição Arquitectura e vida, Engenharia e vida, 2005.

CRUZ, H.: Estruturas de madeira lamelada colada em Portugal. Instrumentos para a garantia da qualidade, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série II, nº1, LNEC, Lisboa, 2007.

CRUZ, H.; NUNES, L.: A madeira como material de construção. Lisboa: LNEC, 2008.

CRUZ, H.: Estruturas de Madeira - Durabilidade – A importância dos pormenores, Construção Magazine nº27, Publindústria, 2008.

CRUZ, H.; NUNES, L.: Estruturas de Madeira - Durabilidade e Protecção de Estruturas de Madeira, Construção Magazine nº34, Publindústria, 2009.

EDLUND, M.-L.; NILSSON, T.: “Testing the durability of wood”. *Materials and Structures*, volume 31, issue 213, 1998.

Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures – TEMTIS - Handbook 1 – Timber Structures.

EN 335-2 (2006), Durability of wood and wood-based products – Definition of use classes – Part 2: Application to solid wood, European Committee for Standardization, Brussels.

EN 338 (2009), Structural timber – Strength classes, European Committee for Standardization, Brussels.

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, European Committee for Standardization, Brussels.

EN 384 (2010), Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density, European Committee for Standardization, Brussels.

EN 386 (2009), Glued laminated timber — Performance requirements and minimum production requirements.

EN 1991-1-1 (2002), Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1.1 – General actions: Densities, self-weight and imposed loads.

EN 1991-1-3 (2002), Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1.3 – Snow loads.

EN 1991-1-4 (2002), Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1.4 – Wind loads.

EN 1991-1-5 (2002), Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1.5 – Thermal actions.

EN 1991-1-6 (2002), Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1.6 – Actions during execution.

EN 1991-1-7 (2002), Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1.7 – General actions: Accidental actions due to impact and explosions.

EN 1991-2 (2002), Eurocode 1 – Actions on structures – Part 2 – Traffic loads on bridges.

EN 1995-1-1 (2004), Eurocode 5 – Design of timber structures, Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussel.

EN 1995-1-2 Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design.

EN 1995-2 Design of timber structures – Part 2: Bridges.

EN 14080, Timber structures - Glued laminated timber – Requirements.

EN 14081.1 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1 – General requirements.

EN 14081.2 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 2 – Machine grading: additional requirements for initial type testing.

EN 14081.3 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3 – Machine grading: additional requirements for factory production control.

EN 14081.4 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 4 – Machine grading: grading machine settings for machine controlled systems.

ESTEVES, C.: Identificação das Propriedades de Difusão na Madeira Pinus Pinaster Aiton. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2009.

FENGEL, D.; WEGENER, G.: *Wood-Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Ed: Walter de Gruyter. Berlin, New York, USA, 1989.

FEIO, A.; Ensaio não destrutivo em estruturas de madeira - Métodos globais de ensaio. in *Engenharia e Vida*, n.º 30, Lisboa, 2007.

FISCHESSER, B.: *Conhecer as árvores*. Publicações Europa-América, Mem-Martins, Janeiro 2005.

FOREST PRODUCTS LABORATORY: Wood Handbook - Wood as an engineering material, Madison, 1999.

FORSÉN H, TARVAINEN V.: Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. VTT, Espoo, Research, Report 79; 2000.

FORTINO, S., GENOESE A., NUNES L., PALMA P.: Numerical modelling of the hygro-thermal response of timber bridges during their service life: A monitoring case-study, Construction and Building Materials 47 (2013) 1225–1234.

FRAGIACOMO, M, FORTINO S, TONONI D, USARDI I, TORATTI T.: Moisture-induced stresses perpendicular to grain in timber sections exposed to European climates. Engineering Structures 2011; Vol. 33 (11).

FRÜHWALD, E, SERRANO E, TORATTI T, EMILSSON A, THELANDERSSON S.: Design of safe timber structures – how can we learn from structural failures in concrete, steel and timber? Research report TVBK-3053. Lund University; 2008. ISSN: 0349-496.

GASPAR, F.; CRUZ, H.; NUNES, L.; GOMES, A.: Fabrico de estruturas lameladas-coladas com madeira de pinho bravo tratada em autoclave, 2005.

GOLDSTEIN, I.S.: Overview of the chemical composition of wood. In: *Wood Structure and composition*. Ed: Menachem Lewin and Irving S. Goldstein, New York, 1991.

HENRIQUES, M. D.: Sistemas estruturais em madeira lamelada colada, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2002.

HENRIQUES, M. D.: Tratamento e Consolidação de Madeira de Pinho Degradada em Elementos Estruturais de Edifícios Antigos. Tese aprovada em provas públicas para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil. Lisboa, 2011.

Humidade Equilíbrio Madeira: Apontamentos - Escola Superior de Tecnologia de Viseu.

HUMPHRIES, C. J. ; SUTTON, J. R.: Árvores de Portugal e Europa. Fundo Para a Protecção dos Animais Selvagens (FAPAS) ; Camara Municipal do Porto, Porto, 1996.

IBACH, R.: “Chapter 14 - Wood preservation” *Wood handbook - Wood as an engineering material*. Gen. Tech. Rep. FPL - GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999.

LAMPREIA, N.: Utilização de promotores de adesão no fabrico de estruturas de madeira lamelada colada de Pinho bravo. Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização de Estruturas. Instituto Superior de Lisboa. Lisboa, 2010.

LNEC: *Ficha M4: Casquinha*. Série: Madeira para construção. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1997.

LNEC: *Ficha M9: Humidade da madeira*. Série: Madeira para construção. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1997.

LOUZADA, J.L.P.C.: Apontamentos não Editados.

MACHADO J. S.: Madeiras de Folhosas e Resinosas. Nomenclatura Comercial. ITES 11. LNEC, Lisboa, 1996, p. 64.

MACHADO, J. S., CRUZ, H.; NUNES, L.; MONTEIRO, G.: Madeira para construção – M1 – Especificação de madeiras para estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1997.

MACHADO, J. S., MONTEIRO, G.: Madeira para construção – M4 – Casquinha, LNEC, Lisboa, 1997.

MACHADO, J. S.; CRUZ, H.: Avaliação não destrutiva de elementos estruturais de madeira in-situ. Revista Florestal, Vol.XI, nº2, Julho/Dezembro 1998, p32-36.

MACHADO, J. S.; CRUZ, H., NUNES, L.: Inspeção de elementos estruturais de madeira. Selecção de técnicas não destrutivas a aplicar in-situ. Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas - REPAR. LNEC, Lisboa, 2000.

MACHADO, N.: Variação Dimensional da Madeira devida ao seu Comportamento Higroscópico. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção de Edifícios. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.

MARQUES, L.: O Papel da Madeira na Sustentabilidade da Construção. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Porto, 2008.

MARTINS, S.: Estruturas de Madeira – Inspecção e Diagnóstico. Aplicação em Caso de Estudo, 2009.

MARTINS, T.: Dimensionamento de Estruturas em Madeira - Coberturas e Pavimentos. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2010.

NEGRÃO, J.; FARIA, A.: Projecto de Estruturas de Madeira, Publindústria, Porto, 2009.

NOBRE, T.; NUNES, L.: Preliminary assesment of the termite distribution in Portugal. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2001.

NOBRE, T.; NUNES, L.; EGGLETON, P.; BIGNELL, D. E.: “Distribution and genetic variation of Reticulitermes (Isoptera: Rhinotermitidae) in Portugal”, *Heredity*, n.º 96, 2006.

NP 180:1962. Anomalias e defeitos da madeira.

NP EN 386 (2009), Madeira lamelada-colada. Requisitos de desempenho e requisitos mínimos de fabrico, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP 3672 (1990), Colas. Terminologia. Definições, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 392 (2002), Madeira lamelada-colada. Ensaio de corte pelas linhas de colagem, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 460 (1995), Durabilidade da madeira e de produtos derivados. Durabilidade natural da madeira maciça. Guia de exigências de durabilidade das madeiras na sua utilização segundo as classes de risco, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 1194 (1999), Estruturas de Madeira. Madeira lamelada colada. Classes de resistência e determinação dos valores característicos.

NUNES, L.: “Preservação de madeiras para a construção: Situação actual e perspectivas futuras”. LNEC, COM 79, Lisboa, 2001.

NUNES, L.; Nobre, T.: “Controlo de térmitas subterrâneas em construções” - *3th International Seminar Historical Constructions 2001*, Guimarães, Portugal, 2001.

NUNES, L.; SOUSA, P. P.: “Durability - Preservative treatment” in *Timber Engineering STEP 1*, Centrum Hout, 1995.

prEN 1912:1995: Structural timber – Strength classes – Assignment of visual grades and species.

OSES, R.; VALENZUELA, S.; FREER, J.; BAEZA, J.; RODRIGUEZ, J.: “ Evaluation of fungal endophytes for lignocellulolytic enzyme production and wood biodegradation” *International Biodeterioration & Biodegradation*, n.º57, 2006.

PACHECO, P.: Automatização do processo de dimensionamento das estruturas de betão armado de acordo com o EC2. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2011.

PARHAM, R.A.: Ultra-structure and chemistry. *In: Pulp and Paper Manufacture. Properties of fibrous raw materials and their preparation for pulping. Vol1.* Ed: Kocurck, M. J.; Stevens, C.F.B, 1982b.

PEREIRA, H.; GRAÇA, J.; RODRIGUES, J.C.: Wood chemistry in relation to quality. *In: Wood quality and its biological basis.* Ed. Barnett J.R.; Jeronimidis G.. CRC Press Oxford, 2003.

PETTERSEN, R. C.: The chemical composition of wood. *In: The chemistry of solid wood.* Ed. Roger M. Rowell. Advances in Chemistry Series 207.(1984), 614pp.

RESSEL JB.: Fundamentals of wood moisture content measurement”. COST E53 training school “methods for measuring of moisture content and assessment of timber quality. Hamburg: BFH, 2006.

RIBEIRO, D.; MARQUES, H.; PINTO, G.; PINTO, P.; TEIXEIRA, C.: The contribution of research for the development and competitiveness of Southwest European forest sector” - PROJECTO – DEFOR, INTERREG III B SUDOE DEFOR SO2 /1.3/F64, 2008.

RIDOUT, B.: Timber decay in buildings - The conservation approach to treatment. English Heritage ; Historic Scotland, London, 2000

SÁNCHEZ, F.; Proteccion preventiva de la madera. AITIM, Madrid, 2001.

SANTOS, J.; DUARTE, M.; SANTOS, J.; PESTANA, L.,: Bem Utilizar Madeiras Portuguesas na construção/reabilitação. 1º Congresso/1º Congresso Ibero-Latino Americano da madeira na Construção, 2011.

SANTOS, J.: Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira. Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica. Universidade do Minho. Guimarães, 2007.

SARDINHA, A. M.: Ciência e Tecnologia dos Materiais – Capítulo III. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 1988.

SELLERS, T; MILLER, G D, Evaluations of three adhesive systems for CCA-treated lumber. Forest Products Journal 47(10): 73-76, Madison, 1997.

SILVA, M.: Apontamentos de Tecnologia dos Produtos Florestais – Composição química da madeira. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), 2010.

SOUSA, R.: Avaliação Experimental da Estabilidade Dimensional de Elementos em Pinho Bravo e Madeira Tratada Termicamente. Dissertação de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Construção e Reabilitação Sustentáveis. Universidade do Minho, 2012.

Structure Magazine, 2005.

SVENSSON, S, TURK G, HOZJAN T.: Predicting moisture state of timber members in a continuously varying climate. Engineering Structures 2011; 2011(33):3064–70.

SZÜCS, C. A.; TEREZO, R. F.; VALLE, A.; MORAES, P. D.: Estruturas de Madeira, Universidade Federal de Santa Catarina – Centro Tecnológico – Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, 2006.

TANNERT T, BERGER R., MUELLER A, VOGEL M.: Remote moisture monitoring of timber bridges: a case study. In: Proceedings of the 5th international conference on structural health monitoring of intelligent infrastructure (SHMII-5) 2011, 11–15 December 2011, Cancún, México, 2011.

TASCIOGLU, C; GOODELL, B; LOPEZ-ANIDO, R, Bond durability characterization of preservative treated wood and E-glass/phenolic composite interfaces. Composites Science and Technology 63: 979-991, 2003.

TSOUMIS, G.: Science and Technology of Wood - Structure, Properties, Utilization. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991, 494pp.

VICK, C. B.: Adhesive Bonding of Wood Materials – Chapter 9 – Wood Handbook – Wood as an engineering material, Forest Products Laboratory, Madison, 1999.

WARDROP, A.B.: The phase of lignification in the differentiation of wood fibers. TAPPI **40**, 1957.

WILLIAMSON, T.: APA Engineered Wood Handbook, Estados Unidos da América: MCGRAW-HILL EDUCATION, 2001.

ZOBEL, B. J., VAN BUIJTENEN, J. P.: Wood Variation - Its Causes and Control. Springer Series in Wood Science, Ed: Timell, T. E., Springer-Verlag, 1989.

Sítios da Internet:

<http://www.madeidura.com/publicacoes/caracteristicas-e-propriedades-da-madeira>, Características e propriedades da madeira, Madeidura, (acedido em 14 de Agosto de 2013)

<http://empe.fe.up.pt/node/44>, Exploração Multidisciplinar de Problemas de Engenharia (acedido em 14 de Agosto de 2013).

http://woodlandstewardship.org/?page_id=855, Woodland Stewardship (acedido em 21 de Agosto de 2013).

<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/792343/1/Tese%2017.Dez.pdf>, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO (acedido em 21 de Agosto de 2013).

<http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/Madeiras%2099.pdf>, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (acedido em 21 de Agosto de 2013).

<http://www.swiss-timber-bridges.ch/detail/684>, Swiss Timber Bridges (acedido em 21 de Agosto de 2013).

<http://www.hikr.org/gallery/photo53980.html>, HIKR (acedido em 21 de Agosto de 2013).

<http://www.letchworthparkhistory.com/pbjournal.html>, Letchworth Park History (acedido em 21 de Agosto de 2013).

http://jb.utad.pt/especie/pinus_sylvestris, Ficha da Espécie *pinus sylvestris* L., Jardim Botânico (acedido em 21 de Agosto de 2013).

<http://portaldamadeira.blogspot.no/2009/10/propriedades-fisicas-da-madeira.html>, Portal da Madeira (acedido em 6 de Setembro de 2013).

<http://portaldamadeira.blogspot.no/2010/03/madeira-lamelada-colada-mlc.html>, Portal da Madeira (acedido em 7 de Setembro de 2013).

http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook1_final.pdf, Fakulta stavební (acedido em 7 de Setembro de 2013).

http://www.svensktra.se/MediaBinaryLoader.axd?MediaArchive_FileID=5d2af5f6-f83e-4276-bb22-851cc1efe762&FileName=Factsheets.pdf, Svenskt Trä (acedido em 7 de Setembro de 2013).

<http://www.infomadera.net/> (acedido em 7 de Setembro de 2013).

https://www.akzonobel.com/cascoadhesives/products_solutions/construction_timber/finger_jointing/, Akzo Nobel (acedido em 9 de Setembro de 2013).

<http://www.jular.pt/pdf/Vigas-madeira-lamelada.pdf>, Jular (acedido em 9 de Setembro de 2013).

<http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/shifts.htm>, WORLD MAPS OF KÖPPEN-GEIGER CLIMATE CLASSIFICATION (acedido em 20 de Setembro de 2013).

<http://broer.no/bro/index.php?ID=3>, Broer (acedido em 20 de Setembro de 2013).

<http://caloniedoesart.wordpress.com/art-chitecture-i-the-artistry-of-buildings/art-chitecture-ii-the-artistry-of-bridges-2/> (acedido em 28 de Setembro de 2013)

ANEXO

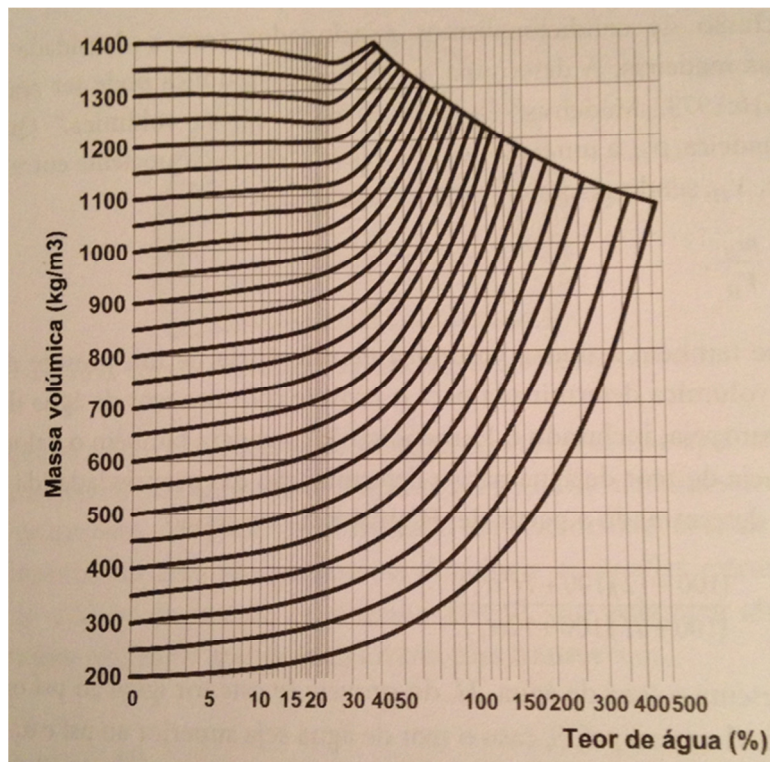


Figura 59 - Ábaco de Kollmann (Cachim, 2007)

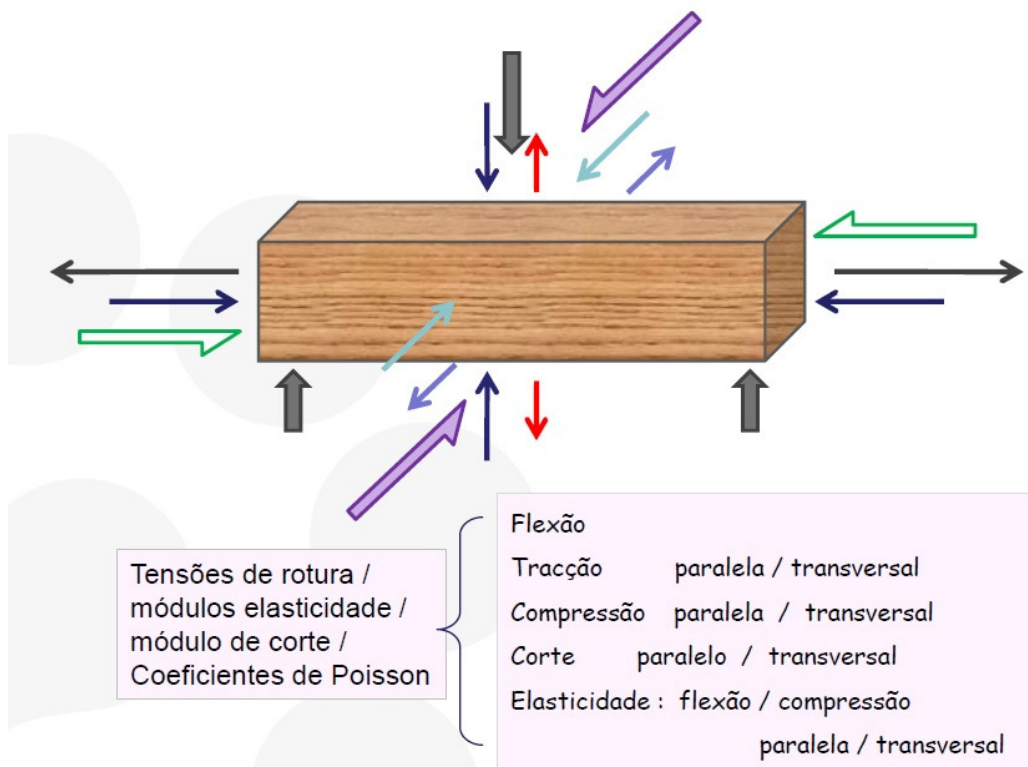


Figura 60 - Características mecânicas orientadas da madeira (Santos, 2011)

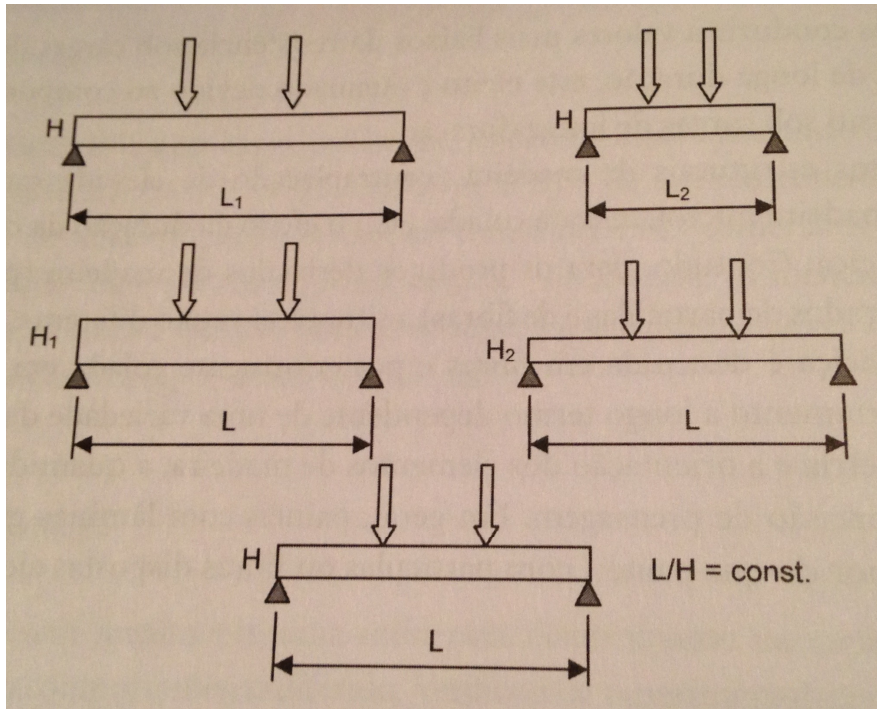


Figura 61 - Efeito de escala (Cachim, 2007)

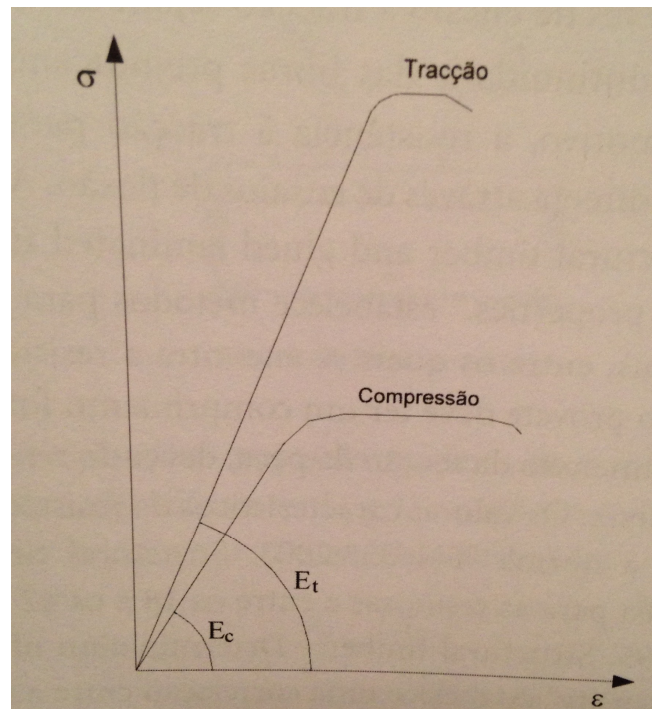


Figura 62 - Relação tensão - deformação da madeira em compressão e tracção (Cachim, 2007)

Tabela 7 - Tensão de rotura à compressão de algumas espécies de madeira (Cachim, 2007)

Espécie de madeira	Tensão de rotura à compressão (MPa)
Resinosas	
Pinho bravo	64
Pinho silvestre (Casquinha)	39
Espruce	39
Folhosas	
Eucalipto vulgar	65
Carvalho português	54
Faia	53

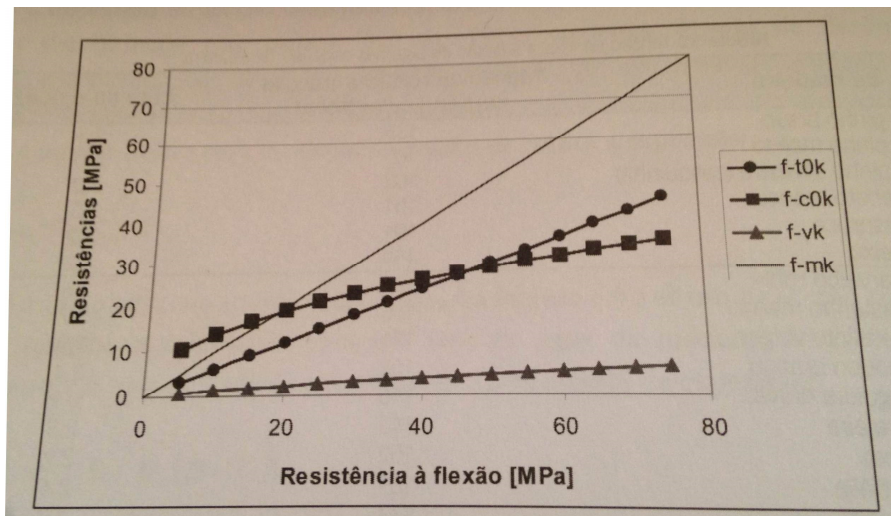
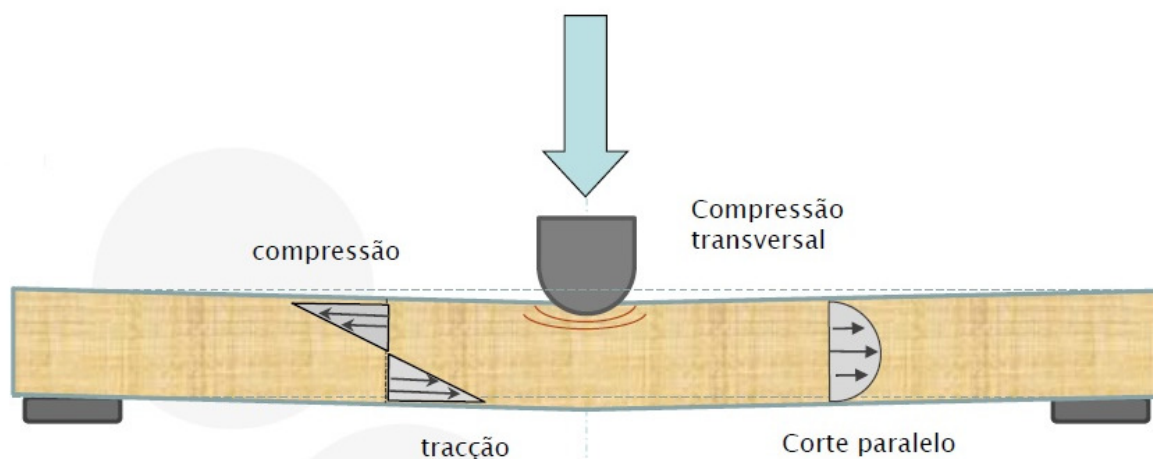
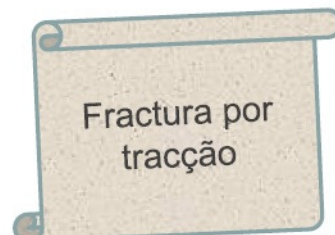
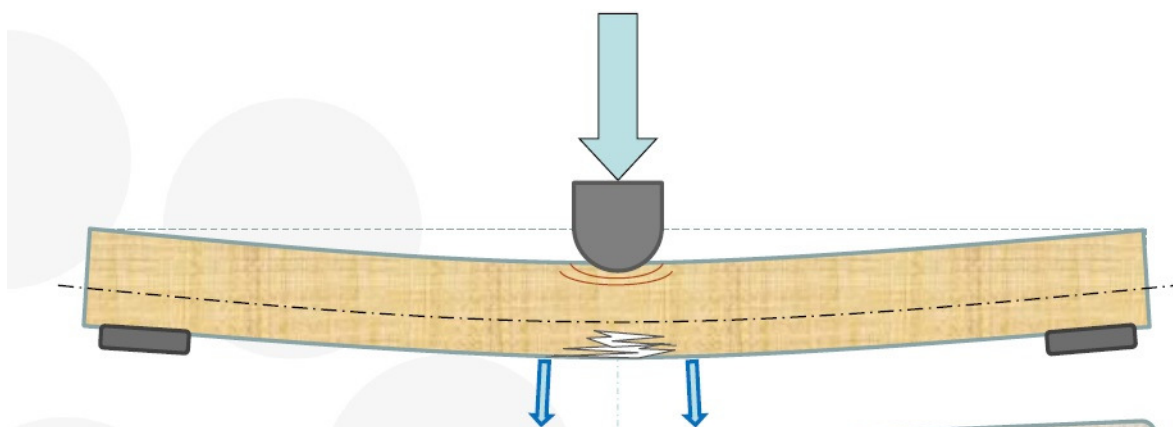
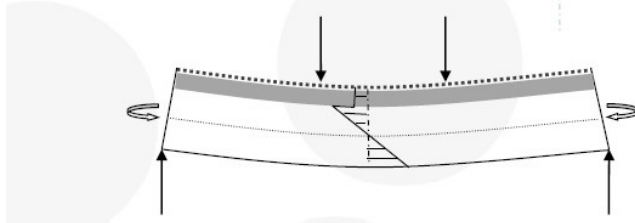
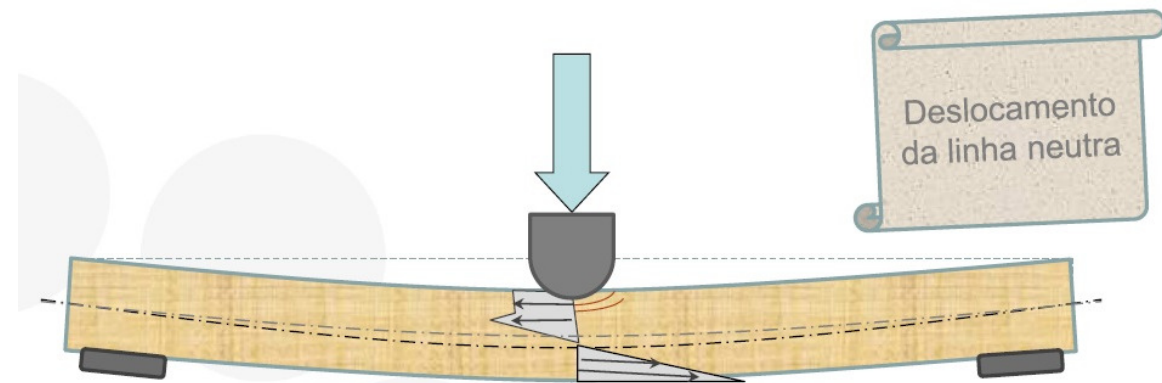
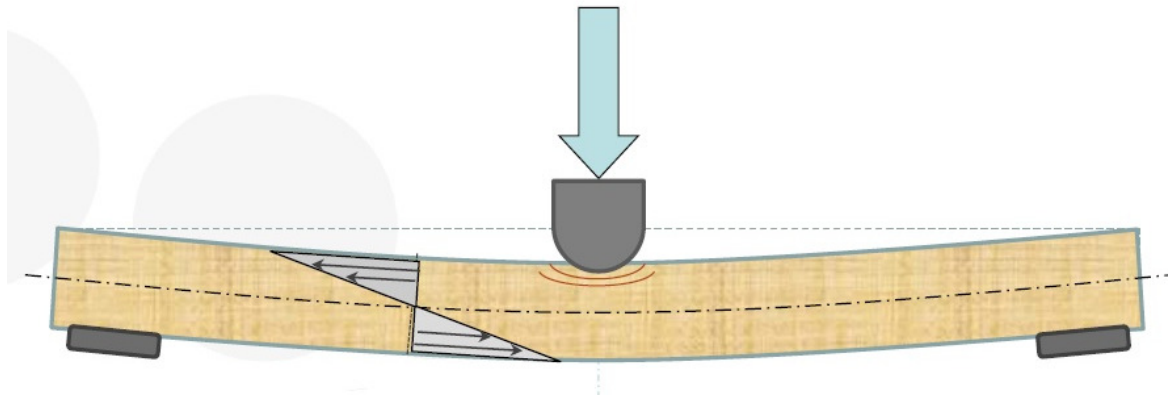


Figura 63 - Relação entre a resistência característica da madeira à flexão e resistência à compressão e tração paralela à fibra e ao corte de acordo com a "EN 384:1995"





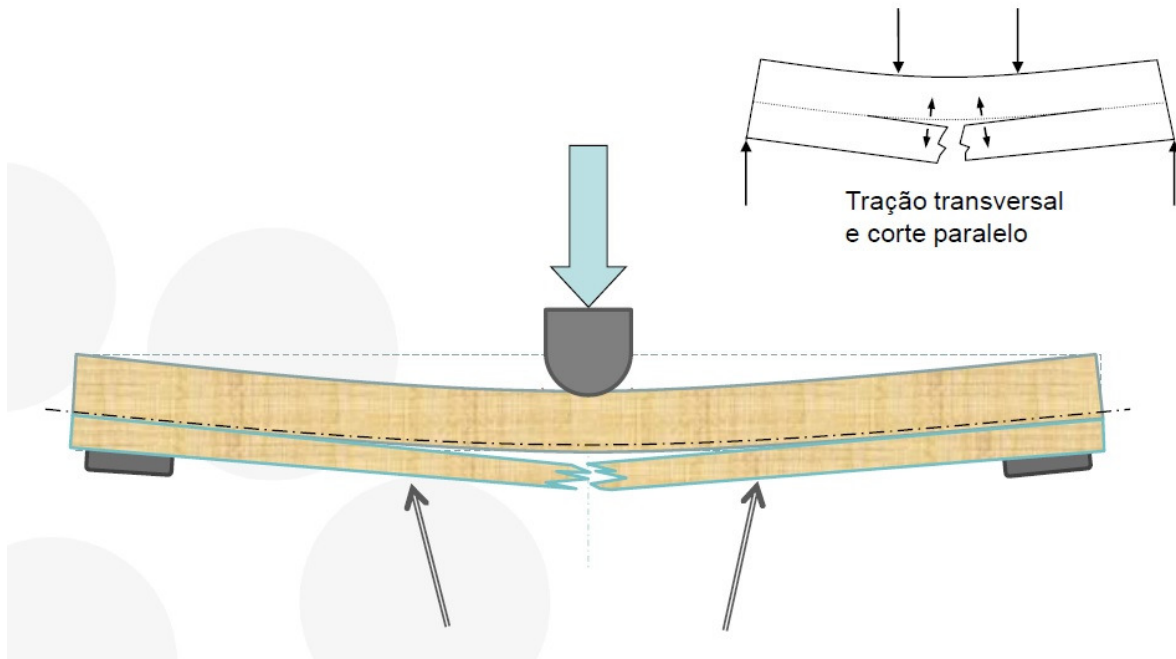


Figura 64 - Ensaio de Flexão – Esquema (Santos, 2011)

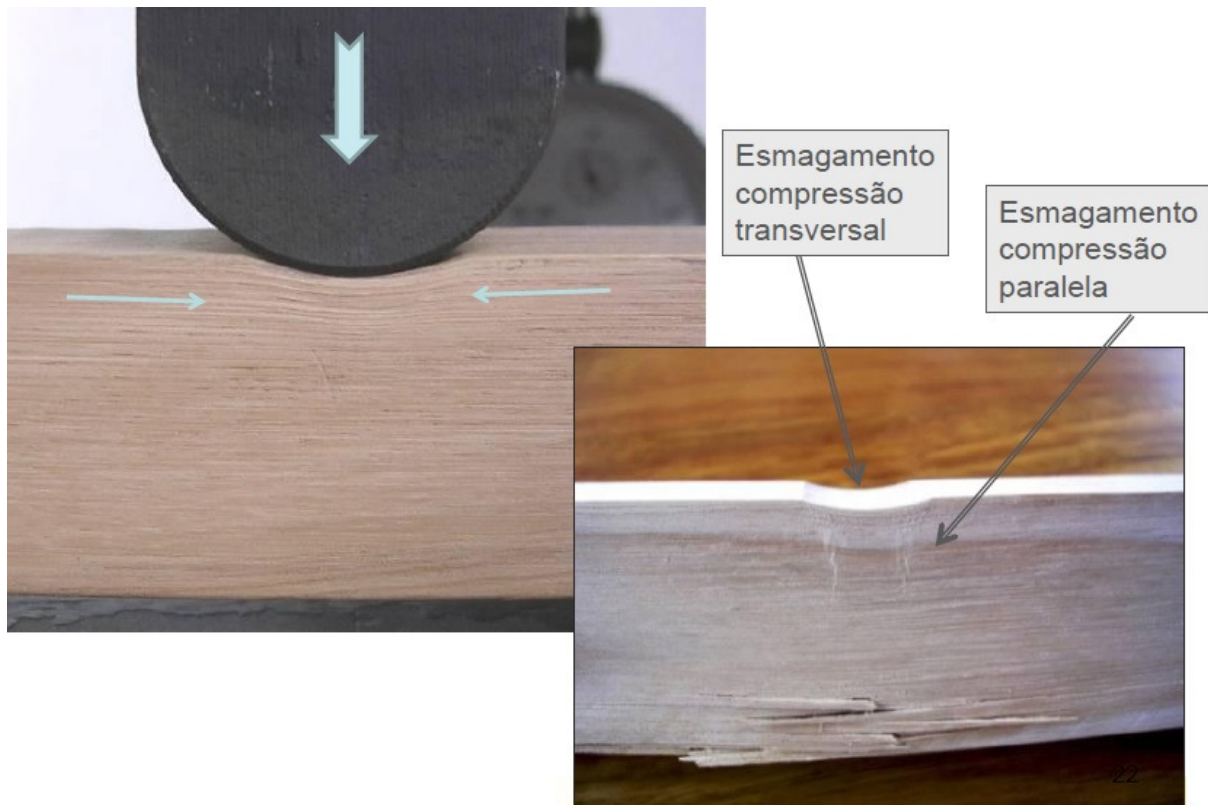


Figura 65 - Ensaio de Flexão - Imagem real (Santos, 2011)

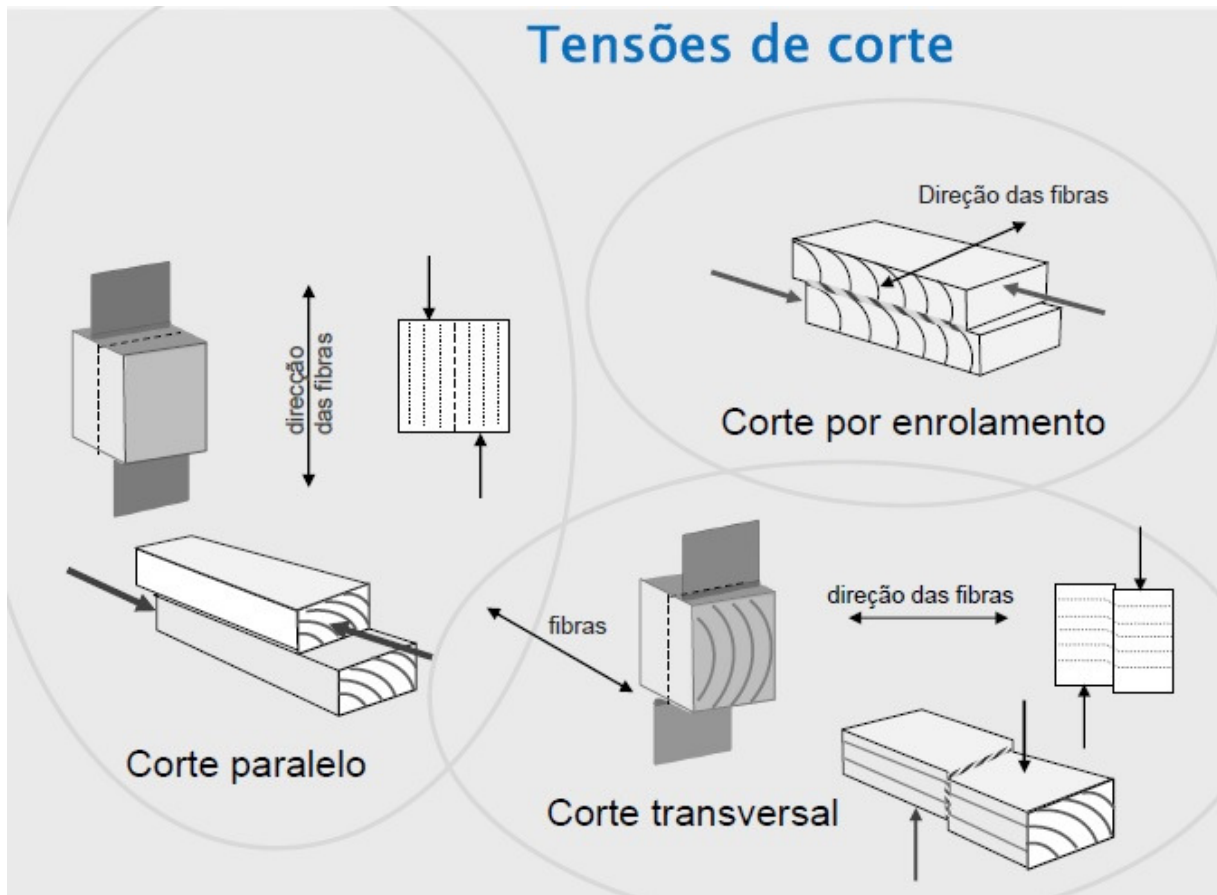


Figura 66 - Tensões de Corte (Santos, 2011)

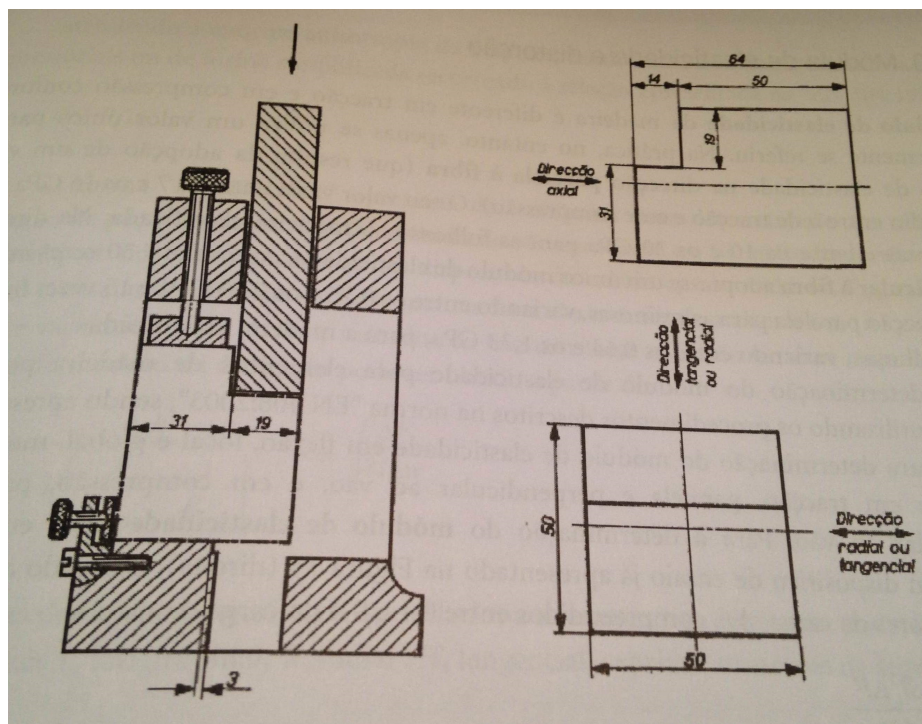


Figura 67 - Dispositivo para determinação da resistência ao corte e dimensões do provete (Cachim, 2007)

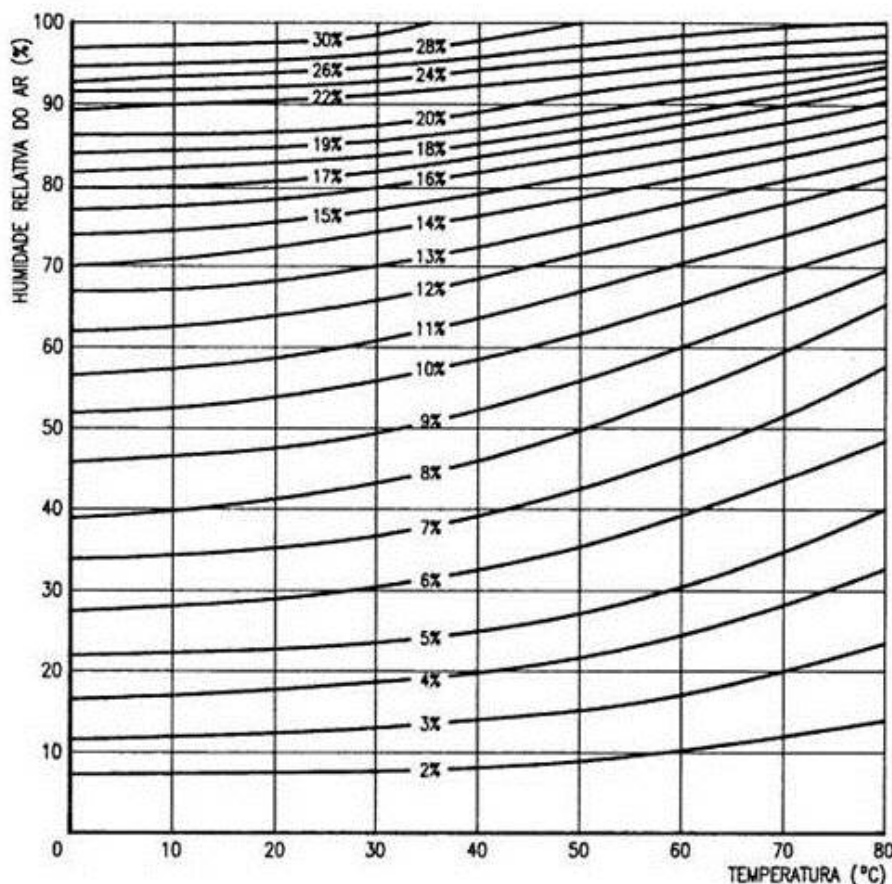


Figura 68 - Curvas de equilíbrio higrométrico (Cruz & Nunes, 2008)

Tabela 8 - Classificação da madeira de acordo com o seu teor de água (Cachim, 2007)

Classe	Teor de água	Comentários	
Madeira saturada	>70	Madeira durante longo tempo imersa em água	
Madeira verde	PSF-70	Madeira em pé ou de corte recente	
Madeira semi-seca	23-PSF	Madeira serrada em verde. Madeiras em ambientes muito húmidos e/ou frequentemente expostas à chuva	
Madeira seca	18-23	Madeira seca	Construções não cobertas ou cobertas mas muito expostas
Madeira seca ao ar	13-18	Inverno: 16-18 Primavera/Outono: 14-16 Verão: 12-14	
Madeira dessecada	0-13	Interiores. Ambientes aquecidos	
Madeira completamente seca	0	Estabilizada em peso a 103 °C. Não é possível de manter em condições ambientes pois a madeira absorverá água do ar	

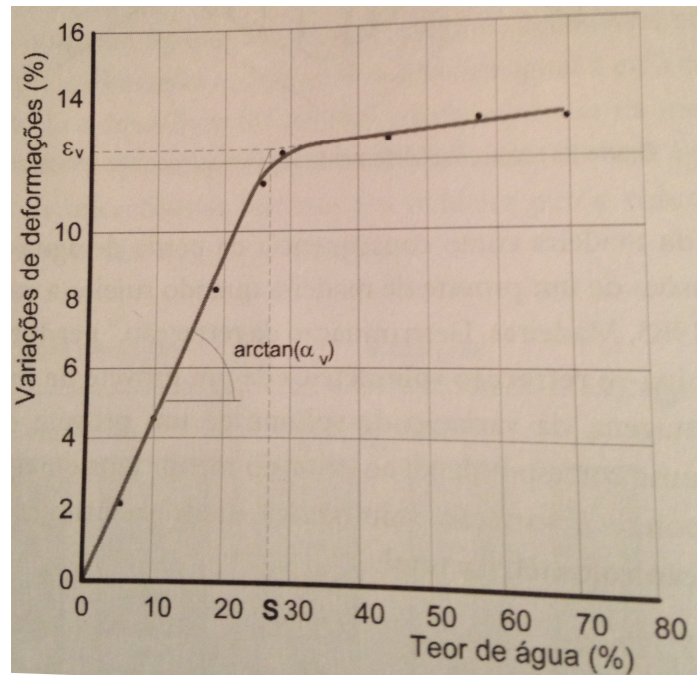


Figura 69 - Determinação da retracção (Cachim, 2007)

Tabela 9 - Coeficientes de retracção de algumas espécies de madeiras (Cachim, 2007)

Coníferas	ϵ_R	ϵ_T	ϵ_V	α_V	Folhosas	ϵ_R	ϵ_T	ϵ_V	α_V
Pinho bravo	6.0	9.5	15.1	0.53	Faia	5.0	13.0	19.0	0.60
Pinho manso	4.0	6.8	12.0	0.42	Freixo	5.3	13.4	21.6	0.57
Pinho radiata	4.0	6.2	11.5	0.40	Plátano	7.0	9.8	17.9	0.61
Casquinha	4.0	7.0	13.0	0.44	Sobro	5.4	11.4	17.7	0.56

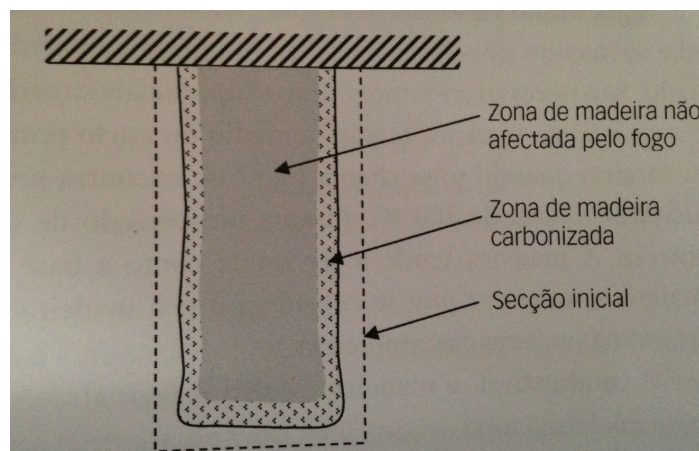


Figura 70 - Esquema de secção ardida (Cachim, 2007)

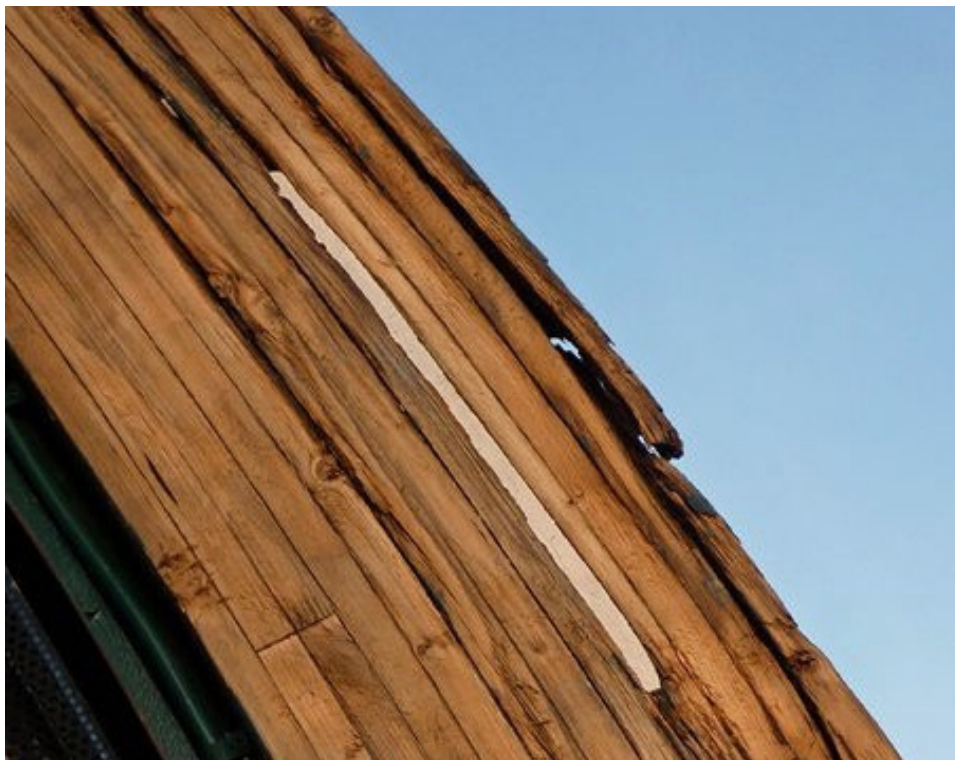


Figura 71 – Delaminação de uma viga de MLC (TRAC Structural ltd)

Tabela 10 - Metodologia de inspeção e diagnóstico em estruturas de madeira (Martins, 2009)

Investigação Histórica	Dados históricos do edifício; Data de construção; Desenhos originais; Descrição dos sistemas e pormenores construtivos; Alterações estruturais e funcionais; Acidentes ocorridos; Danos identificados; Reparações efectuadas; Desenhos actuais.
Caracterização da zona envolvente	Verificar a proximidade de florestas; Verificar a proximidade de cursos de água ou ambiente marinho (rio, ribeiros, minas e proximidade ao mar).
Caracterização da construção	
Definição da zona a inspeccionar	Elementos em contacto com o solo; Elementos apoiados em muros e paredes.
Acesso aos elementos a inspeccionar	Acesso directo à estrutura; Utilização de escada metálica (opcional); Utilização de andaimes (opcional); Utilização de plataformas elevatórias (opcional); Utilização de gruas telescópicas (opcional).
Local Iluminado	Utilização projectores; Utilização de holofotes (opcional); Utilização de lanterna.
Levantamento geométrico da estrutura a analisar	Elaboração de um esquiço da planta estrutural; Numeração de todos os elementos; Utilização de fita métrica; Utilização de distanciómetro laser (opcional); Utilização de equipas de topografia (opcional).
Identificação da espécie de madeira	Observar a secção transversal; Observar a secção tangencial; Cortar um pedaço de madeira para análise comparativa com amostras de várias espécies (opcional); Análise microscópica (opcional).
Estabelecimento de uma rotina de inspeção	Definir o avanço da inspeção (cima para baixo, por exemplo); Definir a sequência de inspeção dos elementos (esquerda para a direita); Definir a sequência em relação a toda a área (rotação segundo o sentido dos ponteiros do relógio).
Observação visual prévia	Manter a camada de sujidade existente nos elementos a inspeccionar; Procurar pela existência de bolores e fungos de podridão; Procurar por manchas de humidade; Procurar a existência de serrim (cor, textura); Procurar a existência de excrementos de insectos; Procurar fendas; Procurar a existência de insectos mortos.
Limpeza da superfície dos elementos	Utilizar uma escova macia vegetal ou sintética; Utilizar uma lâmina ou o formão para limpeza grosseira.

<p>Identificação das características físicas dos elementos:</p>	<p>Utilizar uma lupa para uma melhor observação; Caracterizar a cor da madeira; Caracterizar a inclinação do fio com recurso a um riscador; Identificar e caracterizar a existência de fissuras (comprimento, largura e profundidade); Caracterizar o descaio da madeira; Identificar a presença de bolsas resinosas; Identificar a presença de nós, determinando o diâmetro.</p>
<p>Caracterização da ventilação dos apoios dos elementos e observação de deformações</p>	<p>Verificar se os elementos na entrega das paredes, ou dos muros, se encontram totalmente embebidos, ou se têm algum espaço livre; Verificar a flecha nas estruturas dos pavimentos e coberturas.</p>
<p>Identificação de ataques biológicos</p>	<p>Procurar por orifícios de saída, caracterizar a sua forma (circular ou elíptica), medir o seu diâmetro, e registar a localização das zonas mais atacadas; Procurar pela existência de serrim, identificar a cor, a textura e forma; Procurar pela presença de fungos, identificar a cor, a forma, a textura do corpo de frutificação e a extensão do ataque; Registar todas zonas afectadas pela acção dos agentes biológicos, identificando a extensão do ataque, bem como a sua profundidade; Procurar pela existência de galerias internas na madeira, verificando a sua direcção em relação às fibras longitudinais; Procurar pela presença de excrementos, caracterizando-se a cor, a forma e a consistência; Procurar pela existência de asas soltas, a sua confirmação indica a presença de térmitas no local; Utilizar o olfacto para detectar o cheiro a terra húmida, esta confirmação indica pode indicar a presença de térmitas.</p>
<p>Verificação de existência de humidade</p>	<p>Procurar a existência de manchas nos elementos, identificando os locais onde existam; Observar a estrutura num dia de chuva; Verificar se os pregos e ligações metálicas se encontram enferrujados; Verificar se os pregos da estrutura se encontram salientes.</p>
<p>Análise visual com recurso ao martelo e ao formão</p>	<p>Aplicar pancadas com o martelo no elemento a ensaiar; Raspara o formão na superfície do elemento a ensaiar.</p>
<p>Determinação do teor em água</p>	<p>Aplicar um higrómetro com eléctrodo de percussão, com pontas de eléctrodo adequadas à espessura da madeira.</p>

Ensaio do Pilodyn	Escolher os pontos de ensaio convenientes; Aplicar o aparelho numa posição perfeitamente vertical ou horizontal.
Ensaio dos ultra-sons	Utilizar dois operadores; Colocar gel de contacto nos transdutores e nos pontos da superfície da madeira onde serão aplicados os transdutores; Realizar várias leituras para o mesmo ponto; Escolher faces planas; Aplicar a mesma pressão nos transdutores.
Estado das ligações entre elementos	Inspeccionar as zonas de encontro entre os elementos; Utilizar o martelo e o formão para apoio à inspecção visual; Utilizar em caso de dúvida algum dos ensaios não destrutivos; Observar o aspecto das ligações metálicas.
Análise dos Resultados e Conclusões	Apresentar quadro resumo com todos os resultados dos ensaios; Apresentar quadro resumo com os resultados da inspecção visual; Analisar os resultados entre os diferentes ensaios e a inspecção visual; Apresentar quadro resumo com a caracterização do estado de conservação dos elementos inspeccionados, fazendo-se referência aos elementos que se devem manter, e aos que deverão substituídos total ou parcialmente

Tabela 11 - Propriedades físico-mecânicas da madeira de casquinha – teor de água de 12% (Tsoumis, 1991)

Propriedades		Valores Médios	
		REDWOOD	SCOTS PINE
Massa Volúmica (kg/m ³)		400	530
Coeficiente de retracção unitária (%/%)	Tangencial	0.19	0.33
	Radial	0.11	0.17
	Volumétrica	0.29	0.53
Flexão Estática	Tensão de rotura (N/mm ²)	69	98
	Módulo de Elasticidade (N/mm ²)	9250	11760
Compressão Axial	Tensão de rotura (N/mm ²)	42	54
Tracção Transversal	Tensão de rotura (N/mm ²)	1.7	2.9
Tracção Axial	Tensão de rotura (N/mm ²)	-	102
Corte	Tensão de rotura (N/mm ²)	1.5	9.8

Tabela 12 - Valores característicos de resistência mecânica para algumas classes de qualidade da madeira de casquinha (Redwood) (Machado & Monteiro, 1997)

	Classes de Qualidade							
	T0	GS	T1	LT20	SS	LT30	T2	T3
	Classe de Resistência							
	C14	C16	C18	C24		C30		
Valores Característicos								
Flexão estática (N/mm ²)	14	16	18	24		30		
Tracção paralela às fibras (N/mm ²)	8	10	11	14		18		
Tracção perpendicular às fibras (N/mm ²)	8.3	0.3	0.3	0.4		0.4		
Compressão paralela às fibras (N/mm ²)	16	17	18	21		23		
Compressão perpendicular às fibras (N/mm ²)	4.3	4.6	4.8	5.3		5.7		
Corte (N/mm ²)	1.7	1.8	2.0	2.5		3.0		
Módulo de Elasticidade (kN/mm²)								
Paralelo às fibras								
Valor médio	7	8	9	11		12		
Valor Característico	4.7	5.4	6.0	7.4		8.0		
Perpendicular às fibras (Valor médio)	0.23	0.27	0.30	0.37		0.40		
Módulo de Distorção (kN/mm ²)	0.44	0.50	0.56	0.69		0.75		
Massa Volúmica (kg/m³)								
Valor médio	350	370	380	420		460		
Valor Característico	290	310	320	350		380		

Tabela 13 - Valores característicos de resistência mecânica para algumas classes de qualidade da madeira de casquinha (Scots Pine) (Machado & Monteiro, 1997)

		Classes de Qualidade	
		SS	GS
		Classe de Resistência	
		C22	C16
Valores Característicos			
Flexão estática (N/mm ²)	$f_{m,k}$	22	16
Tracção paralela às fibras (N/mm ²)	$f_{t,0,k}$	13	10
Tracção perpendicular às fibras (N/mm ²)	$f_{t,90,k}$	0.3	0.3
Compressão paralela às fibras (N/mm ²)	$f_{c,0,k}$	20	17
Compressão perpendicular às fibras (N/mm ²)	$f_{c,90,k}$	5.1	4.6
Corte (N/mm ²)	$f_{v,k}$	2.4	1.8
Módulo de Elasticidade (kN/mm ²)			
Paralelo às fibras			
Valor médio	E_{mean}	10	8
Valor Característico	$E_{0.05}$	6.7	5.4
Perpendicular às fibras (Valor médio)	E_{mean}	0.33	0.27
Módulo de Distorção (kN/mm ²)	G_{mean}	0.63	0.50
Massa Volúmica (kg/m ³)			
Valor médio	ρ_{mean}	410	370
Valor Característico	ρ_k	340	310

Tabela 14 - Características de durabilidade natural e de impregnabilidade da madeira de casquinha (EN 350-2)

	Durabilidade Natural				Impregnabilidade
	Fungos	Térmitas	Carunchos		
			Pequenos	Grandes	
			<i>Anobium</i>	<i>Hylotrupes</i>	
Borne	Não durável	Susceptível	Susceptível	Susceptível	Facilmente impregnável
Cerne	Moderadamente durável a pouco durável	Susceptível	Durável	Durável	Difícilmente ou não impregnável

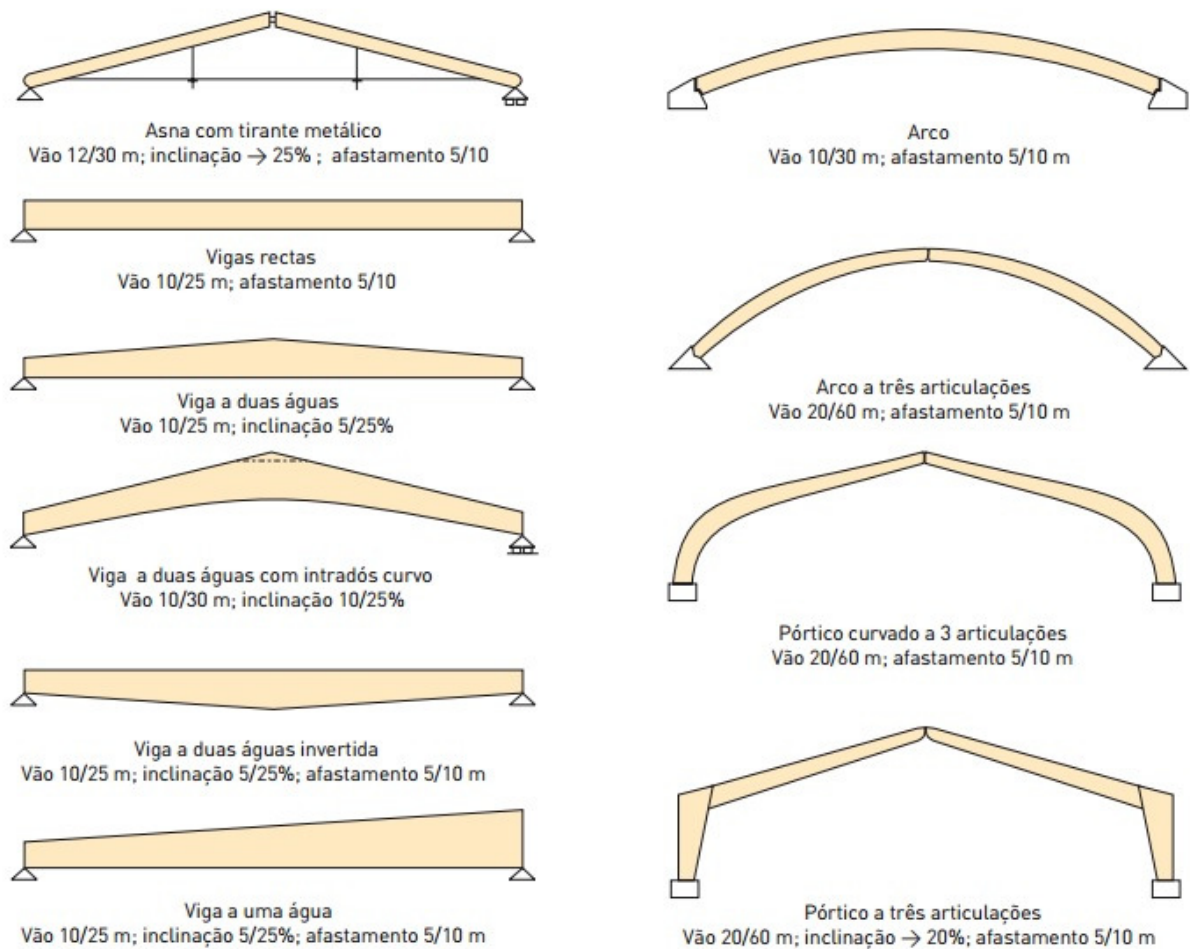


Figura 72 - Formas Standarts das Estruturas de MLC (<http://www.jular.pt/pdf//Vigas-madeira-lamelada.pdf>)

Tabela 15 - Valores máximos de espessura final (e) e área de secção transversal (A), para cada classe de serviço - Madeiras Resinosas (NP EN 386,2009)

	Classes de Serviço					
	1		2		3	
	e (mm)	A (mm ²)	e (mm)	A (mm ²)	e (mm)	A (mm ²)
Resinosas	45	12000	45	12000	35	10000

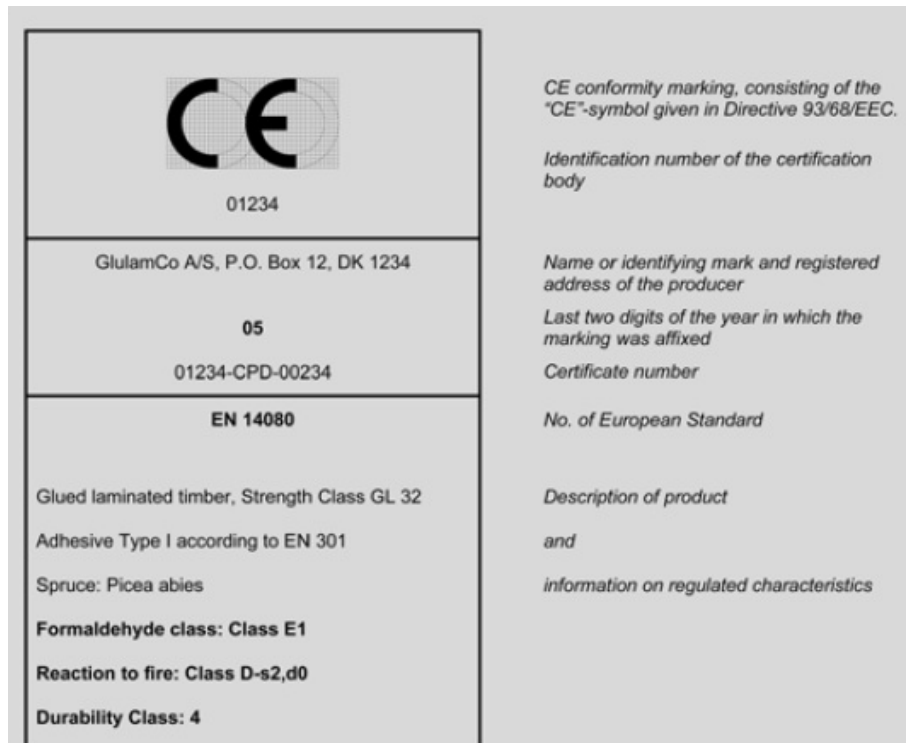


Figura 73 - Marcação CE de madeira lamelada colada (EN 14080)

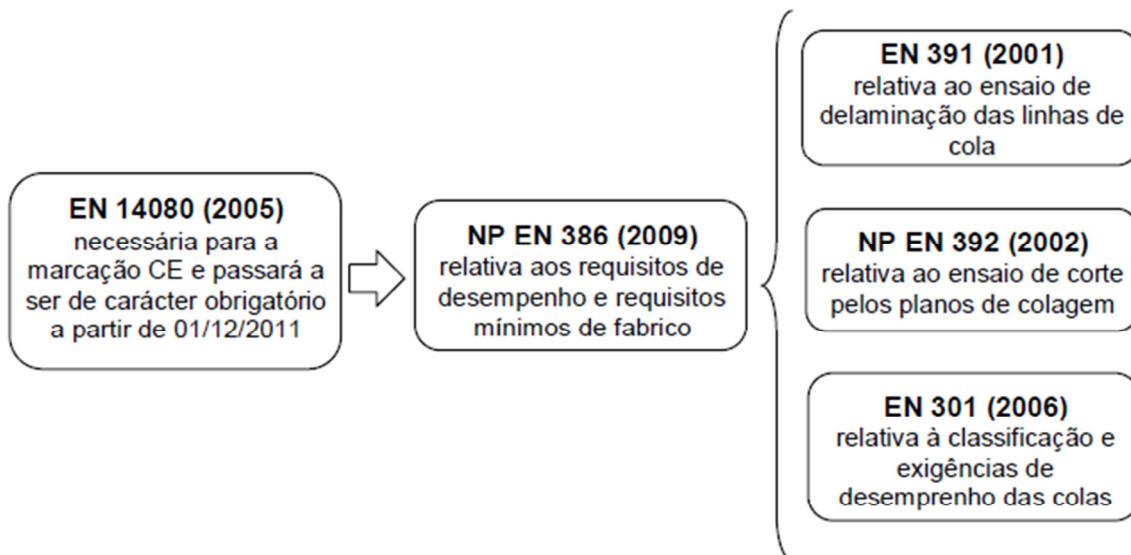


Figura 74 - Enquadramento das várias normas a ter em conta na adopção de estruturas de madeira lamelada colada (Lampreia, 2010)

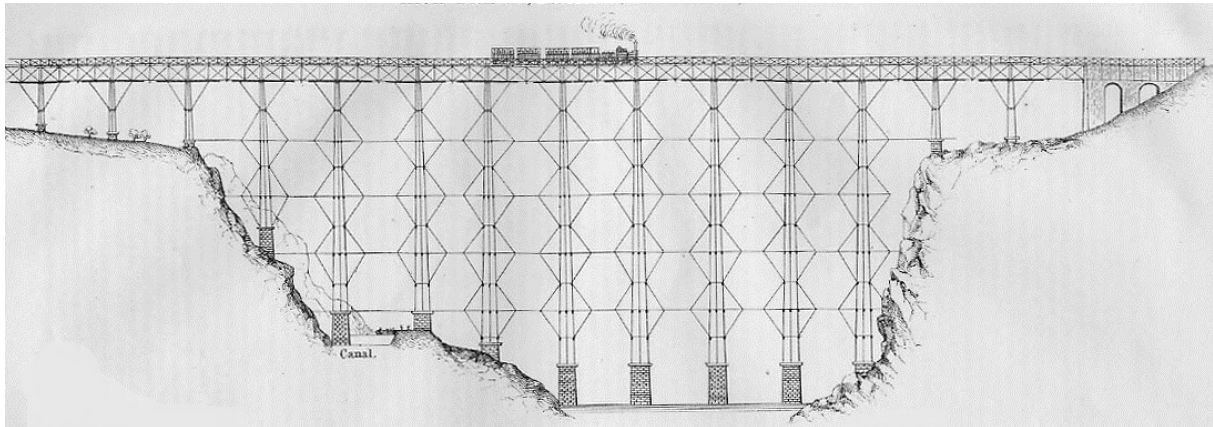


Figura 75 - Ponte Portage Viaduct (fonte: <http://www.letchworthparkhistory.com/pbjournal.html>)

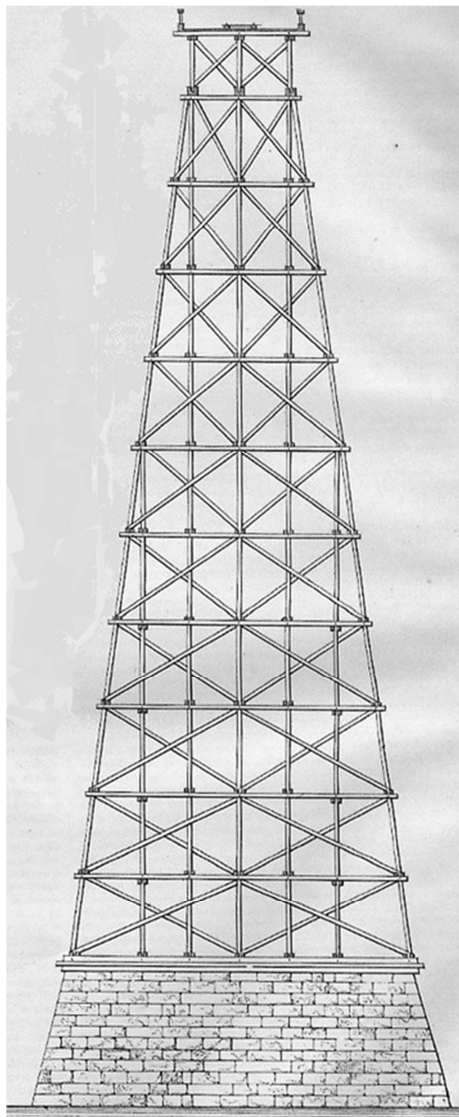


Figura 76 - Corte Transversal da Ponte Portage Viaduct (fonte: <http://www.letchworthparkhistory.com/pbjournal.html>)

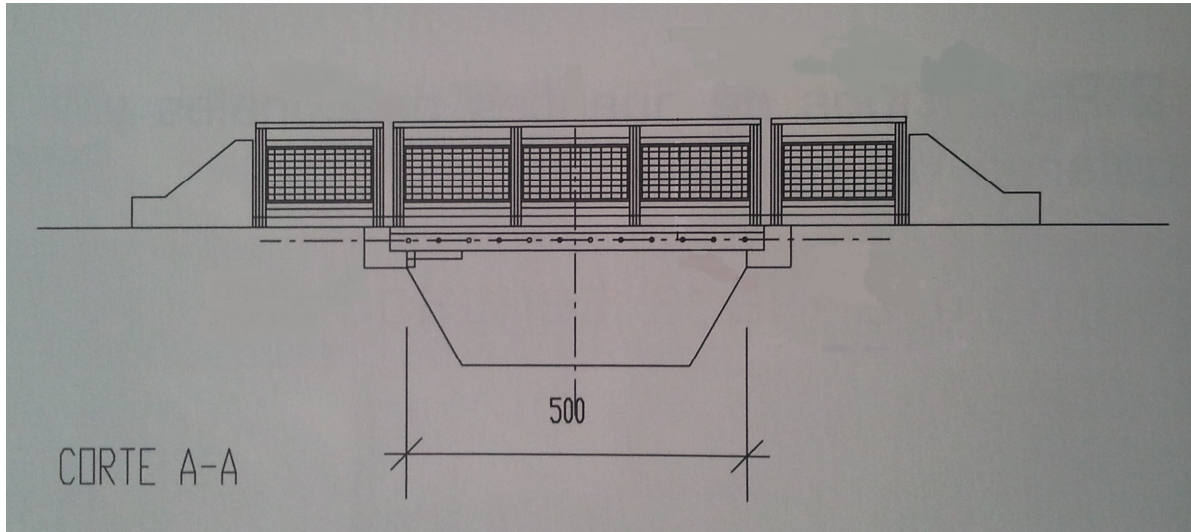


Figura 77 - Corte A-A - Alçado de uma ponte pedonal (Schwaner, 2004)

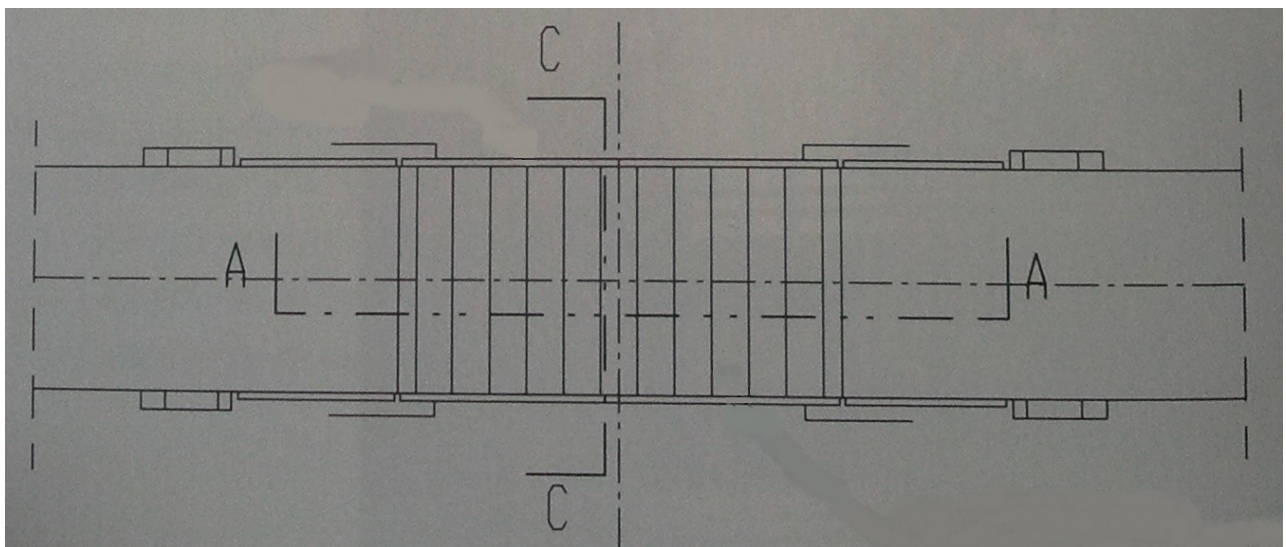


Figura 78 - Planta de uma ponte pedonal (Schwaner, 2004)



Figura 79 - Corte C-C (Schwaner, 2004)

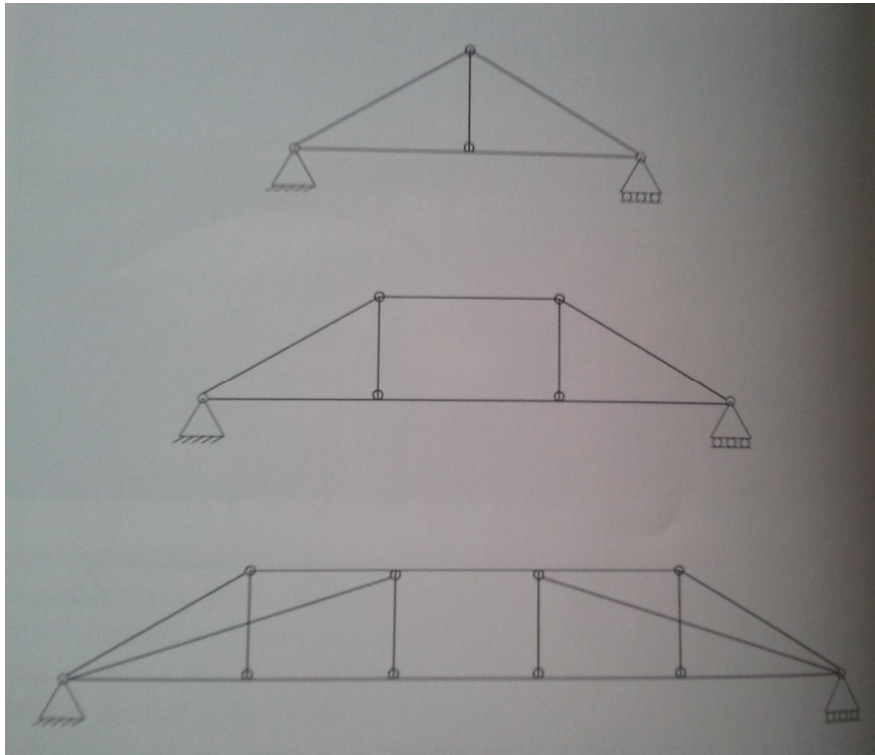


Figura 80 - Ponte Atirantada (Schwaner, 2004)

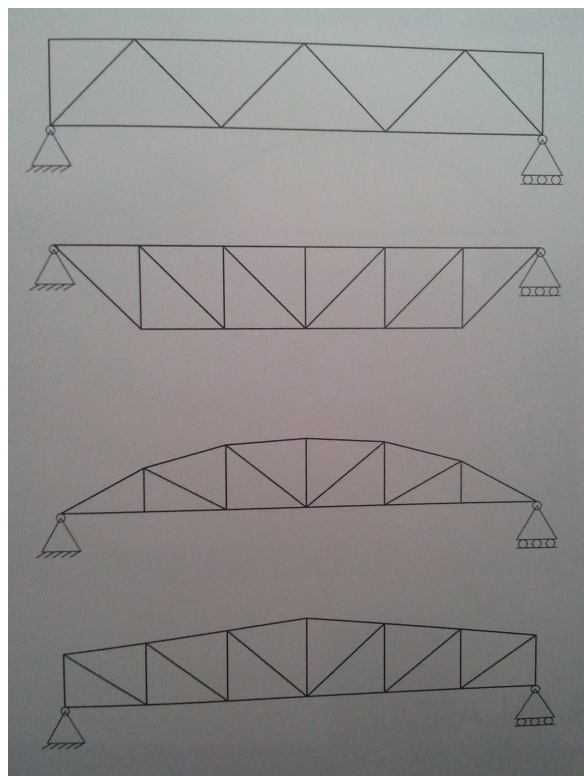


Figura 81 - Sistema Reticulado (Schwaner, 2004)

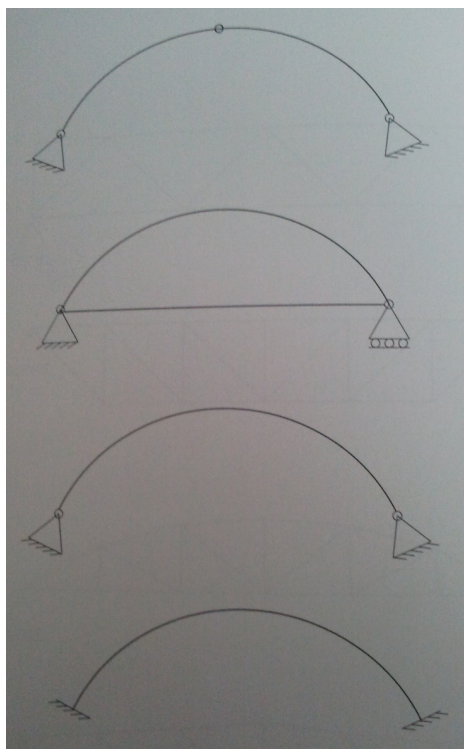


Figura 82 - Sistema em Arco (Schwaner, 2004)

Tabela 16 - Classes de Resistência para Glulam (NP EN 1194:1999)

		Classes de Resistência			
		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h
Resistência à flexão	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Resistência à tracção	$f_{t,0,g,k}$	16.5	19.5	22.5	26
	$f_{t,90,g,k}$	0.4	0.45	0.5	0.6
Resistência à compressão	$f_{c,0,g,k}$	24	26.5	29	31
	$f_{c,90,g,k}$	2.7	3.0	3.3	3.6
Resistência ao corte	$f_{v,g,k}$	2.7	3.2	3.8	4.3
Módulo de elasticidade	$E_{0,g,mean}$	11600	12600	13700	14700
	$E_{0,g,05}$	9400	10200	11100	11900
	$E_{90,g,mean}$	390	420	460	490
Módulo de distorção	$G_{g,mean}$	720	780	850	910
Massa Volúmica	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450

Tabela 17 - Classes de Resistência para Glulam Combinado (NP EN 1194:1999)

		Classes de Resistência			
		GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
Resistência à flexão	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Resistência à tracção	$f_{t,0,g,k}$	14	16.5	19.5	22.5
	$f_{t,90,g,k}$	0.35	0.4	0.45	0.5
Resistência à compressão	$f_{c,0,g,k}$	21	24	26.5	29
	$f_{c,90,g,k}$	2.4	2.7	3.0	3.3
Resistência ao corte	$f_{v,g,k}$	2.2	2.7	3.2	3.8
Módulo de elasticidade	$E_{0,g,mean}$	11600	12600	13700	14700
	$E_{0,g,05}$	9400	10200	11100	11900
	$E_{90,g,mean}$	390	420	460	490
Módulo de distorção	$G_{g,mean}$	590	720	780	850
Massa Volúmica	$\rho_{g,k}$	350	380	410	430

Tabela 18 - Classes das lamelas de acordo com a classe de Glulam pretendida (NP EN 1194:1999)

Classe Glulam pretendida	GL24	GL28	GL32
Glulam	C24	C30	C40
Glulam combinado	C24/C28	C30/C24	C40/C30

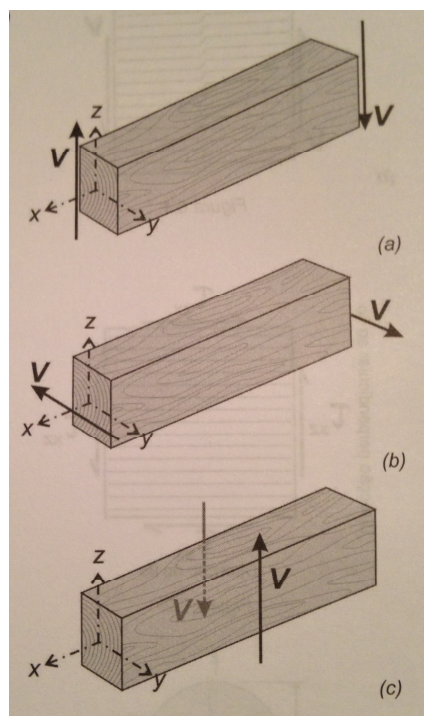


Figura 83 - Corte de elementos de madeira segundo os eixos: X,Y e Z (Negrão e Faria, 2009)

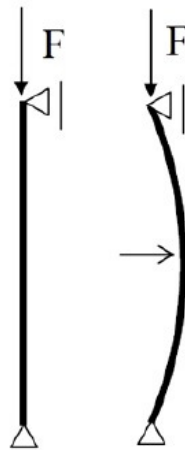


Figura 84 - Encurvadura de uma barra comprimida (Martins, 2010)



Figura 85 – Alçado Norte da Ponte do Parque das Nações (Almeida, 2013)

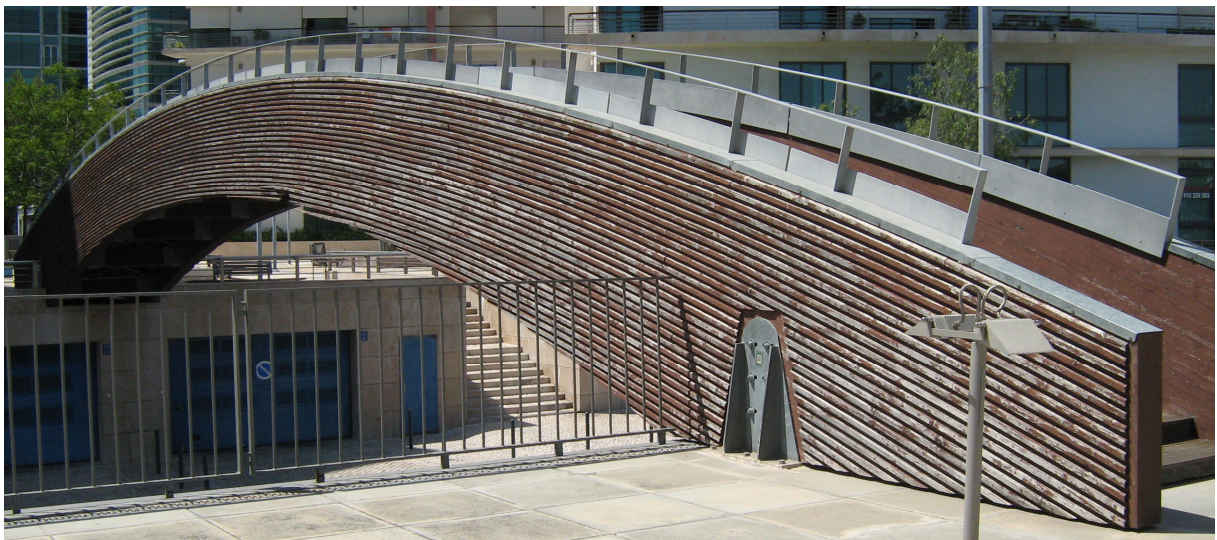


Figura 86 - Alçado Sul da Ponte do Parque das Nações (Almeida, 2013)



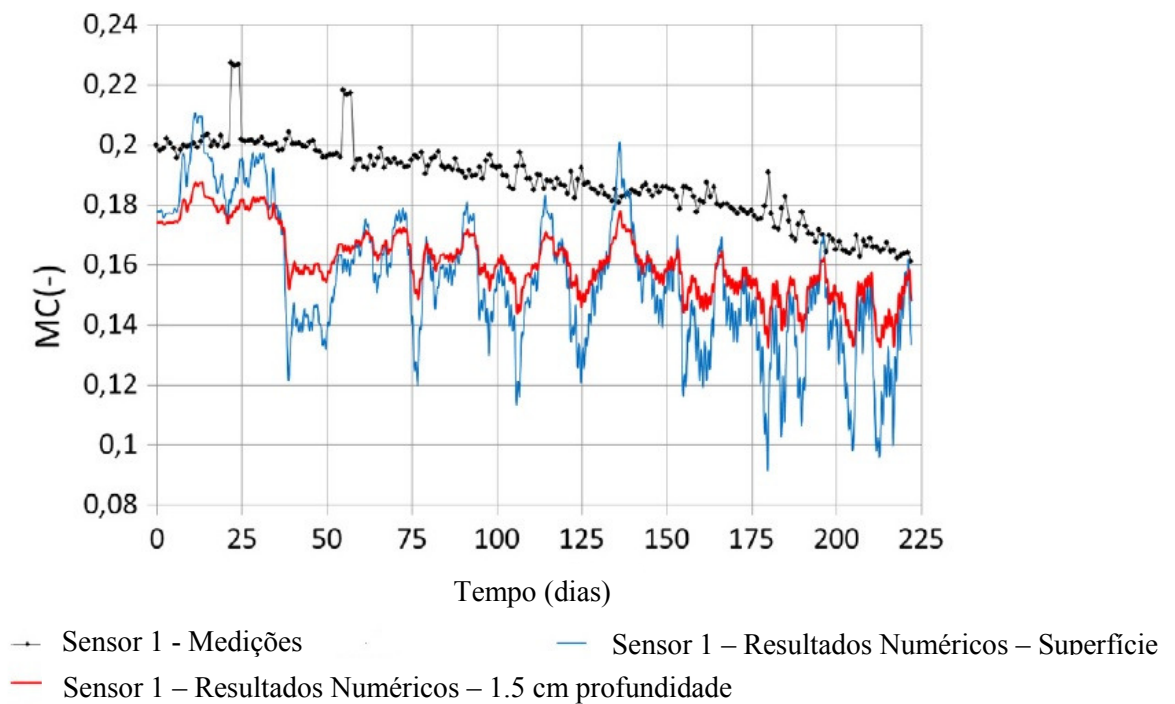
Figura 87 - Passadiço: parte superior, à esquerda; parte inferior, à direita (Almeida, 2013)



Figura 88 - Pormenor da destruição da Ponte do Parque das Nações devido a embate de um camião (Almeida, 2013)



Figura 89 - Orientação da Ponte (Google Earth, 2013)



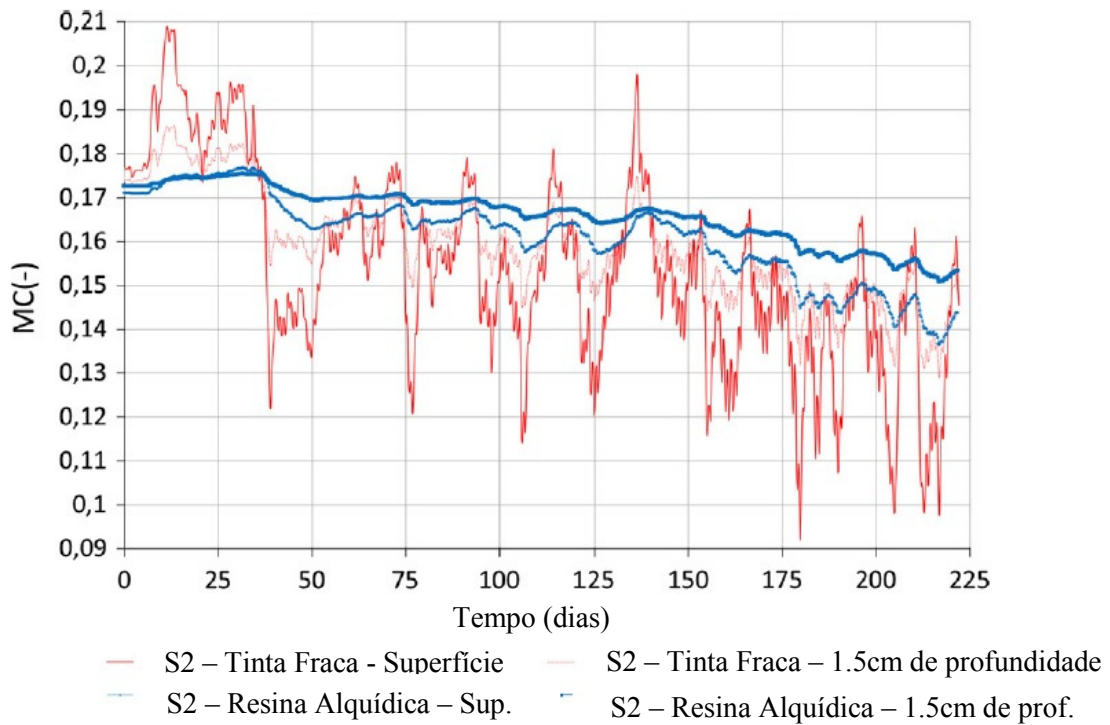
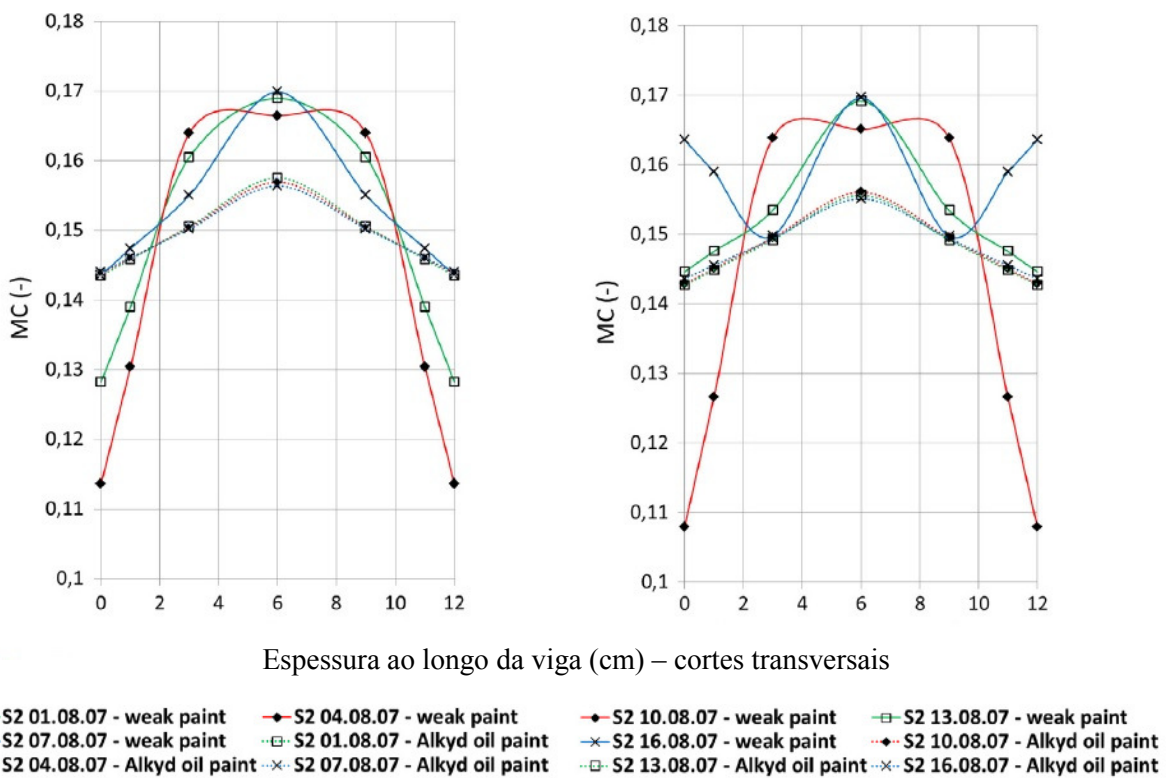
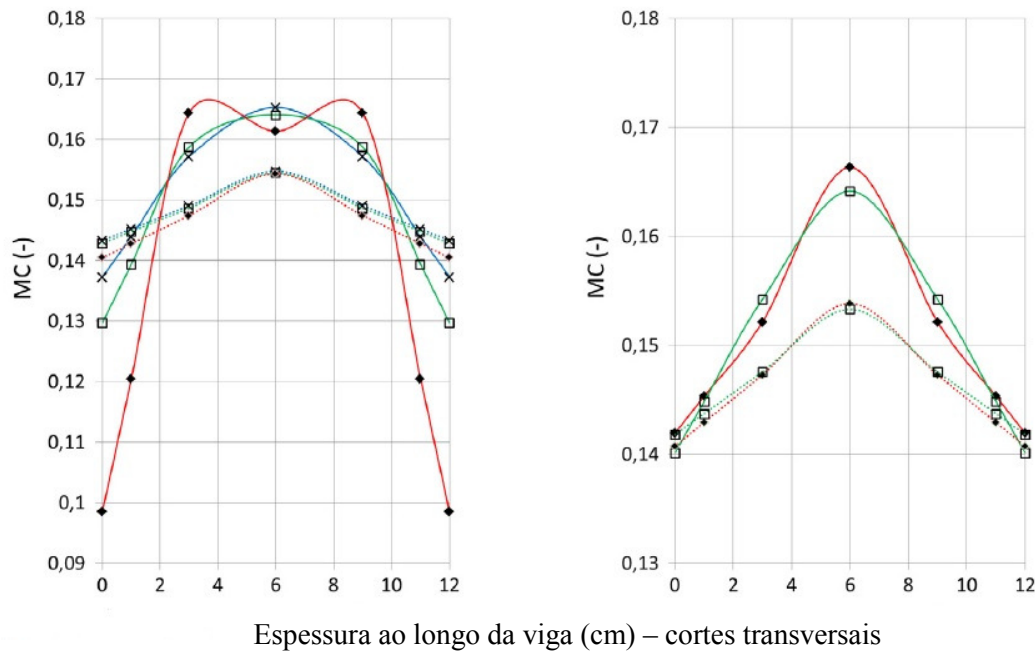


Figura 91 - Resultados numéricos e medições de 01.02.2007 (t = 0 dias) a 11.09.2007 (t = 222 dias). Sensor 2: Resultados da análise com a tinta fraca utilizada e da análise de estudo de caso, com resinas alquídicas (Fortino, 2013)





- x— S2 19.08.07 - weak paint —□— S2 22.08.07 - weak paint —♦— S2 28.08.07 - weak paint —□— S2 31.08.07 - weak paint
- ♦— S2 25.08.07 - weak paint -.-x-.- S2 19.08.07 - Alkyd oil paint -.-♦-.- S2 28.08.07 - Alkyd oil paint -.-□-.- S2 31.08.07 - Alkyd oil paint
- .-□-.- S2 22.08.07 - Alkyd oil paint -.-♦-.- S2 25.08.07 - Alkyd oil paint -.-x-.- S2 28.08.07 - Alkyd oil paint -.-□-.- S2 31.08.07 - Alkyd oil paint

Figura 92 - Teor de humidade ao longo da espessura da viga (Sensor 2) a cada 3 dias durante Agosto de 2007. Resultados de simulações com a tinta fraca utilizada e o estudo de caso com resinas alquídicas – weak paint – tinta fraca e Alkyd oil paint – resinas alquídicas (Fortino, 2013)

Tabela 19 - Valores máximos de ΔRH_d (Fortino, 2013)

	10.3.2007 a 10.4.2007	Junho de 2007	Agosto de 2007
$\Delta RH_{d,max}$	0.521 (atingido de 10 a 12.3.2007)	0.442 (atingido de 5 a 7.6.2007)	0.581 (atingido de 24 a 26.8.2007)
RH_{peak}	0.861 (durante 10 a 12.3.2007)	0.788 (durante 5 a 7.6.2007)	0.902 (durante 24 a 26.8.2007)

Tabela 20 - Gradientes positivos máximos calculados a 10 mm a partir da superfície da viga de madeira laminada colada (tinta fraca) correspondente aos três sensores nos períodos estudados (Fortino, 2013)

	10.3.2007 a 10.4.2007 grad max (m^{-1}) (atingido a 11.3.2007)	Junho de 2007 grad max (m^{-1}) (atingido a 6.6.2007)	Agosto de 2007 grad max (m^{-1}) (atingido a 25.8.2007)
Sensor 1	1.952	1.642	2.246
Sensor 2	2.082	1.643	2.195
Sensor 3	1.878	1.662	2.169



Figura 93 - Alçado Nordeste da Ponte na Av. Marquês da Fronteira (Almeida, 2013)



Figura 94 - Alçado Sudoeste Ponte na Av. Marquês da Fronteira (Almeida, 2013)

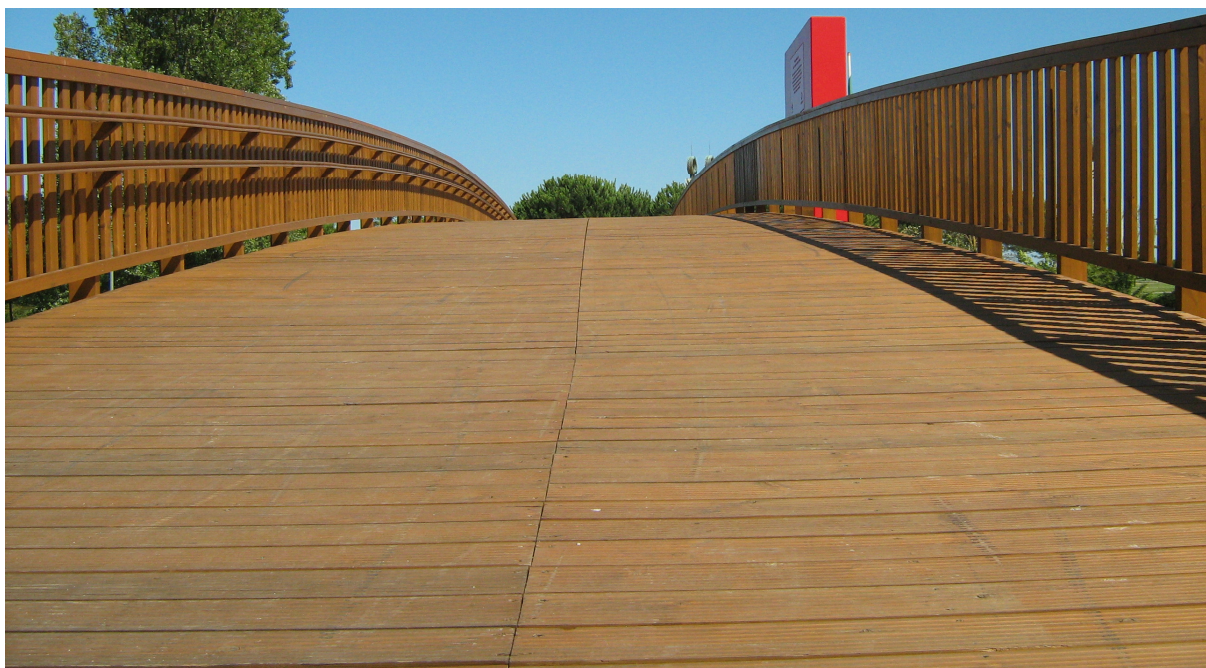


Figura 95 - Passadiço - parte superior (Almeida, 2013)



Figura 96 - Passadiço - parte inferior (Almeida, 2013)



Figura 97 – Apoios (Almeida, 2013)



Figura 98 – Ligação (Almeida, 2013)

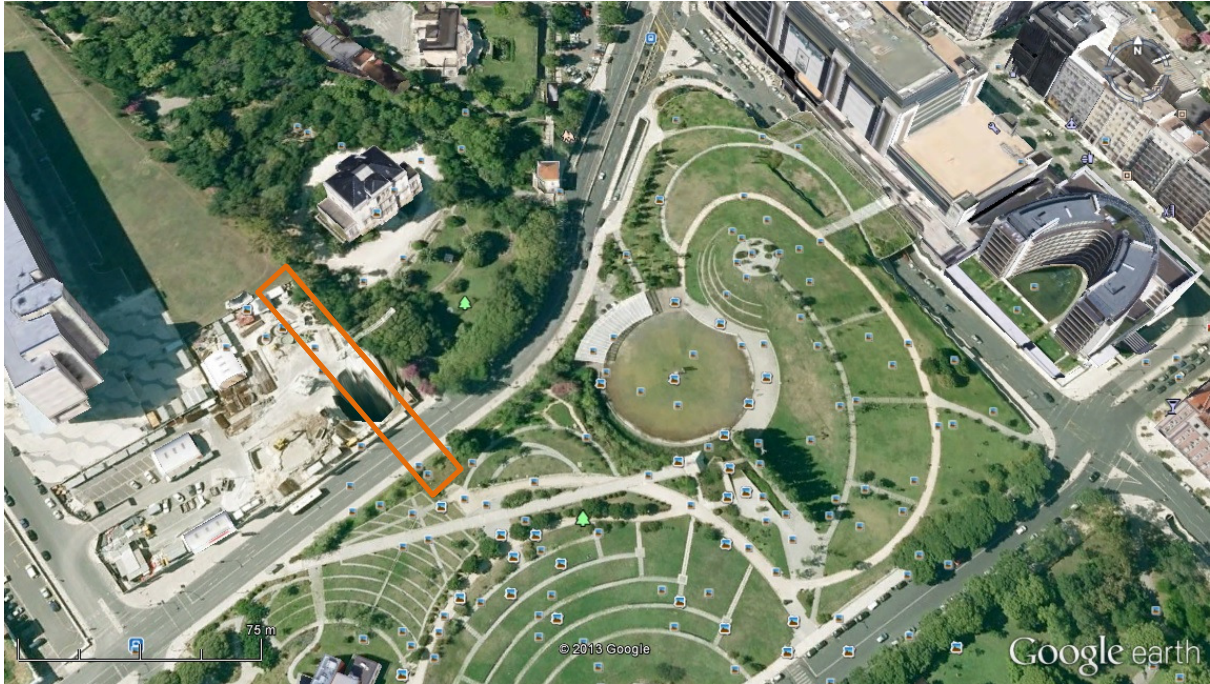


Figura 99 - Orientação da Ponte (Google Earth, 2013)



Figura 100 - Elemento de madeira com resina (Almeida, 2013)



Figura 101 - Piso irregular (Almeida, 2013)



Figura 102 - Ponte Pedonal em Madeira Lamelada Colada - Stavanger – Noruega (Almeida, 2013)



Figura 103 - Alçado norte da ponte de Stavanger (Almeida, 2013)



Figura 104 - Alçado sul da ponte de Stavanger (Almeida, 2013)



Figura 105 - Passadiço - parte superior (Almeida, 2013)



Figura 106 – Ligação (Almeida, 2013)



Figura 107 - Pilares da ponte (Almeida, 2013)



Figura 108 - Colocação do passadiço (Stangeland Maskin AS, 2009)



Figura 109 - Orientação da ponte (Google Earth, 2013)



Figura 110 - Alçado sul da ponte Leonardo (<http://caloniedoesart.wordpress.com/art-chitecture-i-the-artistry-of-buildings/art-chitecture-ii-the-artistry-of-bridges-2/>)

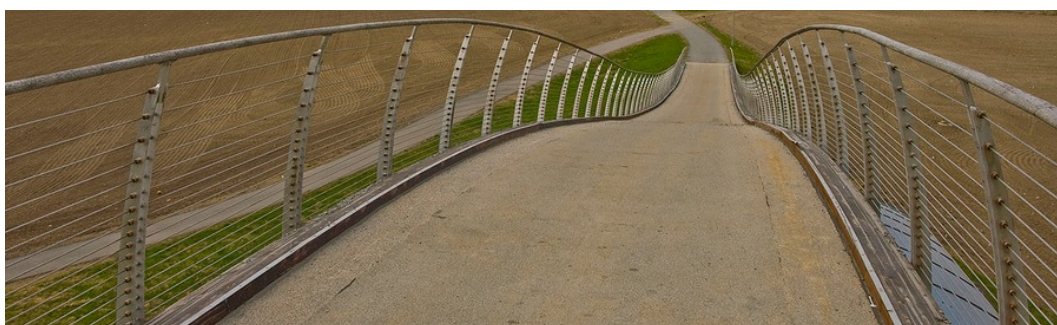


Figura 111 - Passadiço - parte superior (Rage, 2011)



Figura 112 - Orientação da ponte (Google Earth, 2013)



Figura 113 - Processo de fabrico da madeira lamelada colada da ponte Leonardo (Structure Magazine, 2005)

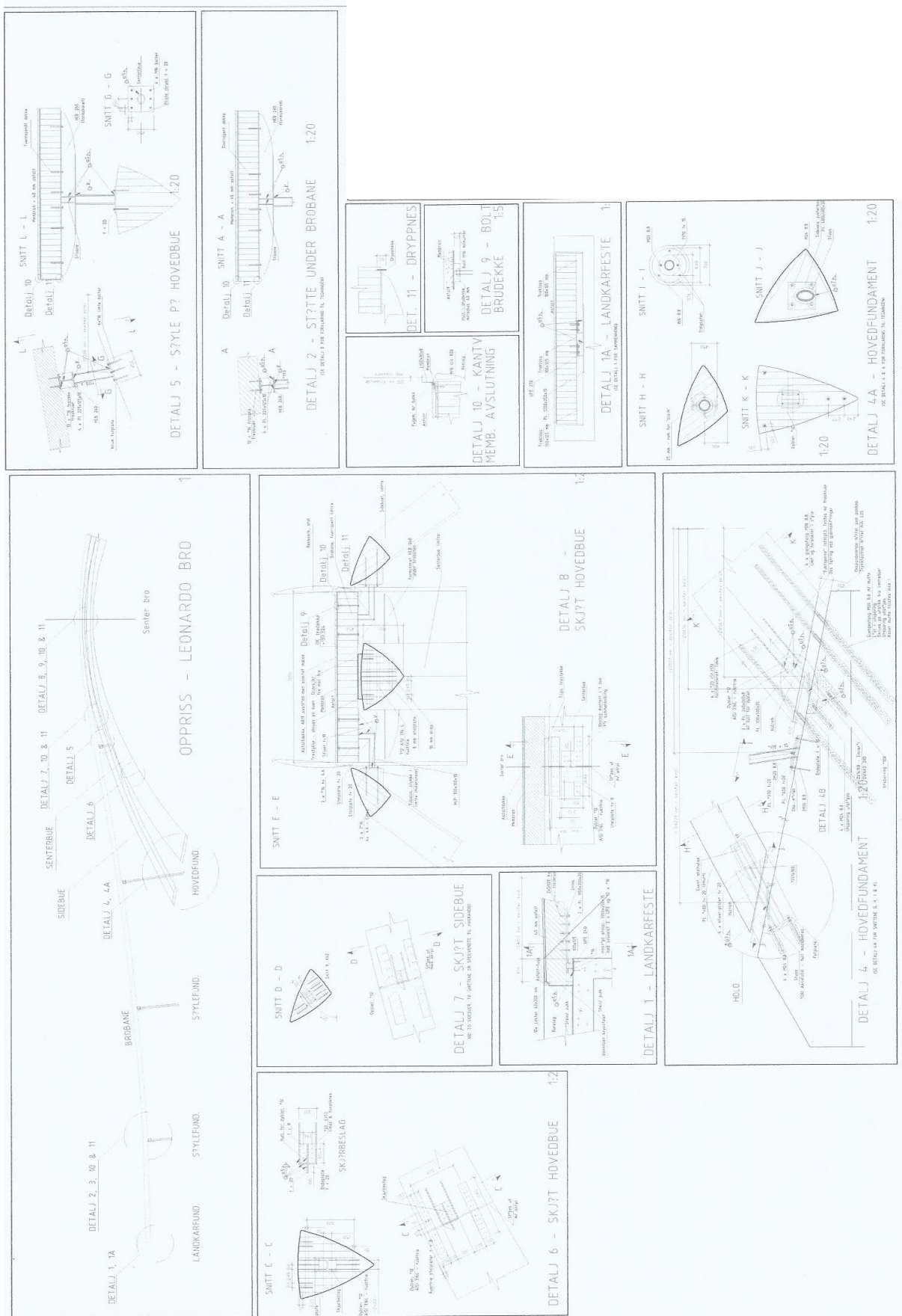


Figura 115 - Pormenores da ponte Leonardo (Moelven, 2013)