



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

# **Classificação e Aplicação Estrutural da Madeira de Secção Circular de Pinheiro Bravo**

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

**Autor**

**Telmo Filipe Marques Morgado**

**Orientadores**

**João Henrique Jorge de Oliveira Negrão**

**José Maria Santos Rodrigues Saporiti Machado**

**Coimbra, Setembro, 2012**



# ÍNDICE GERAL

---

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vii
ÍNDICE DE TEXTO .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
ÍNDICE DE TABELAS .....	xix
SIMBOLOGIA .....	xxiii
<b>CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 – APLICAÇÃO ESTRUTURAL DA MADEIRA DE SECÇÃO</b>	
<b>CIRCULAR .....</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 3 – AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL .....</b>	<b>23</b>
<b>CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA .....</b>	<b>71</b>
<b>CAPÍTULO 5 – MODELAÇÃO .....</b>	<b>99</b>
<b>CAPÍTULO 6 – LIGAÇÕES .....</b>	<b>143</b>
<b>CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>195</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>203</b>
<b>ANEXO A – CARACTERÍSTICAS VISUAIS DAS AMOSTRAS DE TOROS .....</b>	<b>213</b>
<b>ANEXO B – PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS AMOSTRAS DE TOROS .....</b>	<b>221</b>
<b>ANEXO C – CARACTERÍSTICAS DOS TOROS TORNEADOS .....</b>	<b>229</b>
<b>ANEXO D – CARACTERÍSTICAS DA AMOSTRA DE CALIBRAÇÃO .....</b>	<b>233</b>
<b>ANEXO E – CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA LIMPA .....</b>	<b>235</b>
<b>ANEXO F – RESULTADOS DO SIMPOLE .....</b>	<b>239</b>
<b>ANEXO G – RESULTADOS DAS LIGAÇÕES DE SISTEMA DE ANCORAGEM .....</b>	<b>241</b>
<b>ANEXO H – RESULTADOS DAS LIGAÇÕES DE CHAPA CENTRAL .....</b>	<b>243</b>
<b>ANEXO I – RESULTADOS DAS LIGAÇÕES DE VARÕES COLADOS .....</b>	<b>245</b>



# AGRADECIMENTOS

---

Ao terminar este trabalho não posso deixar de expressar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e entidades que de algum modo contribuíram para a sua concretização. Correndo o risco de cometer injustiças por omissão, agradeço:

- à Fundação para a Ciência e Tecnologia pela concessão da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/44909/2008), comparticipada pelo Fundo Social Europeu e por fundos nacionais do MCTES;
- à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo projecto PTDC/ECM/099833/2008, iniciativa QREN, financiado pela União Europeia por meio do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, através do COMPETE – Programa Operacional Factores de Competitividade;
- às instituições de acolhimento CIEC (Centro de Investigação em Engenharia Civil) e LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) pela disponibilização dos recursos necessários ao desenvolvimento do meu trabalho;
- ao Prof. Alfredo Dias, Prof. João Negrão e Doutor Saporiti Machado por toda a disponibilidade e apoio na realização de todo o presente trabalho;
- ao senhor David Rodrigues, pela sua ajuda e fantástica criatividade tendo sempre soluções para os meus problemas, e pelas interessantes conversas que me proporcionou. Aprendi muito consigo;
- ao Politécnico de Castelo Branco pelo empréstimo do actuador indispensável á realização dos ensaios de flexão;
- ao Calos Martins pela valiosa ajuda na realização de ensaios experimentais;
- aos funcionários do laboratório de estruturas do DEC, nomeadamente ao Fernando Rodrigues e Francisco Sousa pela sua ajuda nos diversos trabalhos laboratoriais;
- à Pedrosa e Irmãos por toda a disponibilidade e cortesia com que permitiram a realização dos ensaios de postes;
- aos amigos João Nuno, Ricardo Costa, Dulce Marques e Ricardo Oliveira por me suportarem em momentos em que fui mais chato e andei mais desnordeado.
- aos meus pais por toda a atenção e carinho.

Não posso deixar de manifestar o quanto foi honroso e gratificante para mim realizar este trabalho, *a todos um muito obrigado!*

**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA





# RESUMO

---

Este estudo pretende fornecer as bases em termos de métodos de classificação, propriedades mecânicas e ligações para toros de pequeno diâmetro de Pinheiro bravo, de modo a permitir o seu uso em aplicações estruturais.

Nesse sentido, foram seleccionadas duas amostras de toros de Pinheiro bravo, representativas da zona Centro e Norte de Portugal. Os toros foram caracterizados visualmente segundo a norma Europeia EN 1310 e ensaiados à flexão e compressão segundo a EN 14251. Foram determinadas experimentalmente a resistência à flexão e a resistência à compressão, bem como o módulo de elasticidade paralelo às fibras e a massa volúmica. As restantes propriedades mecânicas foram inferidas a partir das anteriores segundo a EN 384. São apresentados, igualmente, estudos sobre a influência das singularidades da madeira (características e defeitos) nas propriedades mecânicas do material. É também analisada a determinação experimental do módulo de elasticidade dinâmico bem como o seu uso como parâmetro de previsão da resistência.

Ferramentas que permitam a geração de toros virtuais, baseada na distribuição estatística de determinadas características visuais e físicas, e estimar as suas propriedades mecânicas são de grande utilidade na previsão da qualidade da madeira de secção circular de uma floresta. Para este fim foi desenvolvido o algoritmo SIMPOLE (SIMulator of POLEs). Este algoritmo permite a geração da geometria de um toro, bem como as propriedades mecânicas da madeira limpa e a distribuição de nós ao longo do seu comprimento. A geração das características é feita com base em distribuições estatísticas. As propriedades mecânicas dos toros são determinadas de acordo com as normas EN 14251 ou EN 14229, para o caso de ensaio como viga simplesmente apoiada ou viga encastrada, respectivamente. O algoritmo tem como *output* a resistência à flexão, o módulo de elasticidade e a localização e causa de rotura. O SIMPOLE foi usado na previsão das propriedades mecânicas de duas amostras de madeira de secção circular de Pinheiro bravo. O potencial do algoritmo desenvolvido é discutido com base nos resultados obtidos.

A aplicação estrutural deste tipo de elementos depende fortemente das ligações, uma vez que o seu dimensionamento condiciona na maioria dos casos o dimensionamento de toda a estrutura. Assim, a viabilidade e competitividade deste tipo de estrutura estão directamente dependentes do desempenho mecânico das ligações. Neste trabalho foram estudados o comportamento mecânico, força de rotura e rigidez, de três configurações de ligações, usando madeira de secção circular de Pinheiro bravo, segundo a norma EN 26891. As configurações abordadas neste estudo passam pelo i) uso de varões colados ii) uso de uma cavilha como sistema de ancoragem e iii) uso de uma chapa central. Os resultados obtidos são analisados e comparados com os obtidos recorrendo a modelos numéricos, sendo ainda analisada a aplicabilidade dos métodos preconizados no Eurocódigo 5.

**Palavras chave:** Madeira, secção circular, propriedades mecânicas, modelação, classificação, ligações

---





# ABSTRACT

---

This study was carried out with the purpose of providing knowledge on grading processes, mechanical properties and connections applied to small diameter maritime pine roundwood, so this material could be effectively applied in structural applications.

For that, two samples of maritime pine specimens, representative of the Central and Northern part of Portugal, were selected. The specimens were visually characterized according to the European standard EN 1310 and tested in bending and compression according to EN 14251. The bending and compression strengths, the modulus of elasticity parallel to the grain and the density of the logs were experimentally determined. The remaining mechanical properties were assessed according to EN 384. Studies are presented on the influence of features of wood (characteristics and defects) in the mechanical properties of the material. The use of the dynamic modulus of elasticity as a parameter for predicting strength is also assessed.

Tools that allows the generation of virtual poles, based on the statistical distribution of selected visual and physical properties, and the estimation of their mechanical properties are of great help for predicting the quality of the roundwood that a forest stand can provide. To this end an algorithm, SIMPOLE (SIMulator of POLEs), was developed. This algorithm allows the generation of pole's geometry, as well as the mechanical properties of clear wood and the distribution of knots along its length. This generation is made through statistical distributions. The generated poles are simulated, either according to standard EN 14251 or according to EN 14229, for testing with simple supported beam conditions or with cantilever beam conditions, respectively. The algorithm outputs are: the bending strength, the modulus of elasticity, the location, and cause of failure. The algorithm was used to estimate the mechanical properties of two samples of maritime pine poles. Based on the the results obtained the potential of the SIMPOLE is discussed.

The structural application of this type of elements depends strongly on the connections, since its design often determines the design of the whole structure. Hence, the viability and competitiveness of this type of structure are directly dependent on the mechanical performance of the connections. In this study, the mechanical behavior, failure load and stiffness of three connection configurations using maritime pine wood, following standard EN 26891, was investigated. The studied configurations are based on i) glued-in rods ii) dowel nut and iii) central plates. The obtained results are analyzed and compared with the ones obtained from numerical models, being also analyzed the applicability of the design rules from Eurocode 5.

**Key Words:** Wood, round section, mechanical properties, simulation, grading, connections



# ÍNDICE DE TEXTO

---

<b>1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>1</b>
1.1	Introdução .....	1
1.2	Objectivos .....	2
1.3	Organização da tese.....	2
<b>2</b>	<b>APLICAÇÃO ESTRUTURAL DA MADEIRA DE SECÇÃO CIRCULAR .....</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução .....	5
2.2	Vantagens.....	5
2.3	Desvantagens .....	9
2.4	Aplicações estruturais .....	10
2.4.1	<i>Barreiras</i> .....	11
2.4.2	<i>Parques infantis</i> .....	11
2.4.3	<i>Fundações</i> .....	12
2.4.4	<i>Edifícios</i> .....	12
2.4.5	<i>Coberturas</i> .....	15
2.4.6	<i>Torres</i> .....	16
2.4.7	<i>Estruturas de contenção de terras</i> .....	17
2.4.8	<i>Pontes</i> .....	18
2.5	Conclusões .....	20
<b>3</b>	<b>AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL .....</b>	<b>23</b>
3.1	Introdução .....	23
3.2	Propriedades mecânicas de espécies de madeira de secção circular .....	24
3.3	Amostragem.....	28
3.4	Caracterização visual das amostras .....	29
3.4.1	<i>Características geométricas</i> .....	29
3.4.2	<i>Lenho juvenil</i> .....	30
3.4.3	<i>Fio torcido</i> .....	32
3.4.4	<i>Taxa de crescimento</i> .....	33
3.4.5	<i>Lenho de reacção</i> .....	34
3.4.6	<i>Fendas</i> .....	34
3.4.7	<i>Nós</i> .....	35
3.4.8	<i>Análise das amostras</i> .....	38
3.5	Ensaio de toros .....	38
3.5.1	<i>Ensaio de flexão</i> .....	38
3.5.2	<i>Ensaio de compressão</i> .....	42
3.5.3	<i>Teor de água e massa volúmica</i> .....	43
3.6	Ensaio de madeira limpa .....	44
3.6.1	<i>Ensaio de flexão</i> .....	45
3.6.2	<i>Ensaio de compressão</i> .....	47
3.6.3	<i>Teor de água e massa volúmica</i> .....	48
3.7	Tratamento de resultados .....	49
3.7.1	<i>Toros</i> .....	49
3.7.2	<i>Madeira limpa</i> .....	53
3.8	Análise de resultados.....	54
3.8.1	<i>Comparação entre amostras</i> .....	54

3.8.2	<i>Enquadramento das propriedades mecânicas</i> .....	56
3.8.3	<i>Efeito do torneamento</i> .....	59
3.8.4	<i>Relações estatísticas entre características</i> .....	62
3.9	Conclusões .....	68
<b>4</b>	<b>AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA</b> .....	<b>71</b>
4.1	Introdução.....	71
4.2	Técnicas de avaliação não destrutiva.....	72
4.2.1	<i>Avaliação visual</i> .....	72
4.2.2	<i>Análise de imagem</i> .....	75
4.2.3	<i>Ultrasons</i> .....	78
4.2.4	<i>Vibração</i> .....	81
4.2.5	<i>Introdução de esforços mecânicos</i> .....	84
4.2.6	<i>Avaliação qualitativa das técnicas de avaliação não destrutiva</i> .....	86
4.3	Avaliação não destrutiva das amostras .....	88
4.3.1	<i>Avaliação visual</i> .....	88
4.3.2	<i>Vibração</i> .....	91
4.3.3	<i>Ultrasons</i> .....	93
4.3.4	<i>Análise das técnicas de avaliação não destrutiva</i> .....	96
4.4	Conclusões .....	97
<b>5</b>	<b>MODELAÇÃO</b> .....	<b>99</b>
5.1	Introdução.....	99
5.2	Modelos para características e propriedades da madeira .....	100
5.2.1	<i>Características visuais</i> .....	100
5.2.2	<i>Propriedades mecânicas</i> .....	108
5.3	Modelo desenvolvido .....	112
5.3.1	<i>SIMPOLE</i> .....	112
5.3.2	<i>Módulo de geração de toros</i> .....	115
5.3.3	<i>Módulo de ensaio de toros</i> .....	122
5.3.3.1	Ensaio segundo a norma EN 14251 .....	122
5.3.3.2	Ensaio segundo a norma EN 14229 .....	127
5.3.3.3	Avaliação da influência dos parâmetros da fórmula de Hankinson.....	132
5.4	Calibração e validação do SIMPOLE.....	134
5.4.1	<i>Calibração</i> .....	134
5.4.2	<i>Validação</i> .....	140
5.5	Conclusões .....	140
<b>6</b>	<b>LIGAÇÕES</b> .....	<b>143</b>
6.1	Introdução.....	143
6.2	Tipologias de ligação.....	143
6.2.1	<i>Madeira-madeira</i> .....	144
6.2.2	<i>Varões colados</i> .....	145
6.2.3	<i>Parafusos de rosca à tracção</i> .....	147
6.2.4	<i>Chapas externas</i> .....	149
6.2.5	<i>Chapa central</i> .....	151
6.2.6	<i>Sistema de ancoragem</i> .....	156
6.2.7	<i>Avaliação qualitativa das tipologias de ligação</i> .....	159
6.3	Ensaio de ligações .....	161
6.3.1	<i>Ligações de chapa central</i> .....	162
6.3.2	<i>Ligações de sistema de ancoragem</i> .....	166

---

6.3.3	<i>Ligações de varões colados</i> .....	170
6.4	Análise de resultados.....	179
6.4.1	<i>Comparação do desempenho das ligações</i> .....	179
6.4.2	<i>Estimativa da carga de rotura e rigidez das ligações</i> .....	181
6.4.2.1	Ligações de chapa central.....	181
6.4.2.2	Ligações de sistema de ancoragem.....	185
6.4.2.3	Ligações de varões colados.....	187
6.5	Conclusões.....	192
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>195</b>
7.1	Conclusões.....	195
7.2	Trabalho futuro.....	198
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>203</b>
	<b>ANEXO A – CARACTERÍSTICAS VISUAIS DAS AMOSTRAS DE TOROS</b> .....	<b>213</b>
	<b>ANEXO B – PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS AMOSTRAS DE TOROS</b> .....	<b>221</b>
	<b>ANEXO C – CARACTERÍSTICAS DOS TOROS TORNEADOS</b> .....	<b>229</b>
	<b>ANEXO D – CARACTERÍSTICAS DA AMOSTRA DE CALIBRAÇÃO</b> .....	<b>233</b>
	<b>ANEXO E – CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA LIMPA</b> .....	<b>235</b>
	<b>ANEXO F – RESULTADOS DO SIMPOLE</b> .....	<b>239</b>
	<b>ANEXO G – RESULTADOS DAS LIGAÇÕES DE SISTEMA DE ANCORAGEM</b> ...	<b>241</b>
	<b>ANEXO H – RESULTADOS DAS LIGAÇÕES DE CHAPA CENTRAL</b> .....	<b>243</b>
	<b>ANEXO I – RESULTADOS DAS LIGAÇÕES DE VARÕES COLADOS</b> .....	<b>245</b>



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1 – Organização da tese.....	2
Figura 2.1 – Variação do rácio entre as propriedades da secção de uma viga circular e a maior secção serrada possível de obter. Toro com 3,1m de comprimento e 1% de adelgaçamento (Wolfe, 2000).....	6
Figura 2.2 – Distorção em madeira serrada durante a secagem devido ao lenho juvenil (Yeates, 1999).....	6
Figura 2.3 – Viga de madeira suportando vigas de aço após incêndio (Júnior e Dias, 1997)....	7
Figura 2.4 – Variação dimensional da madeira de secção circular (Ranta-Maunus, 1999a) ....	9
Figura 2.5 – Estrutura mais elementar com madeira de secção circular (Mateus, 1961).....	10
Figura 2.6 – Exemplos de mobiliário urbano (Livingston, 2006) .....	10
Figura 2.7 – <i>Rails</i> de protecção (Faller <i>et al.</i> , 2010) .....	11
Figura 2.8 – Teste de impacto de um veículo (Faller <i>et al.</i> , 2010).....	11
Figura 2.9 – Exemplos de parques infantis (Ranta-Maunus, 1999a; Catálogo MTL).....	11
Figura 2.10 – Cravamento de uma estaca de madeira (Miná, 2005) .....	12
Figura 2.11 – Edifícios de troncos (Ranta-Maunus, 1999a; Mill, 2011).....	12
Figura 2.12 – Estrutura do KIND (Chrisp <i>et al.</i> , 2003).....	13
Figura 2.13 – Centro de treino (Burton <i>et al.</i> , 1998) .....	13
Figura 2.14 – Arco formado por toros de madeira de secção circular (Burton <i>et al.</i> , 1998)....	13
Figura 2.15 – Estrutura da habitação (Mello, 2006).....	14
Figura 2.16 – Habitação concluída (Mello, 2006).....	14
Figura 2.17 – Estrutura de demonstração (Levan, 2000) .....	14
Figura 2.18 – Ligações usadas no telhado da estrutura (Levan, 2000) .....	14
Figura 2.19 – IBAMA (Mello e Melo, 2002) .....	14
Figura 2.20 – Estrutura do CENAFLOR (Mello e Melo, 2006).....	14
Figura 2.21 – Cobertura (Ranta-Maunus, 1999a).....	15
Figura 2.22 – Tipos de treliças planas para uso de madeira de secção circular (Júnior e Brito, 2010).....	15
Figura 2.23 – Montagem da cobertura (Malo e Ellingsbo, 2010) .....	15
Figura 2.24 – Cobertura final (Malo e Ellingsbo, 2010) .....	15
Figura 2.25 – Biblioteca de Darby (Engineers, 2010).....	16
Figura 2.26 – Cobertura de uma bancada (Engineers, 2010) .....	16
Figura 2.27 – Torres <i>a</i> ) Wikipedia (2010) <i>b</i> ) photographersdirect (2010) <i>c</i> ) Ranta-Maunus (1999a) <i>d</i> ) Vries e Gard (2006a) <i>e</i> ) Dias (2009) <i>f</i> ) Walford e Reelick (2006) .....	17
Figura 2.28 – <i>a</i> ) Cortinas autoportantes <i>b</i> ) paliçadas de madeira (Pereira, 2009) .....	18
Figura 2.29 – Estabilização de taludes (Verde, 2010; Flach e Frenette, 2000).....	18
Figura 2.30 – Passadiço de madeira .....	18
Figura 2.31 – Ponte pedonal suspensa (Laboratory, 2010) .....	18
Figura 2.32 – Ponte treliçada (Al-Khattat, 2008) .....	19
Figura 2.33 – Tabuleiro misto madeira-betão (Pigozzo <i>et al.</i> , 2004).....	19

Figura 2.34 – Execução de uma ponte mista madeira-betão (Junior, 2004).....	19
Figura 2.35 – Vigas duplas (Júnior <i>et al.</i> , 2006) ´ .....	20
Figura 3.1 – Distribuição nacional de Pinheiro bravo (adaptado de Rodrigues e Sousa, 2009) .....	28
Figura 3.2 – Máquina de torneamento .....	29
Figura 3.3 – Toro torneado .....	29
Figura 3.4 – Propriedades do lenho juvenil (USDA, 1999).....	31
Figura 3.5 – Medição do fio torcido .....	33
Figura 3.6 – Identificação do lenho de compressão.....	34
Figura 3.7 – Formação de nós vivos e nós inclusos (Hoffmeyer, 1987).....	36
Figura 3.8 – Nós agrupados .....	37
Figura 3.9 – Diâmetro de um agrupamento de nós (CEN, 1995) .....	37
Figura 3.10 – Dispositivo de ensaio de flexão de toros .....	38
Figura 3.11 – Pormenor de um apoio.....	39
Figura 3.12 – Pormenor de um ponto de carga .....	39
Figura 3.13 – Maquinação dos blocos de madeira.....	39
Figura 3.14 – Esquema de ensaio para determinação de a) $E_{local}$ b) $E_{global}$ .....	40
Figura 3.15 – Medições a meio vão .....	40
Figura 3.16 – Medições nos apoios.....	40
Figura 3.17 – Localização da célula de carga .....	41
Figura 3.18 – Equipamento de aquisição de dados .....	41
Figura 3.19 – Gráfico força-deslocamento até à rotura em flexão.....	42
Figura 3.20 – Rotura numa secção com nós .....	42
Figura 3.21 – Rotura a meio vão.....	42
Figura 3.22 – Ensaio de compressão de provetes de toros.....	42
Figura 3.23 – Gráfico força-deslocamento até à rotura em compressão.....	43
Figura 3.24 – Rotura na proximidade de nós .....	43
Figura 3.25 – Rotura devido à curvatura da peça .....	43
Figura 3.26 – Secagem das rodela dos toros .....	44
Figura 3.27 – Peças de madeira limpa obtidas dos toros .....	44
Figura 3.28 – Dispositivo de ensaio de flexão de madeira limpa .....	45
Figura 3.29 – Pormenor do apoio.....	45
Figura 3.30 – Pormenor da aplicação da carga .....	45
Figura 3.31 – Pormenor das medições nos apoios .....	46
Figura 3.32 – Localização da célula de carga .....	46
Figura 3.33 – Gráfico força-deslocamento até à rotura em flexão de uma peça de madeira limpa.....	47
Figura 3.34 – Roturas das peças de madeira limpa em tracção na zona central .....	47
Figura 3.35 – Ensaio de compressão de provetes de peças de madeira limpa.....	47
Figura 3.36 – Gráfico força/deslocamento até à rotura em compressão .....	48
Figura 3.37 – Exemplos de roturas no ensaio de compressão de provetes de madeira limpa .	48
Figura 3.38 – Comparação da resistência à flexão de várias espécies .....	57



Figura 3.39 – Comparação do módulo de elasticidade de várias espécies de madeira de secção circular .....	58
Figura 3.40 – Comparação da resistência à compressão de várias espécies de madeira de secção circular .....	58
Figura 3.41 – Comparação da massa volúmica de várias espécies de madeira de secção circular .....	59
Figura 3.42 – Relação entre $f_{c,0}$ e $f_m$ .....	65
Figura 4.1 – Mapa da massa volúmica do toro (Adjanooun et al., 1998).....	76
Figura 4.2 – Evolução da massa volúmica média ao longo do toro (Adjanooun <i>et al.</i> , 1998).....	76
Figura 4.3 – Representação de um toro mostrando os seus defeitos internos (Bhandarkar <i>et al.</i> , 2006).....	77
Figura 4.4 – Variação típica da velocidade da onda com a orientação do fio, da direcção longitudinal para a radial (Schafer, 2000) .....	79
Figura 4.5 – Variação típica da velocidade da onda com a orientação do fio, da direcção tangencial para a radial (Schafer, 2000) .....	79
Figura 4.6 – Esquema do modelo de vibração transversal (Ross e Pellerin, 1994).....	83
Figura 4.7 – Esquema de funcionamento de uma máquina MSR (Carreira <i>et al.</i> , 2003).....	84
Figura 4.8 – Equipamento de vibração longitudinal, <i>Timber Grader</i> MTG, e sistema de apoio dos toros .....	91
Figura 4.9 – Equipamento de ultra sons, <i>Pundit Plus</i> .....	93
Figura 4.10 – Execução do método dos ultrasons .....	94
Figura 5.1 – Esquema da modelação dos nós (Samson, 1993).....	100
Figura 5.2 – Previsão da forma dos nós segundo um plano de corte (Samson, 1993) .....	100
Figura 5.3 – Redução da resistência à flexão devido às características dos nós existentes (adaptado de Patzelt e Olbrich, 1998).....	101
Figura 5.4 – Definição da direcção longitudinal, radial, tangencial e do ângulo de inserção dos ramos (Xu, 2002) .....	102
Figura 5.5 – Variação do módulo de elasticidade dos nós segundo o ângulo de inserção dos ramos no tronco (Xu, 2002) .....	102
Figura 5.6 – Concentração de tensões segundo a direcção do fio em redor de um buraco em função do ângulo $\theta$ . a) esforço de tracção, b) esforço de corte (Hoffmeyer, 1987).....	103
Figura 5.7 – Malha de elementos finitos baseada na <i>Flow Grain Analogy</i> (Foley, 2003).....	104
Figura 5.8 – Esquema representativo da modelação de um troço de um poste (Franco e Pellicane, 1993) .....	105
Figura 5.9 – a) Factores de concentração de tensões longitudinais para diversas posições do nó b) factores de concentração de tensões transversais para diversas localizações do nó (Cramer e Goodman, 1983).....	106
Figura 5.10 – Divisão dos elementos em tiras e definição de $x$ (Foley, 2003).....	107
Figura 5.11 – Distribuição das tensões num elemento de madeira com nós sujeito a flexão (Foley, 2003).....	107

Figura 5.12 – Resistência (R) de uma viga sujeita a um esforço S (Riberholt e Madsen, 1979) .....	109
Figura 5.13 – Esquema do processo de simulação (Pellicane, 1984) .....	111
Figura 5.14 – Esquema da técnica de Monte Carlo (Hahn e Shapiro, 1967).....	113
Figura 5.15 – Simplificações admitidas no SIMPOLE.....	114
Figura 5.16 – Esquema de geração da variável $V_n$ seguindo uma lei normal .....	115
Figura 5.17 – Distribuição normal .....	115
Figura 5.18 – Histograma de valores gerados segundo uma lei normal .....	115
Figura 5.19 – Distribuição lognormal .....	116
Figura 5.20 – Histograma de valores gerados segundo uma lei lognormal .....	116
Figura 5.21 – Representação esquemática de nós e respectivas áreas de influência .....	117
Figura 5.22 – Comparação entre os pares de pontos ( $f_m ; \rho$ ) reais (a vermelho) e os gerados em computador (a azul).....	118
Figura 5.23 – Exemplificação do método de Gauss.....	120
Figura 5.24 – Parâmetros necessários à determinação da área de uma faixa.....	121
Figura 5.25 – Esquema do algoritmo de geração de toros .....	121
Figura 5.26 – Esquema de carregamento para a determinação das propriedades mecânicas segundo a norma EN 14251 .....	122
Figura 5.27 – Diagrama de momentos flectores e deformada para o carregamento aplicado segundo a norma EN 14251 .....	123
Figura 5.28 – Diagrama de tensão actuante após a rotura de faixas .....	125
Figura 5.29 – Representação dos sectores circulares que compreendem uma faixa.....	125
Figura 5.30 – Diagrama de tensão actuante após rotura e plastificação de faixas.....	126
Figura 5.31 – Esquema de ensaio segundo a norma EN 14229 .....	127
Figura 5.32 – Deformada de uma viga em consola com carregamento vertical pontual na extremidade livre.....	128
Figura 5.33 – Esquema do procedimento usado para a determinação do deslocamento na extremidade livre da consola.....	130
Figura 5.34 – Diagrama do momento flector aplicado numa viga em consola .....	131
Figura 5.35 – Representação gráfica das equações de $\Delta(x)$ (Fertis, 2006) .....	131
Figura 5.36 – Esquema de procedimentos para a determinação da resistência à flexão segundo a norma EN 14229 .....	132
Figura 5.37 – Secção com nós em estudo .....	133
Figura 5.38 – Influência do expoente $n$ no módulo de elasticidade e resistência à flexão da secção .....	133
Figura 5.39 – Influência do rácio $P_0/P_{90}$ no módulo de elasticidade e resistência à flexão da secção .....	133
Figura 5.40 – Influência do diâmetro dos nós no módulo de elasticidade e resistência à flexão da secção .....	134
Figura 5.41 – Zona de recolha da amostra da amostra de postes.....	135
Figura 5.42 – Esquema do ensaio de flexão dos postes .....	136
Figura 5.43 – Dispositivo de ensaio de flexão dos postes .....	136
Figura 5.44 – Exemplos de roturas dos postes.....	137

Figura 5.45 – Evolução da massa volúmica ao longo do comprimento dos postes .....	137
Figura 5.46 – Amostras recolhidas dos postes para posterior imersão em água .....	138
Figura 5.47 – Ensaio das peças de madeira limpa dos postes .....	138
Figura 6.1 – Várias ligações madeira - madeira (Huybers, 1996; Yeates, 1999).....	144
Figura 6.2 – Ligação T-joint (Malo e Ellingsbo, 2010).....	145
Figura 6.3 – Exemplos de ligações de varões colados (Yeates, 1999; Vale <i>et al.</i> , 2011) .....	146
Figura 6.4 – Placa de encabeçamento tipo macho (Hamm e Schnuriger, 2002).....	148
Figura 6.5 – Placa de encabeçamento tipo fêmea (Hamm e Schnuriger, 2002).....	148
Figura 6.6 – Exemplos de chapas externas (Yeates, 1999; Lukindo <i>et al.</i> , 1997).....	149
Figura 6.7 – Exemplo de chapa externa com nervuras (Morris <i>et al.</i> , 2008) .....	150
Figura 6.8 – Ligações de chapas externas tubulares (Morris <i>et al.</i> , 2008; Al-Khattat, 2002) .....	150
Figura 6.9 – Ligações com uso de placas finas (Stulz e Mukerji, 1993).....	151
Figura 6.10 – Ligações de chapa central (Jorissen, 2006).....	151
Figura 6.11 – Aplicação de cintas de arame (Yeates, 1999) .....	151
Figura 6.12 – Ligações com chapa central rugosa (Lukindo <i>et al.</i> , 1998a).....	154
Figura 6.13 – Configurações da ligação com duas chapas longitudinais pregadas estudada por Shim <i>et al.</i> (2009).....	155
Figura 6.14 – Configurações da ligação de chapa central pregada estudada por Shim (2004).....	155
Figura 6.15 – Ligação usando uma barra metálica prismática como bloco de ancoragem (Vries e Gard; 2006a) .....	156
Figura 6.16 – Esquema da ligação com cavilha metálica como bloco de ancoragem estudada por Eckelman e Senft (1995) .....	157
Figura 6.17 – Ligações com cavilhas ocas como bloco de ancoragem propostas por Eckelman (2004).....	158
Figura 6.18 – Esquema da ligação de chapa central estudada.....	162
Figura 6.19 – Ligação de chapa central estudada.....	163
Figura 6.20 – Pormenor da colocação de uma ligação de chapa central na prensa de ensaio .....	163
Figura 6.21 – Ligação de chapa central colocada na prensa de ensaio .....	163
Figura 6.22 – Pormenor da medição de deslocamentos nas ligações de chapa central.....	164
Figura 6.23 – Procedimento de carga (CEN, 1991) .....	164
Figura 6.24 – Gráfico força-tempo típico deste tipo de ensaio .....	165
Figura 6.25 – Gráfico força-deslocamento de uma ligação.....	165
Figura 6.26 – Rotura por tracção na madeira (esq.) e rotura devido a formação de fendas (dir.) .....	165
Figura 6.27 – Rotura com plastificação dos ligadores .....	165
Figura 6.28 – Esquema da ligação de sistema de ancoragem estudada.....	167
Figura 6.29 – Ligação de sistema de ancoragem estudada.....	168
Figura 6.30 – Ligação de sistema de ancoragem colocada na prensa de ensaio .....	168
Figura 6.31 – Sistema de medição de deslocamentos nas ligações de sistema de ancoragem.....	168
Figura 6.32 – Gráfico força-deslocamento típico da ligação de sistema de ancoragem .....	169

Figura 6.33 – Rotura por tracção na direcção perpendicular às fibras nas ligações de sistema de ancoragem estudadas .....	169
Figura 6.34 – Ovalidade do furo devido a esmagamento provocado pela cavilha .....	170
Figura 6.35 – Ensaio de arrancamento .....	171
Figura 6.36 – Pormenor do ensaio de arrancamento.....	171
Figura 6.37 – Rotura pela madeira.....	172
Figura 6.38 – Rotura pela cola .....	172
Figura 6.39 – Espaçamentos recomendados para varões colados (CEN, 2003a) .....	173
Figura 6.40 – Esquema das ligações de varões colados estudadas .....	175
Figura 6.41 – Elaboração da ligação de varões colados .....	175
Figura 6.42 – Ligação de varões colados estudada.....	176
Figura 6.43 – Cabeçote aplicado às ligações de varões colados .....	176
Figura 6.44 – Ligação de varões colados colocada na prensa de ensaio .....	177
Figura 6.45 – Sistema de medição de deslocamentos nas ligações de varões colados .....	177
Figura 6.46 – Gráfico força-deslocamento típico da ligação de varões colados.....	177
Figura 6.47 – Rotura pelos varões, numa ligação de varões colados.....	178
Figura 6.48 – Rotura pela madeira, numa ligação de varões colados.....	178
Figura 6.49 – Gráfico força-deslocamento típico das tipologias de ligação estudadas .....	181
Figura 6.50 – Modos de rotura (CEN, 2002) .....	182
Figura 6.51 – Componentes da deformação medida numa ligação de varões colados.....	189
Figura 6.52 – Discretização em elementos finitos .....	191
Figura 6.53 – Corte ilustrando a deformada e as tensões instaladas segundo a direcção do fio (MPa) .....	191
Figura 6.54 – Defeito de execução numa ligação de varões colados.....	192
Figura 7.1 – Estrutura piloto proposta .....	199
Figura 7.2 – Vista de topo da estrutura piloto proposta com identificação dos nós de ligação e elementos estruturais.....	200
Figura 7.3 – Pormenor do nó de ligação tipo 1 .....	200
Figura 7.4 – Pormenor do nó de ligação tipo 2.....	201
Figura 7.5 – Pormenor do nó de ligação tipo 3 .....	201
Figura 7.6 – Pormenor do nó de ligação tipo 4.....	201
Figura 7.7 – Pormenor do nó de ligação tipo 5 .....	202

# ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 2.1 – Consumo energético de vários materiais (Chrisp <i>et al.</i> , 2003, Lukindo <i>et al.</i> , 1997).....	7
Tabela 2.2 – Características de diversos materiais de construção (Júnior e Dias, 1997).....	7
Tabela 3.1 – Resenha bibliográfica das propriedades mecânicas de diversas espécies de madeira de secção circular.....	27
Tabela 3.2 – Ovalidade dos toros de cada amostra (%).....	29
Tabela 3.3 – Diâmetro nominal dos toros de cada amostra (mm).....	30
Tabela 3.4 – Adelgaçamento dos toros de cada amostra (mm/m).....	30
Tabela 3.5 – Percentagem de lenho juvenil dos toros de cada amostra (%).....	32
Tabela 3.6 – Desvio do fio dos toros de cada amostra (cm/m).....	33
Tabela 3.7 – Taxa de crescimento dos toros de cada amostra (mm).....	33
Tabela 3.8 – Características das secções com nós dos toros de cada amostra.....	37
Tabela 3.9 – Propriedades mecânicas das amostras de toros, determinadas experimentalmente.....	52
Tabela 3.10 – Propriedades mecânicas das amostras de toros, determinadas segundo a norma EN 384.....	52
Tabela 3.11 – Propriedades mecânicas das peças de madeira limpa, determinadas experimentalmente.....	54
Tabela 3.12 – Propriedades mecânicas das peças de madeira limpa, determinadas segundo a norma EN384.....	54
Tabela 3.13 – Comparação entre as propriedades mecânicas médias das amostras de toros...55	55
Tabela 3.14 – Comparação entre as propriedades mecânicas dos toros e da respectiva madeira limpa.....	55
Tabela 3.15 – Diferença relativa entre as propriedades mecânicas dos toros e respectiva madeira limpa.....	55
Tabela 3.16 – Comparação entre as propriedades mecânicas das amostras e das de madeira serrada de Pinheiro bravo para estruturas.....	56
Tabela 3.17 – Propriedades mecânicas da amostra de toros torneados.....	60
Tabela 3.18 – Comparação de características visuais da amostra de toros antes (NT) e após torneamento (T).....	60
Tabela 3.19 – Comparação das propriedades mecânicas da amostra toros antes (NT) e após torneamento (T).....	60
Tabela 3.20 – Comparação entre o valor médio das propriedades mecânicas da amostra de toros torneados e não torneados.....	61
Tabela 3.21 – Correlações entre propriedades da amostra de toros do Norte de Portugal.....	63
Tabela 3.22 – Correlações entre propriedades da amostra de toros do Centro de Portugal.....	64
Tabela 3.23 – Previsão da resistência das amostras de toros usando uma regressão linear múltipla.....	66

Tabela 3.24 – Correlações entre propriedades da madeira limpa e entre as propriedades dos toros e da respectiva madeira limpa .....	67
Tabela 4.1 – Classificação visual sugerida por Boren e Barnard (2000) .....	73
Tabela 4.2 – Classificação visual sugerida por Ranta-Maunus (1999a) .....	74
Tabela 4.3 – Classificação visual sugerida por Morgado <i>et al.</i> (2010) .....	75
Tabela 4.4 – Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre o $E_{din}$ obtido por ondas de tensão e as propriedades mecânicas .....	81
Tabela 4.5 – Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre o $E_{din}$ obtido por vibração longitudinal e as propriedades mecânicas .....	82
Tabela 4.6 – Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre $E_{din}$ obtido por vibração transversal e as propriedades mecânicas .....	84
Tabela 4.7 – Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre a resistência à furação e propriedades mecânicas .....	85
Tabela 4.8 – Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre a resistência ao arrancamento de parafusos ou a resistência à perfuração por impacto e a massa volúmica .....	86
Tabela 4.9 – Comparação qualitativa das técnicas de avaliação não destrutiva .....	88
Tabela 4.10 – Propriedades mecânicas dos toros classificados como classe A .....	89
Tabela 4.11 – Propriedades mecânicas dos toros classificados como classe B .....	89
Tabela 4.12 – Propriedades mecânicas dos toros rejeitados .....	89
Tabela 4.13 – Propriedades mecânicas do conjunto de toros seleccionados para aplicação estrutural tendo em conta novos critérios de classificação .....	91
Tabela 4.14 – Frequência própria de vibração ( $f$ ) e módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{din,vl}$ ) das amostras de toros .....	92
Tabela 4.15 – Coeficientes de correlação entre as propriedades dinâmicas ( $E_{din,vl}$ e $f$ ) e as propriedades mecânicas das amostras de toros .....	92
Tabela 4.16 – Previsão da resistência das amostras de toros usando o $E_{din,vl}$ numa regressão linear múltipla .....	93
Tabela 4.17 – Velocidade da onda ultrasónica ( $C$ ) e módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{din,us}$ ) dos toros .....	94
Tabela 4.18 – Coeficientes de correlação entre a $C$ medida nos toros e nas peças de madeira limpa (ML) e as suas propriedades mecânicas .....	95
Tabela 4.19 – Coeficientes de correlação entre o $E_{din,us}$ dos toros e das peças de madeira limpa (ML) e as suas propriedades mecânicas .....	95
Tabela 4.20 – Previsão da resistência das amostras de toros usando o $E_{din,us}$ numa regressão linear múltipla .....	96
Tabela 4.21 – Comparação dos coeficientes de correlação entre o $E_{din}$ obtidos pelos dois equipamentos e as propriedades mecânicas dos toros .....	97
Tabela 5.1 – Polígonos resultantes da intercepção entre os limites do nó e das faixas .....	120
Tabela 5.2 – Características visuais dos postes .....	135
Tabela 5.3 – Propriedades mecânicas dos postes .....	138
Tabela 5.4 – Propriedades mecânicas da amostra de madeira limpa saturada dos postes (média das duas peças) .....	138

Tabela 5.5 – Coeficientes da fórmula de Hankinson com melhor ajuste aos resultados experimentais .....	139
Tabela 5.6 – Propriedades mecânicas dos postes simulados .....	139
Tabela 5.7 – Características das roturas dos postes .....	139
Tabela 5.8 – Comparação entre as propriedades mecânicas das amostras de toros e as estimadas .....	140
Tabela 6.1 – Comparação das tipologias de ligação existentes .....	161
Tabela 6.2 – Resultados dos ensaios de ligações de chapa central .....	166
Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios de ligações de sistema de ancoragem .....	170
Tabela 6.4 – Resultados do arrancamento de varão roscado de 10mm de diâmetro e classe 4.8 .....	171
Tabela 6.5 – Resultados do arrancamento de varão roscado de 10mm de diâmetro e classe 8.8 .....	172
Tabela 6.6 – Configurações possíveis de varões colados na secção transversal .....	174
Tabela 6.7 – Resultados dos ensaios de ligações de varões colados .....	178
Tabela 6.8 – Cargas de rotura das tipologias de ligação estudadas (kN) .....	179
Tabela 6.9 – Tensões de rotura à tracção das tipologias de ligação estudadas (MPa) .....	180
Tabela 6.10 – Rigidez ( $K_s$ ) das tipologias de ligação estudadas (kN/mm) .....	180
Tabela 6.11 – Deformação para a carga máxima das tipologias de ligação estudadas (mm) .....	181
Tabela 6.12 – Coeficientes de correlação entre propriedades das ligações de chapa central .....	182
Tabela 6.13 – Cargas de rotura experimentais ( $F_{max}$ ) e estimadas ( $F_{max,est}$ ) das ligações de chapa central .....	184
Tabela 6.14 – Rigidez experimental ( $K_s$ ) e estimada ( $K_{s,est}$ ) das ligações de chapa central .....	185
Tabela 6.15 – Coeficientes de correlação entre propriedades das ligações de sistema de ancoragem .....	185
Tabela 6.16 – Cargas de rotura experimentais ( $F_{max}$ ) e estimadas ( $F_{max,est}$ ) das ligações de sistema de ancoragem .....	186
Tabela 6.17 – Rigidez experimental ( $K_s$ ) e estimada ( $K_{s,est}$ ) das ligações de sistema de ancoragem .....	187
Tabela 6.18 – Coeficientes de correlação entre propriedades das ligações de chapa central .....	187
Tabela 6.19 – Características dos varões roscados da classe 4.8 .....	188
Tabela 6.20 – Cargas de rotura experimentais ( $F_{max}$ ) e estimadas ( $F_{max,est}$ ) das ligações de varões colados .....	188
Tabela 6.21 – Rigidez experimental ( $K_s$ ) e estimada ( $K_{s,est}$ ) das ligações de varões colados .....	189
Tabela 6.22 – Comparação entre a rigidez obtida experimentalmente ( $K_s$ ) e a obtida por modelação simplificada ( $K_{s,est}$ ) .....	190
Tabela 6.23 – Propriedades dos materiais modelados .....	190
Tabela 6.24 – Rigidez obtida na modelação e experimentalmente .....	191
Tabela 7.1 – Material necessário para a construção da estrutura piloto .....	202





# SIMBOLOGIA

---

Apresenta-se a listagem dos principais símbolos. Os demais símbolos são definidos à medida que são introduzidos no texto.

## LETRAS LATINAS MAIÚSCULAS

$A_{\text{anilha}}$	-Área de uma anilha
$A_{\text{faixa}}$	-Área de uma faixa
$A_{\text{influência}}$	-Área de madeira afectada pela presença de um nó
$A_{\text{limpa}}$	-Área de madeira limpa numa faixa
$A_{\text{nós}}$	-Área de nós numa faixa
$C$	-Velocidade de onda ultrasónica
$E_0$	-Módulo de elasticidade na direcção do fio
$E_{0,05}$	-Valor característico do módulo de elasticidade de uma amostra
$E_{0,w}$	-Módulo de elasticidade para o teor de água de ensaio
$E_{90}$	-Módulo de elasticidade na direcção perpendicular ao fio
$E_{c,0}$	-Módulo de elasticidade em compressão na direcção do fio
$E_{c,90}$	-Módulo de elasticidade em compressão na direcção perpendicular ao fio
$E_{\text{din}}$	-Módulo de elasticidade dinâmico
$E_{\text{din,us}}$	-Módulo de elasticidade dinâmico obtido por ultrasons
$E_{\text{din,vl}}$	-Módulo de elasticidade dinâmico obtido por vibração longitudinal
$E_{\text{faixa,c}}$	-Módulo de elasticidade à compressão de uma faixa
$E_{\text{faixa,t}}$	-Módulo de elasticidade à tracção de uma faixa
$E_{\text{global}}$	-Módulo de elasticidade global
$E_{\text{local}}$	-Módulo de elasticidade local
$E_{\text{mean}}$	-Valor médio do módulo de elasticidade de uma amostra
$F$	-Força aplicada
$F_{\text{est}}$	-Força de rotura estimada
$F_{\text{max}}$	-Força de rotura
$G$	-Módulo de distorção
$I$	-Segundo momento de área de uma secção
$I_1$	- $I$ da menor secção do toro ao longo da distância $l_1$
$I_{\text{faixa}}$	- $I$ de uma faixa
$I_q$	- $I$ da secção onde é aplicada a carga de extremidade de uma viga em consola
$K_s$	-Rigidez de uma ligação
$L$	-Comprimento de um toro
$M$	-Momento flector
$N$	-Dimensão da amostra
$V$	-Volume do elemento de madeira
$W_G$	-Deslocamento a meio vão relativamente aos apoios num ensaio de flexão
$W_L$	-Deslocamento a meio vão relativo às extremidades da distância $l_1$

## LETRAS LATINAS MINÚSCULAS

$a$	-Valor médio da distância dos pontos de carga ao apoio mais próximo
$a_1$	-Espaçamento entre ligadores numa ligação
$a_f$	-Distância normalizada entre pontos de carga
$a_{fe}$	-Distância entre pontos de carga no ensaio
$b$	-Largura da peça de madeira
$d$	-Diâmetro do ligador
$d_1$	-Menor diâmetro do toro ao longo da distância $l_1$
$d_2$	-Maior diâmetro do toro ao longo da distância $l_1$
$d_g$	-Diâmetro da secção de encastramento numa viga encastrada
$d_h$	-Diâmetro horizontal da secção a meio vão de um toro
$d_{max}$	-Diâmetro máximo da secção
$d_{med}$	-Diâmetro resultante da média entre o diâmetro máximo e mínimo de uma secção
$d_{med,10anel}$	-Diâmetro da circunferência delimitada pelo décimo anel de crescimento de uma secção
$d_{min}$	-Diâmetro mínimo da secção
$d_{nó}$	-Diâmetro do nó
$d_{nom}$	-Diâmetro nominal de um toro
$d_q$	-Diâmetro da secção onde é aplicada a carga de extremidade de uma viga encastrada
$d_{toro}$	-Diâmetro do toro
$d_v$	-Diâmetro vertical da secção a meio vão de um toro
$e$	-Número de faixas em regime elástico
$e_n$	-Eixo neutro de uma secção
$f$	-Frequência própria de vibração
$f_{c,0}$	-Resistência à compressão na direcção do fio
$f_{c,0,k}$	-Valor característico da resistência à compressão na direcção do fio de uma amostra
$f_{c,0,w}$	-Resistência à compressão na direcção do fio para o teor de água de ensaio
$f_{c,90}$	-Resistência à compressão na direcção perpendicular ao fio
$f_{c,90,k}$	-Valor característico da resistência à compressão na direcção perpendicular ao fio de uma amostra
$f_{c,\theta}$	-Resistência à compressão para um ângulo $\theta$ entre a direcção do fio e a direcção do esforço
$f_{faixa,c}$	-Resistência à compressão de uma faixa
$f_{faixa,t}$	-Resistência à tracção de uma faixa
$f_m$	-Resistência à flexão
$f_{m,k}$	-Valor característico da resistência à flexão de uma amostra
$f_{m,limpa}$	-Resistência à flexão da madeira isenta de nós
$f_{m,nó}$	-Resistência à flexão da madeira do nó e da afectada pela sua presença
$f_{t,0}$	-Resistência à tracção na direcção do fio
$f_{t,90}$	-Resistência à tracção na direcção perpendicular ao fio

---

$f_{u,k}$	-Tensão de rotura do ligador
$f_v$	-Resistência ao corte
$h$	-Altura da peça de madeira
$h_{10}$	-Desvio do fio em 10cm de comprimento
$k_l$	-Correcção devido a desvios relativamente às distâncias normalizadas de ensaio
$k_s$	-Rigidez de uma ligação
$l$	-Distância entre secções afastadas a, pelo menos, 5 cm dos topos de um toro
$l_1$	-Distância $5d_{nom}$ centrada no toro
$l_a$	-Distância normalizada entre apoios
$l_e$	-Distância entre apoios no ensaio
$m_f$	-Massa da peça de madeira seca
$m_w$	-Massa da peça de madeira com o teor de água de ensaio
$n$	-Número de ligadores de uma ligação
$n_{ef}$	-Número efectivo de ligadores de uma ligação
$p$	-Número de faixas plastificadas
$r$	-Raio de um secção circular
$t_1$	-Espessura dos elementos de madeira numa ligação
$w$	-Teor de água
$y_{g,faixa}$	-Centro de gravidade de uma faixa
$y_{g,secção}$	-Centro de gravidade de uma secção

### LETRAS GREGAS

$\delta$	-Deslocamento medido pelo actuador durante o ensaio de flexão ou compressão de um toro ou peça de madeira limpa
$\delta_x$	-Deslocamento segundo o eixo da viga de uma viga em consola com carga de extremidade
$\delta_y$	-Deslocamento na direcção da força aplicada na extremidade livre de uma viga em consola
$\varepsilon$	-Precisão de um parâmetro determinado por métodos numéricos
$\theta$	-Ângulo entre a direcção do fio e a do esforço aplicado
$\theta_{\text{Área de influência}}$	-Ângulo radial limitado pela área de influência de um nó
$\rho$	-Massa volúmica
$\rho_k$	-Valor característico da massa volúmica de uma amostra
$\rho_{mean}$	-Valor médio da massa volúmica de uma amostra
$\rho_{toro}$	-Massa volúmica estimada do toro
$\rho_w$	-Massa volúmica para o teor de água de ensaio
$\sigma_{faixa}$	-Tensão actuante numa faixa
$v$	-Deformação de uma ligação
$v_{01}$	-Deformação da ligação para 10% da carga de rotura estimada
$v_{04}$	-Deformação da ligação para 40% da carga de rotura estimada
$\Phi$	-Diâmetro do varão roscado

*ABREVIATURAS*

ANSI	-American National Standards Institute
ASTM	-American Society for Testing and Materials
CEN	-Comité Europeu de Normalização
DBH	-Diameter at breast height (diâmetro à altura do peito)
EC5	-Eurocódigo 5
EN	-Norma Europeia
IPQ	-Instituto Português de Qualidade
ML	-Madeira limpa
NP	-Norma Portuguesa

# CONSIDERAÇÕES INICIAIS

---

## 1.1 Introdução

A madeira de secção circular de pequeno diâmetro é um material obtido das operações normais de limpeza e desbaste de povoamentos florestais. Estas constituem um passo essencial para uma gestão florestal adequada, de modo a evitar a propagação de doenças e o aumento de risco de incêndio.

Em Portugal, atendendo à organização florestal preponderante e aos custos associados, estas operações de limpeza e desbaste são realizadas com muito pouca frequência, ou não chegam a ser efectuadas. Acresce ainda que as utilizações do material retirado do povoamento nestas operações, tais como matéria-prima para a produção de papel ou energia, têm pouco valor acrescentado, não constituindo por si só motivação suficiente para a realização dessas actividades. Aplicações que valorizem este produto são por isso desejáveis, tais como aplicações estruturais.

A madeira de secção circular sempre constituiu um material de construção. No entanto, as mudanças na indústria da construção, nomeadamente as relacionadas com a disponibilidade de materiais, requisitos técnicos e de planeamento e conveniência comercial, fizeram com que o uso de madeira de secção circular tenha decaído significativamente ao longo das últimas décadas. A ideia equívoca de que a madeira tem uma vida útil curta, que entra em combustão com facilidade e que é susceptível ao apodrecimento e ao ataque por insectos sob condições específicas, tem levado à sua negligência como material de construção.

A madeira de secção circular apresenta diversas vantagens como material de construção. Em termos de características mecânicas, trata-se de um material com uma excelente relação resistência/peso. Por outro lado, tendo em conta a temática actual de sustentabilidade, este é um material renovável e amigo do ambiente, que poderá substituir outros materiais com impactos mais negativos em termos ambientais. No entanto, o seu uso em aplicações estruturais requer métodos e sistemas que não são conhecidos pelos arquitectos e aplicadores.

De modo a usar este material, é necessário determinar valores das propriedades mecânicas, estabelecer sistemas de classificação e desenvolver ligações adequadas.

## 1.2 Objectivos

O presente estudo tem como objectivo geral contribuir para um incremento do conhecimento sobre a madeira de secção circular de Pinheiro bravo e do seu uso em aplicações estruturais. Assim, neste estudo pretende-se:

- Definir todas as propriedades necessárias do ponto de vista da Engenharia, para a aplicação estrutural deste produto.
- Definir metodologias de determinação expedita das propriedades mecânicas.
- Desenvolver e estudar o comportamento de sistemas de ligação que viabilizem a aplicação em estruturas deste material.

## 1.3 Organização da tese

De forma a alcançar tais objectivos, estruturou-se o trabalho em 7 capítulos, nos quais é abordada a caracterização da madeira de secção circular e a possibilidade de prever o seu comportamento mecânico, bem como o estudo de sistemas de ligação que permitam o uso deste material em aplicações estruturais. A interdependência dos diversos capítulos é apresentada na Figura 1.1.

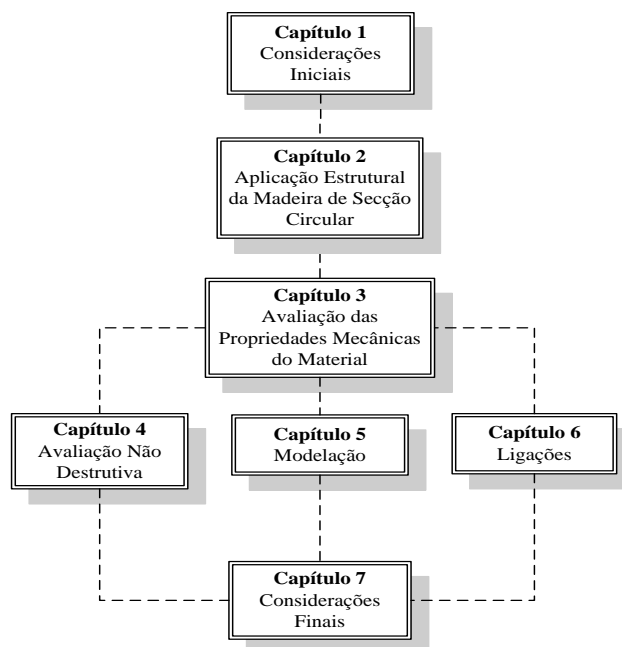


Figura 1.1 – Organização da tese

Assim, inicia-se o trabalho com uma breve Introdução, na qual este ponto se insere e onde se procede à exposição da temática deste trabalho, aos seus objectivos e organização. Mais uma

vez é reiterado o objectivo de com este estudo contribuir com as bases para a utilização da madeira de secção circular de pequeno diâmetro de Pinheiro bravo em aplicações estruturais.

No Capítulo 2 pretende-se apresentar as possibilidades de aplicação estrutural do material estudado. Assim, são referidas as vantagens e desvantagens da madeira de secção circular de pequeno diâmetro como material de construção apresentando-se, igualmente, diversos exemplos de tipologias de estruturas já realizadas com madeira de secção circular.

No Capítulo 3 é apresentado o material amostrado que servirá para a determinação das propriedades mecânicas. A amostragem foi efectuada em duas zonas de Portugal, região Centro e região Norte, de modo a ser possível obter um melhor zonamento das propriedades mecânicas. Foram realizados ensaios de flexão e de compressão, segundo a norma EN 14251, para determinação do módulo de elasticidade e da resistência à flexão e à compressão do material. Estas propriedades também foram determinadas em elementos de madeira limpa oriundos do material ensaiado, de modo a ser possível aferir a influência dos defeitos nas propriedades mecânicas e para *input* do algoritmo apresentado no Capítulo 5. O capítulo termina com a comparação das propriedades mecânicas obtidas com as de outros estudos para outras espécies de madeira de secção circular.

No Capítulo 4 é estudada a possibilidade de estimar as propriedades mecânicas dos elementos através de procedimentos não destrutivos. O capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre esta temática de modo a enquadrar o trabalho apresentado no decurso desse capítulo. As amostras apresentadas no Capítulo 2 foram avaliadas não destrutivamente recorrendo a classificação visual e a dois processos de classificação mecânica, nomeadamente ultrasons e vibração longitudinal. A eficiência dos métodos é igualmente discutida.

No seguimento da temática do Capítulo 4, é apresentada no Capítulo 5 uma abordagem diferente para a previsão das propriedades mecânicas de toros de Pinheiro bravo. Neste capítulo é apresentado um algoritmo desenvolvido que permite a geração da geometria e distribuição de nós em toros virtuais e, com base nessas características, a determinação das propriedades mecânicas desses toros. Como *input* o algoritmo necessita da distribuição estatística das características geométricas dos toros, dos nós e da massa volúmica, bem como das distribuições estatísticas das propriedades mecânicas da madeira limpa. O algoritmo foi calibrado com uma amostra de postes de Pinheiro bravo e validado com as amostras do presente estudo. Pretendeu-se com este algoritmo fornecer uma ferramenta à indústria que possibilite estimar as propriedades mecânicas de toros procedentes de um dado povoamento.

No Capítulo 6 é abordada a temática dos sistemas de ligações. O capítulo começa por apresentar uma revisão bibliográfica onde se expõe as soluções actuais, a qual servirá de base à planificação do trabalho experimental definido. Foram estudadas 3 tipologias de ligações: i) ligações de chapa central, ii) ligações de sistemas de ancoragem e iii) ligações de varões colados. As referidas tipologias foram testadas para a determinação da carga de rotura e

rigidez. O capítulo termina com um estudo sobre a aplicabilidade dos modelos existentes, para ligações em madeira de secção rectangular, às ligações estudadas.

Finaliza-se o trabalho com a apresentação das principais conclusões resultantes da investigação laboratorial desenvolvida, indicando-se algumas sugestões de trabalhos futuros.



# APLICAÇÃO ESTRUTURAL DA MADEIRA DE SECÇÃO CIRCULAR

---

## 2.1 Introdução

A madeira de secção circular foi dos primeiros materiais a serem usados em construção. É um material barato com diversas valências. No entanto, este material possui, actualmente, uma imagem de material primitivo que apenas pode ser aplicado a estruturas onde se queira transmitir uma imagem rústica.

## 2.2 Vantagens

A madeira de secção circular, quando comparada com a madeira serrada, exige menos processamento e, conseqüentemente, menos desperdício de material lenhoso e energia na sua obtenção. Em consequência do referido, segundo Lukindo *et al.* (1997), a madeira de secção circular custa cerca de 1/3 a 1/5 do preço da madeira serrada, tornando-se um dos materiais mais baratos em termos de madeira.

Segundo Sandoz (1991), a madeira de secção circular é cerca de 30% mais resistente que a madeira serrada. A madeira de secção circular possui mais resistência e rigidez que a madeira serrada devido à continuidade das fibras (Boren, 1998). Na madeira serrada as fibras em redor dos nós são cortadas e descontinuadas, levando a concentração de tensões, o que pode resultar em princípios de roturas (Wolfe, 2000).

A madeira de secção circular possui menor variabilidade que a madeira serrada. Segundo os dados apresentados por Wolfe (2000), a madeira de secção circular possui cerca de 1/2 a 2/3 da variabilidade da madeira serrada. Tendo em conta a menor variabilidade, a resistência de dimensionamento (5º percentil) pode ser até 5 vezes a de uma barra prismática que pode ser obtida do toro (Wolfe, 2000).

Em termos de geometria, a madeira de secção circular possui vantagens sobre a madeira serrada. Tendo em conta que a capacidade axial está directamente relacionada com a área da secção transversal, a resistência à flexão é em função do módulo da secção (Sec Mod) e a

rigidez está directamente relacionada com o segundo momento de área (MOI), estas propriedades são 1,57, 1,66 e 2,35, respectivamente, o valor das propriedades correspondentes do maior quadrado inscrito. Wolfe (2000) apresenta a variação destas propriedades para um toro com um comprimento de 3,1m e com um adelgaçamento de 1%, Figura 2.1, considerando que o membro prismático possui dimensões limitadas pela menor secção do toro com adelgaçamento. Da Figura 2.1 pode-se concluir que a madeira de secção circular possui 2 a 3 vezes o momento resistente, 3 a 4,5 vezes a carga para a mesma deformação e 1,57 vezes a capacidade axial da madeira serrada.

Comparando, em termos geométricos, toros torneados com toros com adelgaçamento, Wolfe e Murphy (2005) afirmam que o momento máximo suportado pelos toros com adelgaçamento pode ser até 52% superior ao dos toros após torneamento.

Na madeira de secção circular o efeito do lenho juvenil não se faz sentir de modo tão notório como na madeira serrada obtida dos toros, como se pode ver na Figura 2.2.

A madeira de secção circular é um material que resiste quer a esforços de compressão quer a esforços de tracção, sendo ideal para aplicação em estruturas treliçadas.

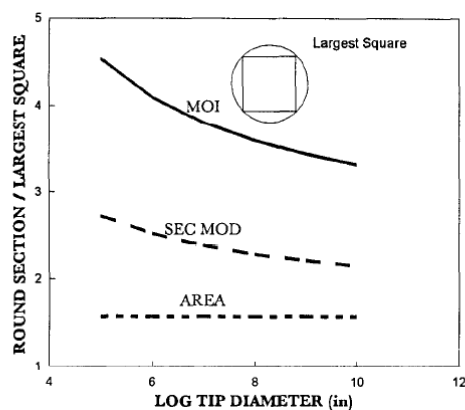


Figura 2.1 – Variação do rácio entre as propriedades da secção de uma viga circular e a maior secção serrada possível de obter. Toro com 3,1m de comprimento e 1% de adelgaçamento (Wolfe, 2000)

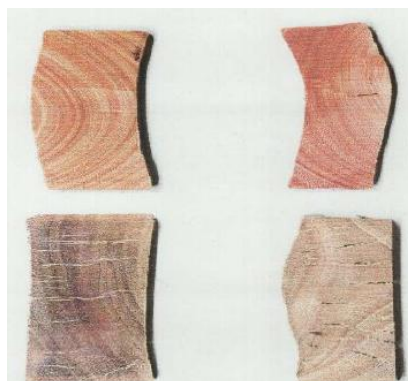


Figura 2.2 – Distorção em madeira serrada durante a secagem devido ao lenho juvenil (Yeates, 1999)

Contrariamente à crença popular, grandes peças de madeira têm boa resistência ao fogo, muito melhor que outros materiais em condições severas de exposição. A Figura 2.3 ilustra esta propriedade, mostrando o resultado de um incêndio no qual vigas de aço, após perderem toda a resistência, são sustentadas por uma viga de madeira carbonizada. Isto é explicado pela camada de carvão que se forma externamente nas peças de madeira e pelo facto de a madeira ser um mau condutor térmico, o que evita que a temperatura interna da madeira aumente demasiadamente, mantendo parte da sua resistência. Neste particular, a madeira de secção circular apresenta a vantagem adicional da forma, uma vez que a forma circular é a que garante o menor rácio superfície/volume e, conseqüente, melhor resistência ao fogo.

A madeira de secção circular é dos materiais de construção mais económicos, sendo apenas necessário despende 0,5GJ de energia para se obter um metro cúbico (Tabela 2.1). Para além disso, a madeira possui um excelente rácio resistência/massa volúmica, sendo este 3 vezes maior que o do aço e cerca de 10 vezes maior que o do betão. Em termos de rácio resistência/energia a diferença é ainda mais significativa (Tabela 2.2).



Figura 2.3 – Viga de madeira suportando vigas de aço após incêndio (Júnior e Dias, 1997)

Tabela 2.1 – Consumo energético de vários materiais (Chrisp *et al.*, 2003, Lukindo *et al.*, 1997)

Material	Consumo energético (GJ/m <sup>3</sup> )
Madeira de secção circular, não seca	0,5
Madeira de secção circular, seca	1,7
Madeira serrada	2,3
Madeira lamelada colada	5,4
Alvenaria	7
Alumínio	527
Plástico	92-133

Tabela 2.2 – Características de diversos materiais de construção (Júnior e Dias, 1997)

Material	$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	Energia para produção (GJ/m <sup>3</sup> )	Resistência (MPa)	Relação Resistência/ $\rho$	Relação Resistência /Energia
Betão	24	1,92	20	0,83	10,42
Aço	78	234	250	3,21	1,07
Madeira de resinosa	6	0,60	50	8,33	83,33
Madeira de folhosa	9	0,63	90	10,00	143,86

A utilização de madeira em edifícios permite uma rápida montagem, não sendo necessário esperar que o material ganhe presa, como no caso do betão. Para além disso, este material possui boas condições naturais de isolamento térmico e absorção acústica. Uma parede de tijolos de 22cm com 4cm de caixa-de-ar tem um coeficiente de transmissão térmica de  $k=0,97$ , duas paredes de 3cm de madeira, com 4cm de caixa-de-ar, tem um coeficiente de transmissão térmica de  $k=0,98$  (Coutinho, 1999).

A madeira de secção circular, tal como a madeira em geral, possui a vantagem de, contrariamente a outros materiais de construção como o betão ou o aço, ser um material renovável, fácil de reciclar e reutilizar, e bastante ecológico. Segundo Junior (2004), a mesma quantidade de aço necessita de 26% mais energia, emite mais 34% de gases com efeito estufa, liberta 24% mais poluentes para o ar, liberta 400% mais água poluída, produz 8% mais resíduos sólidos e usa 11% mais recursos. No caso do betão, este usa 57% mais energia, emite 81% mais gases com efeito estufa, liberta 47% mais poluentes para o ar, liberta 350% mais poluição para a água, produz 23% mais resíduos sólidos e usa 81% mais recursos que a madeira. O mesmo autor afirma que, comparativamente com a energia necessária para a obtenção de uma tonelada de madeira, é necessária 5 vezes mais para produzir uma tonelada de vidro, 14 vezes mais para produzir uma tonelada de aço e 126 vezes mais para produzir uma tonelada de alumínio. Concretizando, no fabrico de um metro cúbico de alumínio são libertados 6325kg de carbono, no caso do aço 8117kg e no caso do betão 182kg, enquanto que no caso da madeira são absorvidos 228kg de carbono (Junior, 2004, Chapman, 2002).

Segundo Winter (1998), a madeira contém 50% de carbono, sendo que para a produção de um metro cúbico de madeira a árvore extrai 940kg de  $\text{CO}_2$  da atmosfera. Esta massa de  $\text{CO}_2$  só volta a ser libertada para a atmosfera quando a madeira apodrecer ou for queimada, pelo que durante toda a vida da estrutura esta massa de  $\text{CO}_2$  fica retida. Wegener e Zimmer (1998) afirmam, igualmente, que o uso de madeira leva à redução da quantidade de  $\text{CO}_2$  atmosférico. Os autores apontam que na formação de  $1\text{m}^3$  de madeira completamente seca é sequestrado cerca de 1851kg de  $\text{CO}_2$  atmosférico.

Em modo de resumo, apresenta-se uma declaração de John Makepeace, director da Parnham Trust *“Trees represent a strategic resource of incalculable value to the atmosphere and to man’s well being. To sustain them the cost of planting and management must be paid for from income. Timber must therefore be used to the best advantage – not just as fuel or pulp, but as a material for high quality manufacturing of products and the construction of buildings, for which the demand increases year by year. Scientists and industry have increasingly researched and exploited “new materials”, made from finite minerals, but timber remains the world’s major renewable resource and the most energy-efficient structural material”*.

### 2.3 Desvantagens

Um aspecto importante no uso de madeira de secção circular é a sua variação dimensional. Este material possui uma maior variação dimensional na direcção tangencial do que na direcção radial, o que leva ao aparecimento de fendas (Figura 2.4). A eventual retracção da madeira pode ainda provocar folga nos ligadores. No entanto, o efeito do aparecimento de fendas devido a secagem pode ser minimizado através de secagem a altas temperaturas (Ranta-Maunus, 1999a).

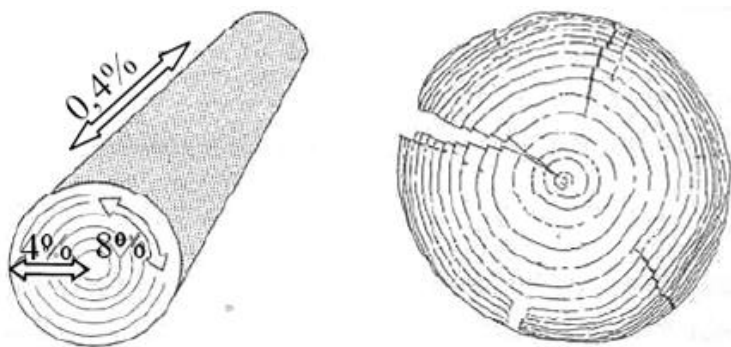


Figura 2.4 – Variação dimensional da madeira de secção circular (Ranta-Maunus, 1999a)

A aparência da madeira de secção circular não processada, ou seja, com adelgaçamento e secção transversal irregular, pode ser considerada crua e pouco atractiva quando comparada com o aspecto rectilíneo de outros materiais como a madeira serrada, madeira lamelada, aço e betão. No entanto, este material pode ser usado na construção de edifícios visualmente apelativos quando:

- é realizada uma selecção apropriada da madeira de secção circular;
- são usadas técnicas de design e de construção adequadas;
- são usadas treliças planas ou espaciais adequadas.

A madeira de secção circular, tal como a madeira em geral, é um material fundamentalmente heterogéneo e anisotrópico, possuindo resistências elevadas na direcção do fio e resistências diminutas na direcção perpendicular ao fio.

É um material vulnerável aos agentes externos e a sua durabilidade é limitada, quando não são tomadas medidas preventivas. Se a madeira for conservada e protegida de modo correcto pode manter-se em bom estado durante mais de 50 anos.

Apesar de a madeira possuir boa resistência ao fogo, este é um material combustível que arde espontaneamente a cerca de 275°, desde que haja oxigénio suficiente para se realizar a combustão. A combustão inicial é apenas superficial, formando-se uma camada carbonizada que, se a temperatura se mantiver nos 275°, quando atinge 1cm de espessura, protege o resto da madeira (Coutinho, 1999). Se a temperatura aumenta, a madeira continua a arder e pode mesmo alimentar o incêndio, no entanto, consome-se lentamente e conserva durante algum tempo as suas propriedades mecânicas, mesmo a 1000-1100°, enquanto que o aço começa a perder a sua resistência e a deformar-se a partir dos 200-300°.

A madeira de secção circular possui a desvantagem particular de não estar facilmente disponível comercialmente e de existirem limitações em termos de secções transversais.

## 2.4 Aplicações estruturais

A madeira é o material estrutural mais antigo usado pelo Homem e, anteriormente ao uso de ferramentas como serras, era usado na sua forma natural circular, geralmente ligada por laços. A mais elementar estrutura de madeira (Figura 2.5) foi, provavelmente, a forma de dois toros cravados no solo e ligados nas extremidades superiores por elementos vegetais fibrosos, como o vime, por tiras de pele ou, mais tarde, por elementos de ferro ou bronze (Coutinho, 1999).

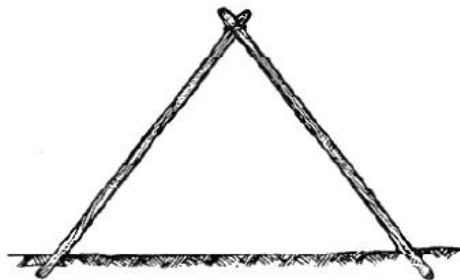


Figura 2.5 – Estrutura mais elementar com madeira de secção circular (Mateus, 1961)



Figura 2.6 – Exemplos de mobiliário urbano (Livingston, 2006)

Actualmente, a madeira de secção circular possui um uso maioritariamente não estrutural, sendo usada na elaboração de barreiras sonoras, vedações, pérgulas e mobiliário urbano (Figura 2.6). Dadas as valências deste material o seu uso não se deve limitar a utilização ornamental, devendo desempenhar funções estruturais. A madeira de secção circular apresenta excelentes características como material de construção, como referido nos pontos anteriores, onde se destaca o facto de possuir uma excelente relação resistência/peso e de ser um material renovável e amigo do ambiente, contribuindo para uma política de construção sustentável.

Com um material devidamente caracterizado e ligações adequadas é possível substituir ou ser usado juntamente com materiais como o aço e o betão. Nos pontos seguintes são apresentadas algumas aplicações estruturais exemplificativas para a madeira de secção circular, desde

edifícios a pontes, de modo a demonstrar o potencial deste material em termos estruturais e a instigar designs inovadores. Para o tipo e dimensão de madeira abordada no presente estudo, as aplicações passam, sobretudo, por estruturas treliçadas, onde o pequeno comprimento e diâmetro são uma mais-valia.

#### 2.4.1 Barreiras

Faller *et al.* (2010) estudaram o uso de madeira de secção circular como suporte para as chapas em W dos *rails* de protecção (Figura 2.7). Este tipo de aplicação, segundo os autores, é mais económica que o uso de perfis metálicos ou madeira serrada. Foram estudados dois tipos de rails, um com toros de Pseudotsuga de 184mm de diâmetro e outro com toros de Pinho de Ponderosa de 203mm de diâmetro. Em ambos os casos foi considerado um comprimento de cravação de 980mm. Usando esta configuração, os *rails* conseguiram conter o embate de uma carrinha de 2018kg a circular à velocidade de 100 km/h, com um ângulo de impacto de 25,5° (Figura 2.8), mostrando ser uma aplicação a ter em conta para este tipo de material.



Figura 2.7 – *Rails* de protecção (Faller *et al.*, 2010)



Figura 2.8 – Teste de impacto de um veículo (Faller *et al.*, 2010)

#### 2.4.2 Parques infantis

Um dos usos mais comuns da madeira de secção circular, o qual demonstra as possibilidades deste material a uma audiência mais alargada, é o seu uso em espaços de lazer, como parques infantis (Figura 2.9). As secções utilizadas variam consoante o equipamento pretendido, mas geralmente apresentam diâmetros que oscilam entre os 50 e os 150mm. A construção deste tipo de equipamentos pode apresentar várias configurações.



Figura 2.9 – Exemplos de parques infantis (Ranta-Maunus, 1999a; Catálogo MTL)

### 2.4.3 Fundações

As estacas de madeira continuam a desempenhar uma função importante, embora tenham evoluído muito pouco desde os tempos remotos. É um material cujo preço é baixo, suportando muito bem a cravação e, em terrenos permanentemente secos ou saturados, tem uma duração ilimitada (Figura 2.10). Várias edificações na Europa estão apoiadas há séculos sobre estacas de madeira, a cidade de Lisboa encontra-se construída sobre estacas de madeira desde o tempo da reconstrução Pombalina (Miná, 2005). Segundo Jorissen (2006), grande parte da madeira de secção circular na Holanda pode ser encontrada em fundações. Aproximadamente, cerca de 25 milhões de estacas estão a suportar milhares de edifícios. Grande parte das estacas estão em serviço há centenas de anos, não apresentando problemas.



Figura 2.10 – Cravamento de uma estaca de madeira (Miná, 2005)

### 2.4.4 Edifícios

As casas de troncos possuem grande tradição nos países florestais, nomeadamente no Canadá, EUA e países nórdicos (Figura 2.11). Estas estruturas podem variar desde pequenos edifícios de arrumação até complexas moradias, mas o seu uso mais comum é em pequenas moradias de férias e casas de verão. Os diâmetros dos troncos variam entre os 10 e os 35 centímetros (Mill, 2011), os procedimentos necessários desde o corte dos toros até à montagem de uma casa de troncos pode ser encontrado em Mackie (1972). Heikkila (2004) apresenta um projecto para povoação edificada com toros, afirmando que 20% dos construtores da Finlândia estão interessados em usar toros na construção de habitações, no entanto, apenas 8% das habitações são feitas com este material, devido à fraca qualidade da arquitectura.



Figura 2.11 – Edifícios de troncos (Ranta-Maunus, 1999a; Mill, 2011)



Na Escócia foi construído um edifício (Figura 2.12) com 350 m<sup>2</sup> para abrigo de crianças desfavorecidas intitulado KIND (*Kids In Need & Distress*) usando materiais renováveis, nomeadamente madeira de secção circular. Este projecto tinha como objectivo valorizar os recursos proporcionados pela sua floresta. Esta construção foi nomeada para as categorias de design e sustentabilidade ambiental do “*Saltire Awards for Civil Engineering 2001*” (Chrisp *et al.*, 2003). A base da estrutura são treliças triangulares cuja base possui 250mm de diâmetro e as bases laterais possuem diâmetros entre os 90 e os 100 mm.



Figura 2.12 – Estrutura do KIND (Chrisp *et al.*, 2003)

Burton *et al.* (1998) apresenta três edifícios, uma casa, um centro de treino e um alojamento para estudantes, construídos com base em madeira de secção circular de pequeno diâmetro, com vista a ilustrar a viabilidade deste material na construção. O centro de treino, com 15m de largura, 42,5m de comprimento total e uma altura de 7m, foi o edifício mais arrojado. A estrutura apresentava a forma de cúpula (Figura 2.13), tal foi conseguido com toros de aproximadamente 9m de comprimento, com 155mm de diâmetro na base e 65mm no topo, que foram ancorados na base e unidos no topo, tal como exemplificado na Figura 2.14, de modo a formar um arco.



Figura 2.13 – Centro de treino (Burton *et al.*, 1998)

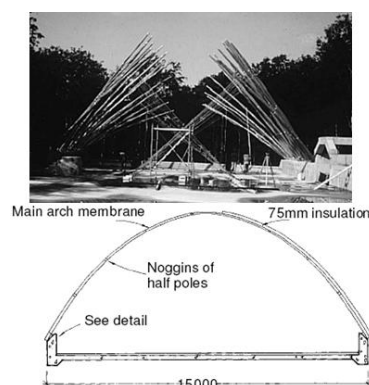


Figura 2.14 – Arco formado por toros de madeira de secção circular (Burton *et al.*, 1998)

Mello (2006) apresenta habitações onde a madeira de secção circular de eucalipto é usada na estrutura, nomeadamente como vigas e pilares. No caso das vigas foi adoptada uma solução de dupla viga. Na Figura 2.15 é apresentada a estrutura de madeira e na Figura 2.16 a habitação concluída.



Figura 2.15 – Estrutura da habitação (Mello, 2006)



Figura 2.16 – Habitação concluída (Mello, 2006)

Levan (2000) apresenta a estrutura de demonstração da Figura 2.17, realizada com toros de 200mm de diâmetro e com 1,2m de comprimento. Pormenor das ligações usadas no telhado é apresentado na Figura 2.18.



Figura 2.17 – Estrutura de demonstração (Levan, 2000)



Figura 2.18 – Ligações usadas no telhado da estrutura (Levan, 2000)

Mello e Melo (2002) apresentam o IBAMA's Nacional Orchidary (Figura 2.19), um edifício de 2 pisos localizado em Brasília, usando madeira de secção circular de Eucalipto na estrutura, sendo o elemento chave a dupla viga. Os mesmos autores (Mello e Melo, 2006) apresentam um novo edifício (Figura 2.20) que vai ser sede do CENAFLOR (Centro Nacional de Suporte à Gestão da Floresta).



Figura 2.19 – IBAMA (Mello e Melo, 2002)



Figura 2.20 – Estrutura do CENAFLOR (Mello e Melo, 2006)

### 2.4.5 Coberturas

A madeira de secção circular de pequeno diâmetro é adequada para treliças espaciais, onde existem apenas esforços axiais e a necessidade de uso de pequenos comprimentos e secções transversais reduzidas. Neste tipo de estruturas os toros são ligados a nós, sendo a solução adoptada para a ligação a chave para o bom desempenho da estrutura. Um exemplo de aplicação de treliças espaciais passa por coberturas de pavilhões, existindo dimensões em planta a variar entre os 10,8m x 16,2m e os 8,1m x 18,9m e a altura a variar entre os 3,8 e os 6m (Huybers, 1996). A cobertura da Figura 2.21 foi realizada com toros de 100mm de diâmetro para a treliça espacial e com toros de 150mm de diâmetro para os pilares.

A madeira de secção circular pode, igualmente, ser usada em treliças planas, onde os elementos se situam no mesmo plano. Na Figura 2.22 apresentam-se os diversos sistemas de treliças planas passíveis de serem construídos com madeira de secção circular.

Malo e Ellingsbo (2010) apresentam uma cobertura constituída por treliças planas elaboradas com madeira de secção circular (Figura 2.23). As treliças planas eram constituídas por toros com 300mm de diâmetro, tendo as treliças 12m de comprimento. A treliça possui a particularidade de a linha ser constituída por dois elementos (Figura 2.24).



Figura 2.21 – Cobertura (Ranta-Maunus, 1999a)

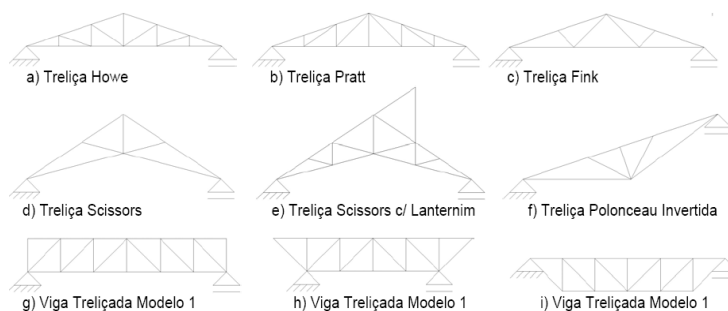


Figura 2.22 – Tipos de treliças planas para uso de madeira de secção circular (Júnior e Brito, 2010)



Figura 2.23 – Montagem da cobertura (Malo e Ellingsbo, 2010)



Figura 2.24 – Cobertura final (Malo e Ellingsbo, 2010)

Treliças planas Pratt foram usadas na construção da cobertura de uma biblioteca em Darby, Montana, EUA, com aproximadamente  $510\text{m}^2$  (Figura 2.25). Este edifício é apelidado de “*Sistine Chapel of small-diameter round wood*”.

Em Boner, Montana, EUA foi reconstruída a cobertura de uma bancada de um campo escolar de basebol, usando treliças planas de elementos de madeira de secção circular. A cobertura abrange uma área de cerca de  $93\text{ m}^2$ . Na Figura 2.26 são apresentados pormenores da cobertura.



Figura 2.25 – Biblioteca de Darby (Engineers, 2010)



Figura 2.26 – Cobertura de uma bancada (Engineers, 2010)

#### 2.4.6 Torres

O uso de madeira de secção circular em estruturas espaciais expandiu das coberturas para o seu uso em torres, onde o sistema de ligação é similar. Um exemplo é a torre Goethe em Frankfurt com 43m de altura (Figura 2.27a). Esta torre possui nos cantos 4 toros com diâmetros entre os 260 e os 450mm. Outra torre com madeira de secção circular pode ser encontrada em Fribourg, na Dinamarca (Figura 2.27b). A torre possui cerca de 23m de altura e os principais elementos estruturais são 3 toros com diâmetros entre os 450 e os 600mm, sendo estabilizada por um sistema de cabos (Huybers, 1996).

Em Apeldorn, Holanda, foi construída uma torre com 27m de altura, usando toros com diâmetros a variar entre os 120 e os 200mm, e com comprimento entre os 2,5 e os 3,6m (Figura 2.27c). Os nós foram desenhados de modo a permitir a união de até 18 elementos. Na

execução da torre foram usadas ligações de chapa central com laços (Yeates, 1999). Também na Holanda, mas em Drenthe, Vries e Gard (2006a) apresentam uma torre com 15m de altura (Figura 2.27d). Nas ligações foram usadas as ligações de bloco metálico. Os toros da base possuem 140mm de diâmetro, sendo os restantes de 120mm de diâmetro. O esquema de nós usado permite que qualquer toro possa ser substituído sem ter de desmontar toda a estrutura.

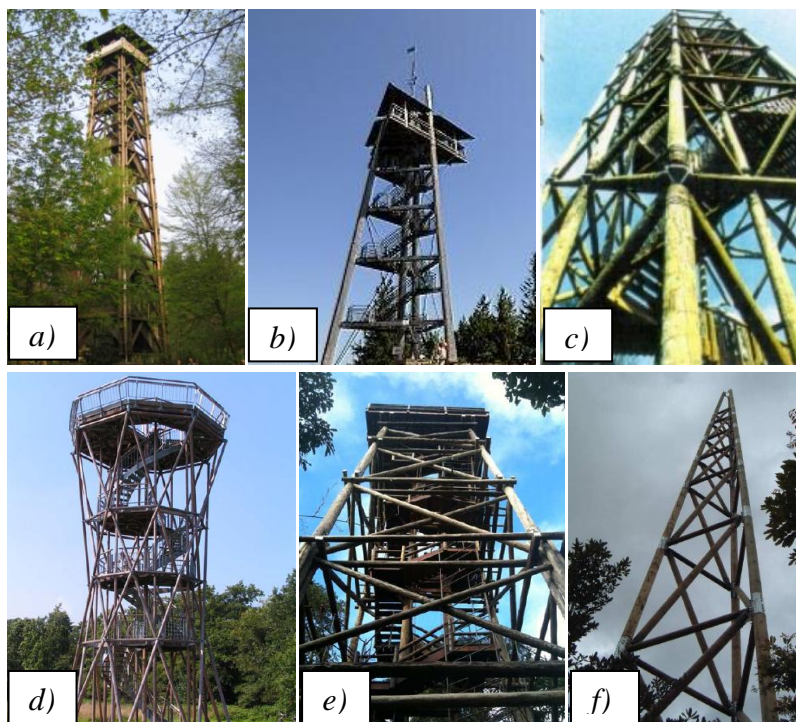


Figura 2.27 – Torres *a)* Wikipedia (2010) *b)* photographersdirect (2010) *c)* Ranta-Maunus (1999a) *d)* Vries e Gard (2006a) *e)* Dias (2009) *f)* Walford e Reelick (2006)

No Brasil, Dias (2009) apresenta uma torre com 25m de altura com toros de Eucalipto citriodora (Figura 2.27e). Os pilares que sustentam a estrutura possuem 250mm de diâmetro, o diâmetro dos outros elementos varia entre os 100mm e os 150mm. Uma torre para telecomunicações com 30m (Figura 2.27f) é apresentada por Walford e Reelick (2006). Os pilares são constituídos por toros torneados com 200mm de diâmetro, possuindo os restantes elementos diâmetros entre os 125 e os 150mm. A ligação dos elementos é assegurada por ligações tubulares.

#### 2.4.7 Estruturas de contenção de terras

A madeira de secção circular pode ser usada em estruturas de contenção de terras, na disposição de cortinas autoportantes ou paliçadas de madeira. As cortinas autoportantes (Figura 2.28a) consistem em toros justapostos cravados no solo com ou sem ligação entre eles. As paliçadas de madeira (Figura 2.28b) consistem em toros cravados no solo que suportam toros horizontais, ou tábuas de madeira serrada, os quais suportam as terras.

A madeira de secção circular também pode ser usada na estabilização de taludes e margens. Para este efeito os troncos de madeira são cravados no solo segundo um certo ângulo. De

seguida são colocados troncos horizontalmente apoiados nos inclinados, formando caixas que conferem estabilidade ao talude (Figura 2.29). Estas estruturas de madeira são designadas *crib walls*.

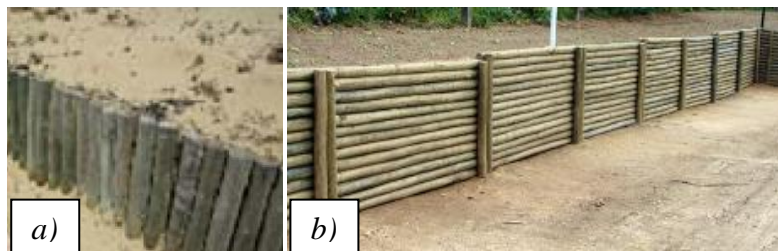


Figura 2.28 – a) Cortinas autoportantes b) paliçadas de madeira (Pereira, 2009)



Figura 2.29 – Estabilização de taludes (Verde, 2010; Flach e Frenette, 2000)

#### 2.4.8 Pontes

A madeira de secção circular constitui uma boa opção como material para a construção de passagens aéreas como passadiços, pontes pedonais e rodoviárias, em pequenos e médios vãos, pelo seu potencial em termos económicos e de desempenho mecânico. Nesse tipo de estruturas a madeira circular também pode ser usada para elementos secundários da estrutura como guardas.

Os passadiços estão apoiados em troncos dispostos verticalmente e que podem, ao mesmo tempo, servir de guarda corpos (Figura 2.30). Os passadiços de madeira podem ser construídos sobre solo ou mesmo sobre água.



Figura 2.30 – Passadiço de madeira



Figura 2.31 – Ponte pedonal suspensa (Laboratory, 2010)

Em termos de pontes pedonais, formas simples usando toros como membros principais são comuns e apropriadas para zonas florestais. O diâmetro dos toros irá determinar o vão da ponte. Utilizando toros com pequenos diâmetros, como os do presente estudo, poderiam ser vencidos vãos até 15m. Os toros também podem ser usados como elementos secundários, como guarda corpos. Na Figura 2.31 é apresentada uma ponte suspensa com 27,5 metros de vão, situada em Rattlesnake Creek, Missoula, Montana, nos Estados Unidos. Os guarda-corpos são constituídos por elementos treliçados que conferem rigidez à estrutura. O diâmetro dos toros varia entre os 150 e os 230mm.

Al-Khattat (2008) apresenta uma solução de uma ponte em arco treliçado constituída por elementos de madeira de secção circular (Figura 2.32). A estrutura da ponte consiste em dois arcos treliçados fixos nas extremidades por um sistema que garante que os elementos na ligação se encontram sujeitos a esforços de compressão. Os arcos treliçados estão ligados entre si por elementos circulares com 3,6 metros de comprimento e 150mm de diâmetro.

A aplicação da madeira de secção circular em pontes rodoviárias passa, geralmente, por estruturas mistas madeira-betão, solução que confere maior rigidez à estrutura. Neste tipo de estrutura é executada uma laje de betão que apoia em vigas de madeira (Figura 2.33). Assim, a madeira resistirá essencialmente a esforços de tracção enquanto que a laje de betão resistirá a esforços de compressão.



Figura 2.32 – Ponte treliçada (Al-Khattat, 2008)

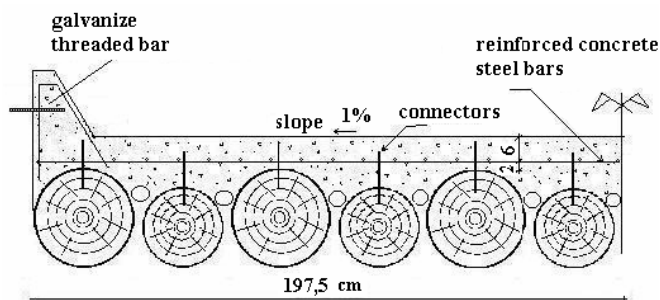


Figura 2.33 – Tabuleiro misto madeira-betão (Pigozzo *et al.*, 2004)



Figura 2.34 – Execução de uma ponte mista madeira-betão (Junior, 2004)

Na execução do tabuleiro os toros devem ser colocados paralelamente com a secção da base e do topo dispostas alternadamente, de modo a conferir uma rigidez mais uniforme, e posteriormente ligados transversalmente. A ligação entre os toros e a laje de betão pode ser efectuada com base em cavilhas (Figura 2.34), de modo a garantir que não existe deslocamento relativo entre a laje e os toros, considerando-se uma estrutura monolítica.

Os vãos mais comuns, em termos de pontes mistas, são entre os 5 e os 12m (Júnior e Dias, 1997). No entanto, Natterer (1998) apresenta a ponte Le Sentier sobre o rio Orbe da Suíça, com 13m de vão e 4m de largura. Os diâmetros dos troncos variavam entre os 480mm e 720mm. A ligação da madeira com o betão foi assegurada através de varões verticais colocados em entalhes. Para confinamento das vigas de madeira foram usados varões de aço de 16mm e 10mm. Pigozzo (2004) apresenta a Ponte Batalha, com dois tramos e um comprimento total de 21,45m, sendo o maior vão de 15,5m. O diâmetro dos toros varia entre os 380mm, usados no menor tramo, e os 480mm, usados no maior tramo. Junior (1996) apresenta a ponte sobre o rio Vespasioano com 32m de comprimento, sendo o maior vão de 20m.

De modo a ser possível usar toros de menor diâmetro, existe a possibilidade de associar duas ou mais secções através de parafusos transversais e anéis metálicos para evitar o deslocamento relativo dos toros (Figura 2.35). Dois toros interligados por anéis metálicos possuem inércia equivalente à de oito postes isolados (Júnior e Dias, 1997).

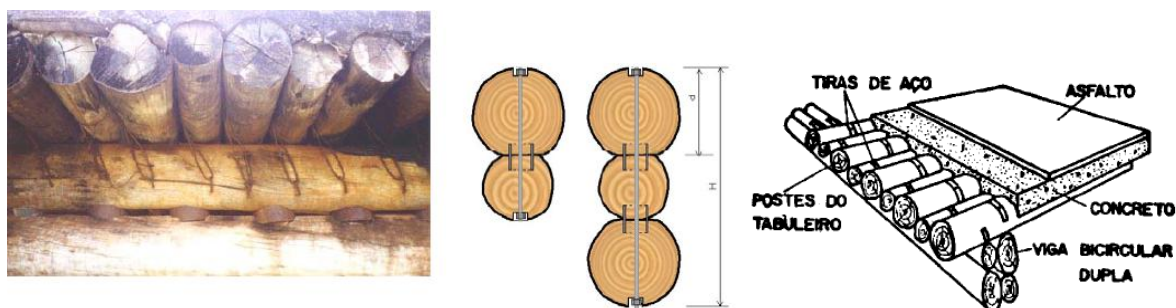


Figura 2.35 – Vigas duplas (Júnior *et al.*, 2006)

## 2.5 Conclusões

Neste capítulo pretendeu-se frisar as qualidades da madeira de secção circular como material de construção, onde se destaca o facto de possuir uma excelente relação resistência/ peso, ser um material renovável, amigo do ambiente e, portanto, contribuir para uma política de construção sustentável.

A madeira de secção circular tem vindo a ser usada, sobretudo, como elemento ornamental em mobiliário urbano. No entanto, neste capítulo são apresentados várias aplicações estruturais, desde edifícios a pontes, onde este material pode ser usado com todo o seu potencial mecânico. Para o tipo e dimensão de madeira deste estudo, as aplicações passam,



sobretudo, por estruturas treliçadas, onde o pequeno comprimento e diâmetro são uma mais-valia.

No entanto, para que a madeira de secção circular de pequeno diâmetro de Pinheiro bravo possa ser usada em aplicações estruturais é necessário conhecer as suas propriedades mecânicas e identificar sistemas de ligação eficientes. Assuntos que serão alvo de estudo nos próximos capítulos do presente trabalho.



# AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL

---

## 3.1 Introdução

A aplicação estrutural da madeira de secção circular de Pinheiro bravo requer que sejam conhecidas as propriedades mecânicas deste material, nomeadamente:

- resistência à flexão segundo a direcção do fio ( $f_m$ );
- resistência à compressão segundo a direcção do fio ( $f_{c,0}$ );
- resistência à tracção segundo a direcção do fio ( $f_{t,0}$ );
- resistência ao corte ( $f_v$ );
- resistência à tracção segundo a direcção perpendicular ao fio ( $f_{t,90}$ );
- resistência à compressão segundo a direcção perpendicular ao fio ( $f_{c,90}$ );
- módulo de elasticidade paralelo ao fio ( $E_0$ );
- módulo de elasticidade segundo a direcção perpendicular ao fio ( $E_{90}$ );
- módulo de distorção ( $G$ );
- massa volúmica ( $\rho$ ).

A norma EN 14251 (CEN, 2003a) define o procedimento de ensaio para a determinação experimental do módulo de elasticidade paralelo ao fio (em flexão e compressão), a massa volúmica, a resistência à compressão e a resistência à flexão. Neste trabalho foram determinadas experimentalmente, através desta norma, a resistência à flexão ( $f_m$ ), o módulo de elasticidade paralelo ao fio em flexão ( $E_0$ ), a resistência à compressão segundo a direcção do fio ( $f_{c,0}$ ) e a massa volúmica ( $\rho$ ). As restantes propriedades mecânicas foram estimadas com base nas propriedades determinadas experimentalmente, seguindo as indicações da norma EN 384 (CEN, 2004c). Adicionalmente, foram determinadas as propriedades mecânicas de provetes isentos de defeitos para posterior análise do efeito dos defeitos no comportamento mecânico dos elementos estruturais.

### 3.2 Propriedades mecânicas de espécies de madeira de secção circular

A temática do aproveitamento da madeira circular de pequeno diâmetro para aplicações estruturais é relativamente recente, sendo que apenas na última década tem ocorrido a maioria dos desenvolvimentos mais significativos, nomeadamente na determinação das propriedades mecânicas. O primeiro estudo encontrado foi realizado por Pellerin *et al.* (1989) com 81 toros de Lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm.), procedente dos Estados Unidos da América. Os toros possuíam cerca de 76mm de diâmetro e um teor de água de 13%. Nesse estudo foi determinada a resistência à tracção, seguindo o procedimento preconizado na norma ASTM D 198.

Os Estados Unidos da América apresentam várias espécies caracterizadas, no entanto, apenas uma década mais tarde se encontram mais estudos com madeira oriunda deste país. Wolfe e Moseley (2000) estudaram as propriedades mecânicas, segundo a norma ASTM D 198 e ASTM D 1036, de toros de Pseudotsuga (*Pseudotsuga menziesii*), Abeto (*Abies concolor*) e Pinho-insigne (*Pinus ponderosa*). Wang *et al.* (2001b) determinaram o módulo de elasticidade de toros de Jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) e de Red pine (*Pinus resinosa* Ait.), considerando um esquema de ensaio de flexão em quatro pontos. O teor de água dos toros de Red pine variava entre os 88% e os 145%, enquanto nos toros de Jack pine o teor de água estava compreendido entre os 31% e os 65%. Green *et al.* (2004) determinaram a resistência à flexão e à compressão de uma amostra de toros de subalpine fir (*Abies lasiocarpa*) e lodgepole pine (*Pinus contorta*). Os toros ensaiados à flexão tinham um teor de água médio de 15,5%, enquanto que os ensaiados à compressão possuíam um teor de água médio de 12,3%. Os ensaios de flexão foram em 4 pontos, sendo que, adicionalmente, foi determinado o módulo de elasticidade para o ensaio de flexão em 3 pontos. Foi obtido um coeficiente de correlação de 0,97 entre o módulo de elasticidade determinado com ensaios de flexão em 4 pontos e com ensaios de flexão em 3 pontos. Larson *et al.* (2004a e 2004b) determinaram as propriedades mecânicas de Pinho-de-ponderosa seguindo o mesmo procedimento que Wolfe e Moseley (2000). Green *et al.* (2005) apresentam o módulo de elasticidade e resistência à flexão de toros de Pseudotsuga, Pinho-de-ponderosa e Lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm.). O estudo mais recente foi realizado por Green *et al.* (2006) onde foi determinada a resistência à flexão e à compressão de uma amostra de toros de Engelman spruce (*Picea engelmannii*) com teor de água médio de 15,8%.

Na Europa o primeiro estudo encontrado foi realizado na Suíça por Sandoz (1991), onde foi determinada a resistência à flexão de 80 toros de Espruce, considerando um esquema de ensaio de flexão em quatro pontos. Em 1996 iniciou-se um projecto europeu (FAIR) com o objectivo de promover o uso da madeira de secção circular de pequeno diâmetro na construção. O objectivo global da investigação era o de desenvolver sistemas estruturais com os quais a madeira de secção circular pudesse ser usada e assim criar um novo mercado para este material. O projecto foi coordenado pelo VTT com a participação do Agricultural Research Centre da Finlândia Technological University Delft da Holanda, University of Surrey do Reino Unido, Lejopa Oy da Finlândia, Universitat fur Bodenkultur da Áustria, e o

Centre Technique du Bois et de l'Ameublement da França (Ranta-Maunus, 1999a). Os resultados do projecto, que foi concluído em 1998, encontram-se sumarizados em Ranta-Maunus (1999a e 1999b) e em Ranta-Maunus (2006). As espécies florestais alvo de estudo foram: i) a Casquinha da Finlândia; ii) a Casquinha do Reino Unido; iii) o Espruce da Finlândia; iv) Espruce da Áustria; v) o Larício do Japão da Holanda; vi) a Pseudotsuga da França; e vii) o Espruce americano do Reino Unido. As propriedades mecânicas estudadas foram a resistência à flexão e à compressão, bem como o módulo de elasticidade, a avaliação foi feita com base na norma EN 408 (CEN, 2003d). Após este projecto vários estudos foram desenvolvidos na Europa.

Na França, Adjanohoun *et al.* (1998) determinaram a resistência à flexão, num esquema de ensaio de flexão em quatro pontos de uma amostra de toros de Pseudotsuga.

Na Holanda, Vries (1998a e 1998b) determinou as propriedades mecânicas de toros de Larício do Japão (*Larix Kaempferi*), com um teor de água médio de 15%, com base nos pressupostos da norma EN408 para madeira rectangular. Foi avaliado o impacto do valor do teor de água na resistência, tendo os resultados corroborado os valores estipulados na EN 384. No entanto, com base em correlações do diâmetro com a resistência, o autor concluiu que não se deve aplicar a correcção relativa ao tamanho da peça, estipulada na EN 384. Verificou-se, igualmente, que quanto maior a velocidade de ensaio, maior o valor do módulo de elasticidade. Toros desta espécie e de Pseudotsuga (*Pseudotsuga*) foram estudados por Vries e Gard (1998), usando procedimento semelhante, para determinação do módulo de elasticidade. Os teores de água médios foram de 15% para os toros de Larício do Japão e de 11% para os de Pseudotsuga. A melhor correlação foi obtida entre o módulo de elasticidade global e a resistência à flexão. Vries e Gard (2006b) determinaram as características mecânicas de toros de Larício do Japão, segundo a norma EN 14251 (CEN, 2003a). Os toros possuíam um teor de água médio de 15%. Rodrigues e Vries (2010) determinaram as propriedades mecânicas de toros torneados desta espécie. A melhor correlação com a resistência à flexão foi conseguida com o módulo de elasticidade.

No Reino Unido, Barnard e Griffiths (1998) determinaram as propriedades mecânicas de toros de Casquinha (*Pinus Sylvestris*) e de Espruce americano (*Picea sitchensis*), seguindo os pressupostos de ensaio preconizados na norma EN 408 (CEN, 2003d). A melhor correlação com a resistência foi igualmente obtida com o módulo de elasticidade.

Na Espanha, Prieto *et al.* (2007) e Golfín *et al.* (2007) estudaram toros torneados de Larício pine (*Pinus nigra subsp. Salzmannii*) procedente dos Montes de Cuenca, segundo o estipulado na norma EN 14251 (CEN, 2003b).

Na Noruega, Vestol e Hoibo (2007) determinaram a resistência à flexão, segundo a norma EN 14251 (CEN, 2003b), de toros Casquinha. Os autores corrigiram os resultados com os factores  $k_h$ , para o diâmetro de 150mm, e com o factor  $k_l$ , para o vão de ensaio, segundo a norma EN

384 (CEN, 2004c). Para o caso de o teor de água ser superior a 18%, foi considerado que este tomava o valor de 18% e os valores corrigidos com base nesse valor. A melhor correlação com a resistência à flexão foi obtida com o módulo de elasticidade.

Em Portugal, Morgado *et al.* (2010) determinaram as propriedades mecânicas de duas amostras de madeira de secção circular de pequeno diâmetro de Pinheiro bravo, oriundas do Pinhal Interior Sul de Portugal (região Centro), segundo a norma EN 14251 (CEN, 2003b). Uma das amostras era constituída por toros com um diâmetro médio de 103mm e um teor de água médio de 13,2%. A segunda amostra era constituída por toros com um diâmetro médio de 197mm e um teor de água médio de 16,2%. A melhor correlação com a resistência foi obtida com o módulo de elasticidade. Um outro estudo com madeira de secção circular de Pinheiro bravo, embora com o objectivo de caracterizar a madeira para aplicação como postes de linhas aéreas, foi realizado por Martins (2010). Foram determinadas as propriedades mecânicas de postes, com diâmetros a 1,5m da base a variar entre os 180 e os 220mm e com um teor de água médio de 65,4 %, segundo a norma EN 14229, que consiste num ensaio em consola com carga de extremidade. A melhor correlação obtida com a resistência à flexão foi alcançada com o módulo de elasticidade.

No continente Asiático foi encontrado um estudo na Tailândia, efectuado por Yeh e Lin (2007), sobre a madeira torneada de Taiwan (*Taiwania cryptomerioides* Hay), com teor de água médio de 15%.

Com madeira oriunda do continente Africano, nomeadamente da África do Sul, Vries (2009) efectuou a determinação das propriedades mecânicas de toros de Cloeziana (*eucalyptus cloeziana* F. Muell), segundo a norma EN 408 (CEN, 2003d), com teores de água entre os 25% e os 65%.

As características das amostras e as propriedades mecânicas obtidas nos estudos referidos são apresentadas na Tabela 3.1, bem como o coeficiente de correlação entre a resistência à flexão e o módulo de elasticidade, por ser, geralmente, o parâmetro com melhor correlação com a resistência à flexão. Verifica-se que a resistência à tracção é uma propriedade raramente determinada, conhecendo-se apenas valores de dois estudos. A razão para este facto pode estar relacionada com a dificuldade de realização do ensaio de tracção. Os valores para a resistência à compressão variam entre os 19,6MPa e os 45MPa. No caso da resistência à flexão, esta varia entre os 35MPa e os 85,5MPa. Em termos de módulo de elasticidade, este toma valores entre os 5,5GPa e os 19,8GPa. Os valores da massa volúmica variam entre os 410kg/m<sup>3</sup> e os 580kg/m<sup>3</sup>. O coeficiente de correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à flexão varia entre 0,47 e 0,86. Verifica-se que em termos de madeira de secção circular de pequeno diâmetro de Pinheiro bravo existe apenas um estudo (Morgado *et al.*, 2010), com madeira oriunda da zona Centro de Portugal. Pretende-se assim, com este estudo, fornecer mais dados sobre as características mecânicas de toros oriundos desta região, mas também do Norte de Portugal.

Tabela 3.1 – Resenha bibliográfica das propriedades mecânicas de diversas espécies de madeira de secção circular

Referência	Espécie	N	$d_{\text{toro}}$ (mm)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_m$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{t,0}$ (MPa)	$E_0$ (GPa)	$r$ $f_m$ vs $E_0$
Pellerin <i>et al.</i> (1989)	Lodgepole pine (EUA)	81	76	-	-	-	35,6	-	-
Sandoz (1991)	Espruce (ES)	80	-	-	67,9	-	-	14,6	0,77
Adjanohoun <i>et al.</i> (1998)	Pseudotsuga (H)	180	120	442	52,5	-	-	11,1	-
Vries (1998a, 1998b)	Larício do Japão (H)	185	100 - 140	580	85	45	-	14,3	0,72
Vries e Gard (1998)	Larício do Japão (H)	137	120 - 140	-	-	-	-	13,3	0,76
	Pseudotsuga (H)	145	80 - 120	-	-	-	-	9,6	-
Barnard e Griffiths (1998)	Casquinha (UK)	100	75 - 180	534	54	33	-	15	0,52
	Espruce americano (UK)	100	75 - 180	478	57	22	-	16	
Ranta-Maunus (1999a)	Casquinha (FIN)	175		470	50	28	-	11,9	0,57
	Casquinha (UK)	100		529	54	32,8	-	14,9	
	Espruce (FIN)	200		434	60	-	-	12,9	
	Espruce (A)	143	70 - 180	451	61	30,7	-	12,9	
	Larício do Japão (H)	178		580	85	45	-	14,3	
	Pseudotsuga (F)	180		442	52	33	29	11,1	
	Espruce americano (UK)	100		478	58	28,6	-	16,1	
Wolfe e Moseley (2000)	Pseudotsuga (EUA)	41		-	60,7	44,8	-	9,6	0,73
	Abeto (EUA)	38	76 - 330	-	45,5	31,1	-	8,3	
	Pinho-de-ponderosa (EUA)	22		-	39,6	19,6	-	5,6	
Wang <i>et al.</i> (2001b)	Red Pine (EUA)	50	119 - 279	411	-	-	-	5,5	-
	Jack Pine (EUA)	109	112 - 159	519	-	-	-	5,6	-
Green <i>et al.</i> (2004); Green <i>et al.</i> (2006)	Subalpine fir + Lodgepole pine (EUA)	59	230	-	35,0	21,7	-	8,1	0,78
	Subalpine fir + Lodgepole pine + Engelman spruce (EUA)	178	228	-	38,3	-	-	8,5	0,82
Larson <i>et al.</i> (2004a)	Pinho-de-ponderosa (EUA)	99	102 - 203	410	55,9	-	-	10,7	0,47
Larson <i>et al.</i> (2004b)	Pinho-de-ponderosa (EUA)	250	127 - 305	-	-	31,8	-	-	-
Green <i>et al.</i> (2005)	Pseudotsuga (EUA)	93	76 - 152	85,5				16,0	-
	Pinho-de-ponderosa (EUA)	97		38,0				7,8	-
	Lodgepole pine (EUA)	44	89	-	74,5	-	-	-	-
Vries e Gard (2006b)	Larício do Japão(H)	205	100 - 140	572	50,0*	-	-	16,2	-
Yeh e Lin (2007)	Taiwania (T)	-	120 - 150	420	-	29,4	-	9,3	-
Prieto <i>et al.</i> (2007); Golfín <i>et al.</i> (2007)	Larício pine (ES)	445	80 - 140	462	41,2	-	-	7,1	-
Vestol e Hoibo (2007)	Casquinha (NOR)	533	75 - 250	494	65,1	-	-	13,9	0,84
Vries (2009)	Cloeziana (AS)	126	110 - 190	656	78*	36,5*	-	19,8	-
Rodrigues e Vries (2010)	Larício do Japão (H)	68	136	514	50,1	33,6	-	10,4	0,85
Morgado <i>et al.</i> (2010)	Pinheiro bravo (PT)	200	70 - 190	535	82,7	40,9	-	14,1	0,76
	Pinheiro bravo (PT)	59	132 - 260	580	73,0	-	-	17,8	0,74
Martins (2010)	Pinheiro bravo (PT)	64	180 - 220	573	50,2			10,9	0,86

**Legenda:** \* Valor característico; ES - Espanha; UK- Reino Unido; FR – França; PT – Portugal; EUA – Estados Unidos da América; FIN – Finlândia; NOR – Noruega; A – Áustria; S – Suíça; H – Holanda, T – Tailândia; AS – África do Sul

### 3.3 Amostragem

A madeira de secção circular de Pinheiro bravo (*Pinus Pinaster* Ait.), sendo um produto de origem natural, apresenta diferenças em termos de propriedades mecânicas consoante a zona geográfica de origem, pelo que se deve proceder a um zonamento que atenda a essa variabilidade.

O Pinheiro bravo apresenta maior incidência territorial ao nível da região centro - norte do país (Figura 3.1). Na impossibilidade de conseguir caracterizar todos os povoamentos existentes foram estudadas duas zonas mais representativas. Assim, procedeu-se à amostragem de povoamentos de Pinheiro bravo pertencentes à zona Centro e à zona Norte de Portugal.

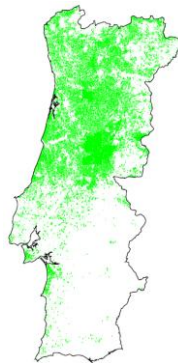


Figura 3.1 – Distribuição nacional de Pinheiro bravo (adaptado de Rodrigues e Sousa, 2009)

Os toros representativos da zona Centro foram recolhidos no distrito de Castelo Branco, sendo a amostra constituída por 70 toros. A amostra representativa da zona Norte foi recolhida no distrito de Braga, e era constituída por 50 toros. No processo de selecção dos toros, foram evitados aqueles que possuíam fendas de resinagem ou degradação biológica. Procurou-se que o comprimento dos toros fosse próximo de 25 vezes o respectivo diâmetro. No entanto, o cumprimento deste último aspecto nem sempre foi possível. Procurou-se, igualmente, que as amostras possuíssem uma gama alargada de diâmetros. Os toros foram apenas descascados não sofrendo qualquer tipo de processamento adicional.

Os toros das amostras, que se encontravam em estado verde, foram colocados a secar ao ar livre até possuírem um teor de água inferior a 20%. Após esta secagem inicial, os toros de ambas as amostras foram transportados para a sala climatizada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, onde foram acondicionados num ambiente com humidade relativa de 65% e 20°C de temperatura, de modo a atingir o teor de água de aproximadamente 12%, valor de equilíbrio para estas condições de referência.

Após o período de secagem, dos toros amostrados, 30 da amostra do Centro e 10 da amostra do Norte, seleccionados com base nos diâmetros, foram processados numa máquina de torneamento (Figura 3.2) que permitiu desbastar o toro para diâmetro constante ao longo do seu comprimento (Figura 3.3). Os restantes toros das amostras não sofreram qualquer tipo de processamento.





Figura 3.2 – Máquina de torneamento



Figura 3.3 – Toro torneado

### 3.4 Caracterização visual das amostras

No período final da secagem, os toros das amostras foram analisados visualmente segundo o preconizado na norma EN 1310 (CEN, 1995).

#### 3.4.1 Características geométricas

Em termos de geometria, um toro pode ser analisado quanto à ovalidade, ao diâmetro, ao adelgaçamento e à curvatura.

A ovalidade resulta do crescimento excêntrico do toro, geralmente causado por factores externos. Uma ovalidade severa pode comprometer o uso do elemento, devido à forma e à quantidade de lenho de compressão presente no toro. A medida desta propriedade, segundo a norma EN 1310 (CEN, 1995), é dada pela equação (3.1), sendo a diferença entre o diâmetro máximo ( $d_{\max}$ ) e o diâmetro mínimo ( $d_{\min}$ ) de uma secção situada a pelo menos 1 metro do topo de maior diâmetro, expressa em percentagem do  $d_{\max}$ . Os resultados obtidos, para cada amostra, são apresentados na Tabela 3.2.

$$\text{Ovalidade}(\%) = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\max}} \times 100 \quad (3.1)$$

Tabela 3.2 – Ovalidade dos toros de cada amostra (%)

	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo	<i>N</i>
Amostra Centro	6,3	2,2	11,4	2,1	70
Amostra Norte	6,2	2,5	12,7	2,7	50

*N* – Dimensão da amostra

Segundo a norma EN 14251 (CEN, 2003b) o diâmetro nominal ( $d_{\text{nom}}$ ) de um toro é determinado em função da sua ovalidade. Caso a ovalidade seja superior a 5%, o diâmetro nominal é dado pelo maior dos menores diâmetros de ambos os topos. Se a ovalidade for inferior ou igual a 5%, o diâmetro nominal é dado pelo diâmetro correspondente ao perímetro do maior topo. A Tabela 3.3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3.3 – Diâmetro nominal dos toros de cada amostra (mm)

	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo	<i>N</i>
Amostra Centro	126,3	12,9	154,4	103,0	70
Amostra Norte	117,3	6,1	136,0	106,0	50

O adelgaçamento é traduzido pela forma acentuada de cone que o elemento apresenta. Em casos severos pode influenciar significativamente o comportamento mecânico do elemento de madeira. Esta propriedade foi determinada com base no diâmetro médio ( $d_{med}$ ) (média do diâmetro máximo e mínimo) medido em secções afastadas *a*, pelo menos, 5 cm dos topos, e na distância (*l*) entre essas mesmas secções (equação (3.2)). O adelgaçamento foi assim considerado como o rácio entre a diferença em milímetros dos dois diâmetros médios e a distância entre os pontos de medição. Os resultados obtidos, para as duas amostras, são apresentados na Tabela 3.4.

$$Adelgaçamento (mm/m) = \frac{d_{med,topo1} - d_{med,topo2}}{l} \quad (3.2)$$

Tabela 3.4 – Adelgaçamento dos toros de cada amostra (mm/m)

	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo	<i>N</i>
Amostra Centro	6,0	2,5	12,7	2,0	70
Amostra Norte	6,2	2,1	12,2	2,5	50

A curvatura representa um desvio de linearidade do elemento de madeira. Este problema pode ser o resultado de diversos factores como condições de luminosidade ou uma copa assimétrica da árvore de origem. Valores elevados para este parâmetro podem ter influências severas na resistência da peça, nomeadamente à compressão. Esta característica não foi avaliada nos toros das amostras em estudo, uma vez que num estudo anterior (Morgado *et al.*, 2009) foi demonstrado não existir correlação entre esta característica e a resistência da peça.

### 3.4.2 Lenho juvenil

O lenho juvenil, no caso da madeira de Pinheiro bravo, corresponde geralmente à zona dos primeiros 10 anéis de crescimento (Fonseca, 1989). Após estes primeiros 10 anos começa o crescimento do lenho adulto. O lenho juvenil caracteriza-se por baixas massa volúmica e resistência, baixo módulo de elasticidade, maior ângulo fibrilar, menor comprimento das células, e excessiva variação de volume (Figura 3.4). A variação volumétrica com o teor de água é cerca de 10 vezes a do lenho adulto. Estudos realizados sugerem que o espaçamento entre árvores influencia a quantidade de lenho juvenil, sendo este tanto menor quanto maior for o espaçamento entre árvores (Biblis e Meldahl, 2006).

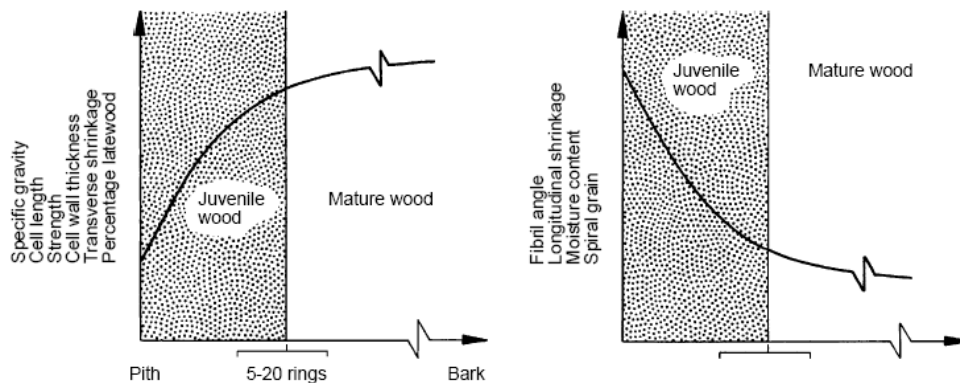


Figura 3.4 – Propriedades do lenho juvenil (USDA, 1999)

A baixa resistência do lenho juvenil foi igualmente verificada no estudo de Larson *et al.* (2004a). Estes autores efectuaram estudos em madeira de secção circular de Pinho-deponderosa procedente do Arizona, Estados Unidos da América. Foram efectuados 99 ensaios à flexão e próximo da zona de rotura foi cortada uma rodela para a obtenção da massa volúmica, teor de água e lenho juvenil. O lenho juvenil foi considerado como a zona dos primeiros 20 anéis de crescimento. A percentagem de lenho juvenil da secção e a resistência à flexão revelaram um coeficiente de correlação de -0,5.

Em termos de madeira de Pinheiro bravo, Machado e Cruz (2005) efectuaram estudos sobre a variação das propriedades mecânicas ao longo de toros desta espécie. Foram seleccionadas 23 árvores do pinhal de Leiria com cerca de 70 anos de idade e 16 a 20m de altura. Em cada toro foram recolhidas amostras da base, a 5% da altura, no DBH (*diameter at breast height*) e a 15%, 35% e 65% da altura. Em cada amostra foram ainda consideradas 3 posições radiais (DP), a posição de 10%, 50% e 90% do raio. Foram determinadas a resistência à flexão e a resistência à compressão segundo a direcção do fio, resistência à tracção na direcção perpendicular ao fio e módulo de elasticidade na direcção do fio. Os resultados obtidos indicam uma redução das propriedades mecânicas desde o DBH até ao topo, devido ao aumento da porção do lenho juvenil provocado pelo adelgaçamento. Na direcção radial verificou-se que a resistência aumenta da medula até 50% do raio, comprovando a fraca resistência do lenho juvenil.

Neste trabalho a percentagem de lenho juvenil foi determinada pela equação (3.3), onde o  $d_{med,10anel}$  é o diâmetro médio da circunferência delimitada pelo 10º anel da secção. No caso de a secção possuir menos de 10 anéis, a percentagem de lenho juvenil é de 100%. Este valor foi aferido em cada um dos toros dos toros, sendo considerado a média desses valores. Os resultados obtidos, para cada uma das amostras, são resumidos na Tabela 3.5

$$Lenho\ juvenil\ (\%) = \frac{d_{med,10anel}^2}{d_{med}^2} \times 100 \quad (3.3)$$

Tabela 3.5 – Percentagem de lenho juvenil dos toros de cada amostra (%)

	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo	<i>N</i>
Amostra Centro	62,1	29,0	100,0	5,1	70
Amostra Norte	76,5	16,4	100,0	44,4	50

### 3.4.3 Fio torcido

O fio torcido ocorre quando as fibras se dispõem segundo linhas helicoidais em torno do eixo do toro. Pode resultar de anomalias de crescimento, como a curvatura do tronco, de factores genéticos ou da influência de factores externos.

A inclinação do fio apresenta-se como um factor penalizador da resistência devido à madeira constituir um material anisotrópico, apresentando diferenças consideráveis, em termos de propriedades mecânicas, consoante é solicitada paralela ou perpendicularmente às fibras. A madeira oferece resistência elevada a esforços aplicados segundo a direcção longitudinal (paralela às fibras) e quase insignificante para esforços aplicados segundo a direcção transversal (perpendicular às fibras). Geralmente a razão entre a resistência à tracção perpendicular e paralela às fibras é de 1/40, sendo a rigidez entre 20 a 40 vezes superior na direcção paralela às fibras, comparativamente com a direcção perpendicular (Machado, 2000).

O efeito da perda de resistência mecânica, devido à inclinação do fio, é geralmente determinado através da equação de Hankinson (equação (3.4)), desenvolvida para o caso da compressão paralela às fibras.

$$f_{c,\theta} = \frac{f_{c,0}f_{c,90}}{f_{c,0}\sin^2(\theta) + f_{c,90}\cos^2(\theta)} \quad (3.4)$$

Onde:

- $f_{c,\theta}$  – Resistência da madeira à compressão axial para um ângulo  $\theta$
- $f_{c,0}$  – Resistência da madeira à compressão axial na direcção das fibras
- $f_{c,90}$  – Resistência da madeira à compressão axial na direcção perpendicular às fibras
- $\theta$  – Ângulo entre a direcção das fibras e a direcção do esforço aplicado na peça

A fórmula de Hankinson foi adaptada por Kollman em 1984 para a aplicação à tracção (Foley, 2003). O expoente “2” foi substituído pela constante  $n$ , que toma valores empíricos de  $n=1-2$  para o caso da tracção e de  $n=2-2,5$  para o caso da compressão. O Wood Handbook (USDA, 1999) apresenta, adicionalmente, os valores de  $n=2$  para o módulo de elasticidade e  $n=1,5-2$  para a resistência à flexão. Esta fórmula tem sido usada em estudos sobre a modelação dos nós, sendo usada a inclinação do fio ao redor dos mesmos.

No caso particular da madeira de secção circular o efeito do fio torcido tende a ser menos severo que no caso da madeira serrada. Isto deve-se a que no caso da madeira de secção circular não existe corte das fibras, como existe no caso da madeira serrada. Esta falta de

continuidade das fibras na madeira serrada torna o material mais sensível a esforços de tracção perpendiculares ao fio (Pellicane e Franco, 1994a e 1994b).

Em elementos de secção rectangular a medição do fio torcido é relativamente fácil, com utensílios simples como o riscador. No entanto em elementos de madeira de secção circular a sua utilização é muito mais complexa e portanto têm de ser considerados métodos alternativos. Neste caso o fio torcido foi determinado com base na inclinação das fendas relativamente ao eixo do toro. Foi medido o máximo desvio ( $h_{10}$ ) ao fim de 10 cm em relação ao eixo do toro (Figura 3.5) e depois extrapolado esse desvio para 1 metro, sendo o fio torcido expresso em centímetros por metro. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.6.

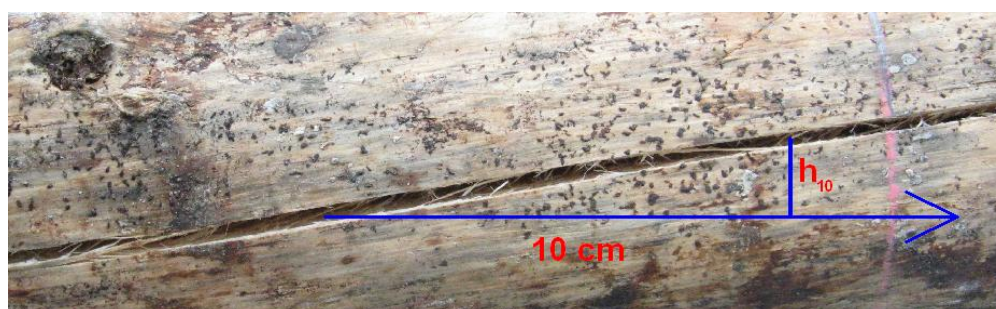


Figura 3.5 – Medição do fio torcido

Tabela 3.6 – Desvio do fio dos toros de cada amostra (cm/m)

	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo	N
Amostra Centro	6,6	4,2	20,0	2,0	70
Amostra Norte	6,5	3,6	15,0	2,0	50

#### 3.4.4 Taxa de crescimento

A taxa de crescimento é uma característica visual que expressa a espessura média dos anéis de crescimento. Estudos realizados com madeira de secção circular de Pinheiro bravo (Morgado *et al.*, 2009) revelam que a taxa de crescimento é a característica visual com melhor correlação com a massa volúmica e propriedades mecânicas dos elementos de madeira. A taxa de crescimento foi estimada em cada topo como sendo o rácio entre o maior diâmetro e o dobro do número de anéis de crescimento anual, expressa em mm. A taxa de crescimento do toro foi considerada como a média dos dois valores obtidos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Taxa de crescimento dos toros de cada amostra (mm)

	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo	N
Amostra Centro	4,5	1,3	9,0	2,1	70
Amostra Norte	4,8	0,8	6,4	3,2	50

### 3.4.5 Lenho de reacção

Este tipo de lenho é frequentemente associado a ramos e troncos tortuosos. O lenho de reacção é criado como resposta da árvore para levar o ramo ou tronco tortuoso a uma posição mais natural. No caso das resinosas esta característica é denominada de lenho de compressão e é normalmente encontrado na base do tronco ou ramo inclinado.

O lenho de compressão possui características que permitem grandes esforços de compressão. No entanto, possui uma resistência à tracção consideravelmente inferior à da madeira normal (Foley, 2003). Uma rotura por flexão numa zona com lenho de compressão será uma rotura bastante frágil, devido à fraca tensão de tracção suportada e à elevada tensão de compressão suportada.

A massa volúmica do lenho de compressão é superior, normalmente em 30% a 40%, à da madeira normal (USDA, 1999). Devido ao facto de este tipo de lenho possuir baixos valores de resistência à tracção e módulo de elasticidade na direcção das fibras, a massa volúmica não é um bom indicador da resistência da peça (Foley, 2003).

Um outro problema deste tipo de lenho está relacionado com uma variação anormal de dimensões relativamente ao lenho normal. O lenho de compressão tem uma significativa variação dimensional segundo o eixo longitudinal da peça, podendo ser cerca de 10 vezes superior à da madeira normal (USDA, 1999). Esta excessiva variação dimensional gera outro tipo de problemas quando numa mesma peça está presente madeira normal e lenho de compressão, por possuírem variações dimensionais diferentes, podem gerar-se esforços internos que levam ao empeno da peça e, em casos extremos, a roturas devido a tracção. A ocorrência desta característica foi claramente registada em cerca de 20% dos toros da amostra do Centro e em cerca de 44% dos toros da amostra do Norte.

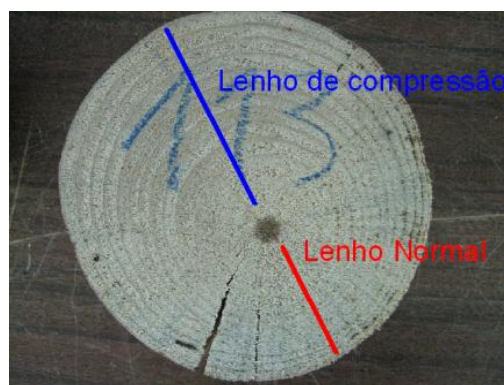


Figura 3.6 – Identificação do lenho de compressão

### 3.4.6 Fendas

No caso da madeira de Pinheiro bravo, grande parte das fendas que surgem devem-se a operações de secagem, por vezes mal conduzidas, levadas a cabo para que o teor de água da madeira tenda para o teor de água de equilíbrio com as condições ambientais do local de aplicação desse elemento (Machado, 2000).

A influência das fendas nas propriedades mecânicas da madeira está relacionada com o facto de constituírem zonas de descontinuidade. A sua influência redutora nas propriedades mecânicas da madeira pode ser interpretada de forma simplificada considerando que um dado elemento estrutural é composto por dois ou mais elementos individuais justapostos, completamente desligados, que contribuem separadamente para a resistência do conjunto e dependendo essa contribuição do tipo e modo de aplicação do esforço.

De acordo com Bodig e Jayne (*apud* Foley, 2003) as fendas não influenciam a resistência à tracção na direcção do fio. Relativamente à resistência à tracção na direcção perpendicular ao fio esta pode ser severamente afectada, podendo mesmo ser nula no caso de fendas bastante profundas. A resistência à compressão na direcção do fio também é afectada, uma vez que a distribuição de esforços é afectada. Se o elementos de madeira possuir fendas profundas, este tende a comportar-se como um conjunto de colunas individuais, possuindo esbelteza mais elevada que o elemento inicial, implicando uma menor capacidade resistente. Em termos de resistência ao corte, esta também é afectada por existir uma redução directa da área resistente ao corte e, no caso de fendas anelares, devido à redução da ligação entre anéis de crescimento (Newlin e Johnson, 1924). A redução na resistência à flexão depende da posição da fenda relativamente à distribuição de momentos instalada na peça, e da sua proximidade ao eixo neutro.

As fendas podem ainda potenciar a diminuição da resistência mecânica pela oportunidade que conferem a um aumento do teor de água e ao surgimento de focos de degradação biológica. Isto deve-se ao facto de serem zonas propícias à deposição de água, bem como permitirem um aumento da área de exposição.

A influência das fendas nas propriedades mecânicas é difícil de generalizar e contabilizar, dependendo da sua localização, do seu número, da sua profundidade e da sua orientação relativamente à força aplicada. Estudos realizados com madeira de secção circular de Pinheiro bravo revelaram uma correlação praticamente desprezável entre a resistência à flexão e as características das fendas (Morgado *et al.*, 2009). Desta forma a contabilização deste defeito não foi efectuada nos toros em estudo.

#### **3.4.7 Nós**

Um nó corresponde à porção da base de um ramo inserida no tronco da árvore. Esta massa tem um desenvolvimento sensivelmente cónico, irradiando da medula ou próximo dela. Um nó pode ser constituído por duas zonas, uma zona mais interior do ramo, onde existe ligação entre o ramo e os anéis de crescimento do toro da árvore, e pela zona restante do ramo morto. Nesta última zona não existe ligação entre o toro da árvore e o ramo, sendo que as fibras do tronco, durante o crescimento do mesmo, contornam essa parte de ramo inserida no tronco da árvore, podendo esta acabar por ser enclausurada durante o crescimento do tronco da árvore, Figura 3.7.

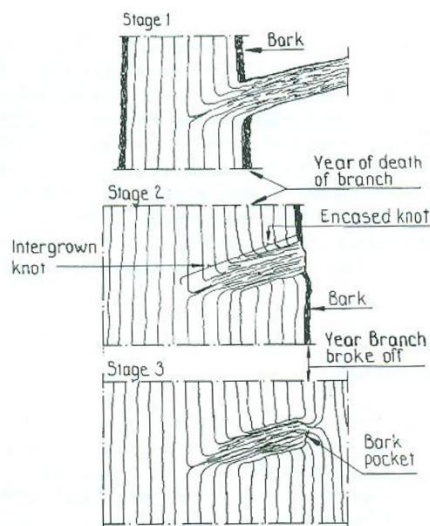


Figura 3.7 – Formação de nós vivos e nós inclusos (Hoffmeyer, 1987)

A influência dos nós nas propriedades mecânicas da madeira está relacionada com a interrupção da continuidade das fibras, no caso particular de madeira serrada, e com mudança na direcção das fibras que rodeiam o nó. A sua influência depende do seu tamanho, localização, forma e solidez, bem como do desvio local do fio e do tipo de esforço actuante. A influência dos nós depende também do teor de água e da duração do carregamento (Hoffmeyer, 1987). Segundo o Wood Handbook (USDA, 1999) a maioria das propriedades mecânicas tem valores menores em secções contendo nós do que em secções de madeira limpa devido a:

- redução da área de madeira limpa na secção;
- desvio do fio em torno do nó;
- concentração de tensões provocada pela descontinuidade das fibras, no caso de madeira serrada;
- desigual distribuição de esforços na secção transversal devido a nós excêntricos;
- fendilhação ocorrendo frequentemente na zona em redor do nó durante a secagem.

De entre estes factores redutores de resistência, tem sido admitido que o desvio do fio é o mais importante. O desvio do fio provocado por um nó afecta uma zona em torno do nó definida aproximadamente por 3 vezes o diâmetro do nó (Foley, 2003). Na zona de ramos mortos tendem a existir menores valores de desvio do fio, pelo que geralmente são menos penalizadores em termos de propriedades mecânicas (USDA, 1999).

Os nós são muito mais penalizadores na resistência à tracção do que na resistência à compressão (Newlin e Johnson, 1924). Esta diferença deve-se a que o efeito da inclinação do fio se faz sentir sobretudo em tracção, sendo que na zona dos nós a resistência à tracção é praticamente nula. O nó, no entanto, confere um acréscimo de resistência à compressão perpendicular às fibras e de resistência ao corte na direcção das fibras (Foley, 2003). Tendo em conta o referido e para o caso de uma viga simplesmente apoiada, um nó na parte inferior



(sujeita a esforço de tracção) é mais penalizador no carregamento da viga do que um nó na parte superior (sujeita a esforço de compressão).

Os nós em madeira de secção circular são menos penalizadores na resistência que os nós em madeira serrada. Apesar de a direcção do fio ser irregular nos dois casos, o ângulo do fio na superfície da madeira de secção circular (não torneada) é inferior ao da madeira serrada. Para além disso, contrariamente à madeira serrada, na madeira de secção circular (não torneada) não existe descontinuidade nas fibras.

A avaliação das características dos nós passou pela medição do seu diâmetro, posição na secção transversal e espaçamento longitudinal. No caso de nós agrupados, conjunto de dois ou mais nós de tal modo próximos que as fibras circundantes estão inflectidas em torno do grupo por eles formado (Figura 3.8), o diâmetro equivalente é dado pela soma do diâmetro dos nós ou pelo diâmetro do grupo, considerando-se o menor deles (Figura 3.9). O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 3.8.



Figura 3.8 – Nós agrupados

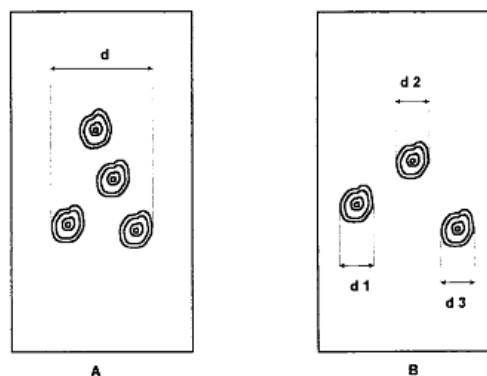


Figura 3.9 – Diâmetro de um agrupamento de nós (CEN, 1995)

Tabela 3.8 – Características das secções com nós dos toros de cada amostra

		$d_{\text{nó}}$ (mm)	$d_{\text{nó}}^{(1)}$ (%)	N.º de nós	Espaçamento longitudinal (mm)
Amostra Centro $N=70$	Média	15,8	12,4	4,2	545,1
	Máximo	90,0	74,7	7,0	1330,0
	Mínimo	4,0	2,8	1,0	100,0
	Desvio Padrão	8,1	6,3	1,5	287,5
Amostra Norte $N=50$	Média	17,2	14,6	4,0	591,4
	Máximo	98,0	87,5	7,0	1300,0
	Mínimo	2,0	1,7	1,0	100,0
	Desvio Padrão	10,6	9,2	1,5	284,2

1) Diâmetro do nó expresso em percentagem do diâmetro da secção onde surge

### 3.4.8 Análise das amostras

Os valores médios em termos de ovalidade são semelhantes para as duas amostras, sendo que os toros das amostras apresentaram valores inferiores a 20%, limite admitido para aplicação estrutural (Ranta-Maunus, 1999a). A mesma situação se verifica com o adelgaçamento, no entanto, 8% do conjunto total dos toros apresenta valores superiores ao limite recomendado de 10mm/m (Ranta-Maunus, 1999a). Em termos de diâmetro nominal, na amostra do Centro foi possível obter toros de maiores dimensões, resultando num intervalo mais alargado de valores de diâmetro nominal (103,0 a 154,4mm), no entanto, as duas amostras possuem toros de diâmetros sensivelmente similares.

A taxa de crescimento média dos toros das duas amostras é similar, sendo que todos os toros apresentam valores para esta característica inferiores a 10mm, valor limite para a classe inferior da madeira serrada de Pinheiro bravo. Os valores médios obtidos para a inclinação do fio são, mais uma vez, semelhantes nas duas amostras, apresentando 4,2% do total dos toros valores de desvio do fio superiores a 14,3cm/m, limite recomendável para aplicação estrutural (Ranta-Maunus, 1999a). Os valores médios da percentagem de lenho juvenil são elevados nas duas amostras (62,1% a 76,5%), sendo que em cerca de 25% do total de toros a secção era constituída inteiramente por lenho juvenil. Este resultado era expectável dado as amostras de toros serem procedentes de árvores jovens (cerca de 16 anos de idade média). Relativamente aos nós, o levantamento realizado revelou que as características das secções com nós são semelhantes nos toros das duas amostras. De um modo geral é possível afirmar que os toros das duas amostras apresentam características visuais semelhantes.

## 3.5 Ensaio de toros

### 3.5.1 Ensaio de flexão

Este ensaio foi realizado no dispositivo da Figura 3.10, segundo os requisitos estipulados na norma EN 14251 (CEN, 2003b), nomeadamente o facto de o toro ser simplesmente apoiado e o carregamento simétrico. O dispositivo suporta uma carga total de 200 kN.

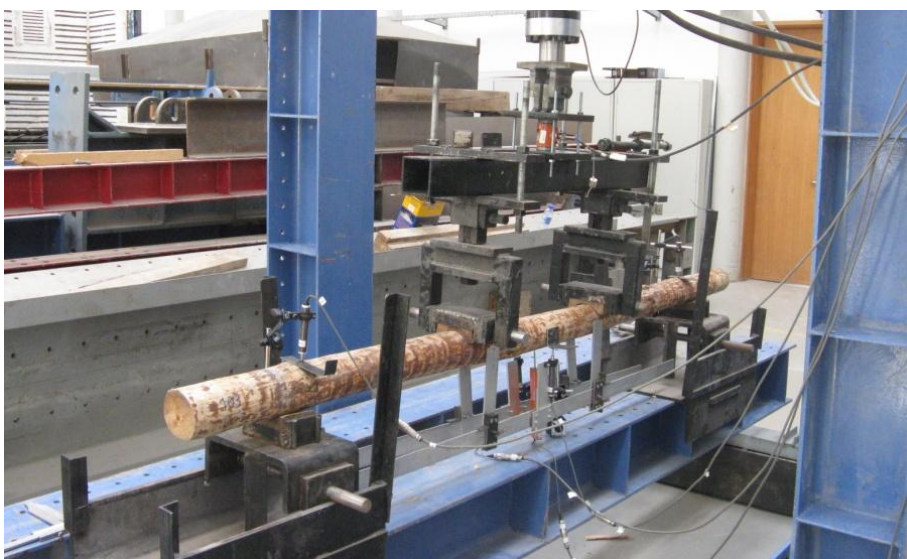


Figura 3.10 – Dispositivo de ensaio de flexão de toros

Os apoios são constituídos por um perfil em U, no qual apoia o toro, soldado a um outro perfil em U, pelos banzos do qual passa um eixo que apoia sobre os banzos de um perfil I deitado (Figura 3.11). O eixo permite a translação e a rotação do apoio sobre os banzos do perfil I, de modo a garantir os requisitos do ensaio.



Figura 3.11 – Pormenor de um apoio



Figura 3.12 – Pormenor de um ponto de carga

Os pontos de carga rodam segundo um eixo vertical de modo a permitir melhor ajuste à superfície do toro. É permitida igualmente a rotação segundo dois eixos horizontais (Figura 3.12), de modo a assegurar a verticalidade e a igualdade das cargas aplicadas.

A rotação dos apoios e dos pontos de carga situa-se fora do plano neutro da peça, o que pode originar um momento flector adicional no toro. No entanto, estudos indicam que esta influência é muito reduzida, inferior a 1,5% (Vries, 1998a).

De modo a distribuir o carregamento e a evitar a rotação durante o ensaio, quer nos apoios quer nos pontos de carga, foram colocados blocos de madeira de eucalipto (escolhida por possuir boa resistência) com comprimento de 10cm, de modo a evitar o esmagamento quer do próprio apoio quer do próprio toro. Estas peças tinham o diâmetro adequado ao toro a ser ensaiado de modo a assegurar um ajuste perfeito. Devido à alargada gama de diâmetros dos toros optou-se por maquinar blocos com diâmetros de 100, 130 e 160mm (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Maquinação dos blocos de madeira

O ensaio de flexão permite determinar o módulo de elasticidade e a resistência à flexão do toro. O módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que relaciona as tensões e deformações num material sólido, proporcionando uma medida da sua rigidez. No ensaio

foram efectuadas medições para a determinação do módulo de elasticidade local ( $E_{\text{local}}$ ) e global ( $E_{\text{global}}$ ). As diferenças entre o  $E_{\text{local}}$  e  $E_{\text{global}}$  (Figura 3.14) resultam sobretudo da diferença de propriedades dos defeitos presentes na zona central em relação aos presentes no resto do toro, bem como da existência de esforço transverso no caso do  $E_{\text{global}}$ .

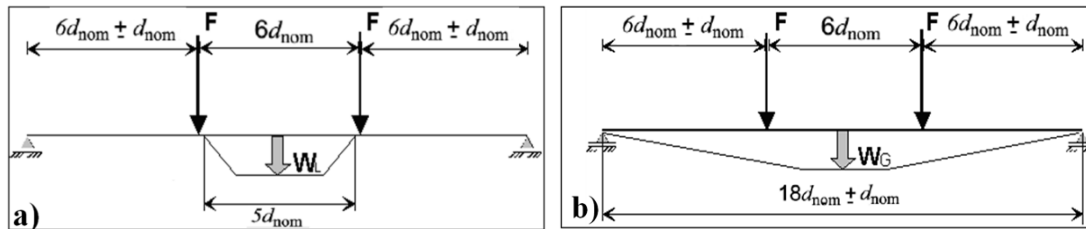


Figura 3.14 – Esquema de ensaio para determinação de a)  $E_{\text{local}}$  b)  $E_{\text{global}}$

Com base no diâmetro nominal ( $d_{\text{nom}}$ ), referido em 3.4.1, todas as distâncias necessárias para o ensaio são determinadas. Os toros foram então marcados com todas as distâncias relevantes,  $18d_{\text{nom}}$  para o espaçamento entre apoios,  $6d_{\text{nom}}$  para o espaçamento entre as forças aplicadas e finalmente  $5d_{\text{nom}}$  para a medição de deslocamento necessários para a determinação do  $E_{\text{local}}$ .

Os toros marcados foram colocados no dispositivo de ensaio com a convexidade, no caso de existir curvatura, segundo a direcção do carregamento, sendo a posição dos apoios e o sistema de aplicação de carga ajustados a cada um dos toros.

Os equipamentos de medição eram constituídos por uma célula de carga de 10 toneladas com um erro de não linearidade de 0,1%, 4 deflectómetros de 25mm com um erro de não linearidade de 0,1% e um deflectómetro de 100mm um erro de não linearidade de 0,2%.

Para a determinação do  $E_{\text{local}}$  é necessário conhecer o deslocamento relativo entre os extremos da distância  $5d_{\text{nom}}$  e o centro da mesma. Isso poderia ser feito facilmente com 6 deflectómetros (3 de cada lado do toro). No entanto, como esse esquema tornaria todo o processo demasiado moroso, optou-se pelo uso de braços de alumínio aparafusados nos extremos da distância e com um deflectómetro a meio (Figura 3.15). Desta forma o deslocamento medido pelo deflectómetro é já a distância relativa aos extremos, sendo apenas necessário dois deflectómetros. O deslocamento  $W_L$  (Figura 3.14) é considerado como sendo a média dos deslocamentos medidos pelos deflectómetros colocados em cada lado do toro.



Figura 3.15 – Medições a meio vão



Figura 3.16 – Medições nos apoios

No caso dos deslocamentos para a determinação do  $E_{\text{global}}$  foi necessário apenas um deflectómetro (Figura 3.15) para a medição do deslocamento global a meio vão. Para obter o deslocamento relativo entre as extremidades do toro e o centro, foi colocado um deflectómetro de 25mm em cada apoio (Figura 3.16) para medição do deslocamento vertical. O deslocamento vertical no apoio resulta não somente do ajuste entre o toro e o apoio, mas também de possível esmagamento. O deslocamento  $W_G$  (Figura 3.14) será o valor medido pelo deflectómetro central deduzido da média dos valores medidos pelos deflectómetros dos apoios.

A carga aplicada para a determinação dos módulos de elasticidade corresponde a 40% da carga de rotura estimada para o toro. A velocidade de aplicação de carga não é referida na norma, sendo que estudos realizados demonstram que a velocidade de aplicação da carga influencia o valor do módulo de elasticidade (Vries, 1998a). Desta forma, optou-se por usar a velocidade estimada para o ensaio de rotura. A carga foi medida com uma célula de carga colocada entre o actuador e a viga de distribuição de carga localizada acima do toro (Figura 3.17). Dado que a disposição da célula de carga não permite contabilizar o peso próprio do dispositivo, essa carga, 143 kg, foi somada posteriormente à carga medida.

Todos os equipamentos de medição referidos foram ligados a um equipamento de aquisição de dados (Figura 3.18) que efectuou leituras com um intervalo de 1 segundo.

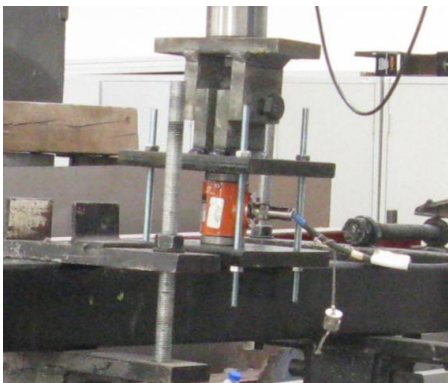


Figura 3.17 – Localização da célula de carga      Figura 3.18 – Equipamento de aquisição de dados

A resistência à flexão ( $f_m$ ) é uma propriedade mecânica de grande importância sendo um dos parâmetros determinantes para a definição da classe de resistência no caso de secções rectangulares (CEN, 2003c). Para a sua determinação é necessário conhecer a carga de rotura do toro. A velocidade de aplicação de carga é definida de modo a que a rotura seja atingida dentro de um intervalo de tempo de  $300 \pm 120$  segundos. A força de rotura foi estimada a partir da tensão de rotura média obtida até então.

Apesar de não ser possível medir os deslocamentos na rotura, por uma questão de protecção dos equipamentos de medição, foi possível traçar um gráfico força-deslocamento com base nos deslocamentos registados pelo actuador no local de aplicação de carga (Figura 3.19).

Apesar de todas as não linearidades que serão de esperar para esta medição, decorrentes nomeadamente dos ajustes iniciais e eventuais deformações do equipamento de carga, o comportamento força-deslocamento obtido é bastante linear. As roturas aconteceram geralmente em secções com nós localizados na zona central (Figura 3.20) e, com menos frequência, em tracção na zona central ou sob a zona de aplicação de carga (Figura 3.21).

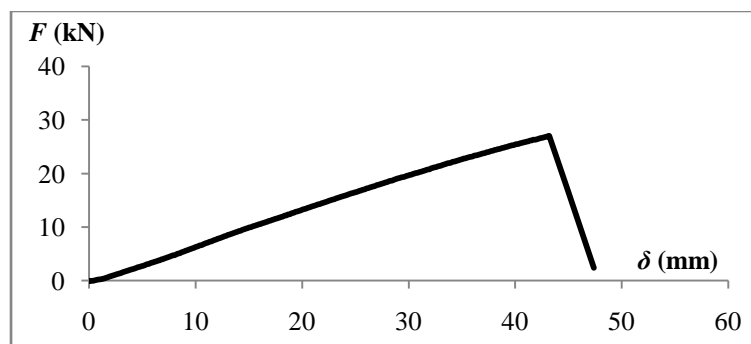


Figura 3.19 – Gráfico força-deslocamento até à rotura em flexão



Figura 3.20 – Rotura numa secção com nós



Figura 3.21 – Rotura a meio vão

### 3.5.2 Ensaio de compressão

Com o ensaio de compressão pretende-se avaliar a resistência à compressão na direcção das fibras ( $f_{c,0}$ ). O ensaio foi realizado numa prensa (Figura 3.22) em que o prato superior está apoiado numa rótula esférica de modo a permitir a aplicação da carga sem induzir flexão. Os provetes foram retirados dos toros ensaiados à flexão, em zonas não afectadas pela rotura, e possuíam um comprimento igual a seis vezes o menor diâmetro, os topos planos, paralelos entre si e perpendiculares ao eixo longitudinal do provete. A velocidade de aplicação de carga foi estimada de modo a que a rotura ocorresse no intervalo de tempo  $300 \pm 120$  segundos.



Figura 3.22 – Ensaio de compressão de provetes de toros

Com base nos deslocamentos medidos pelo deflectómetro acoplado à prensa, é apresentado na Figura 3.23 o gráfico força-deslocamento típico deste tipo de ensaio. Da sua análise conclui-se que até cerca de 70 a 80% da carga máxima o comportamento é aproximadamente elástico linear. Após esse ponto observou-se alguma ductilidade, não existindo um decréscimo tão acentuado na resistência após a rotura como nos ensaios de flexão.

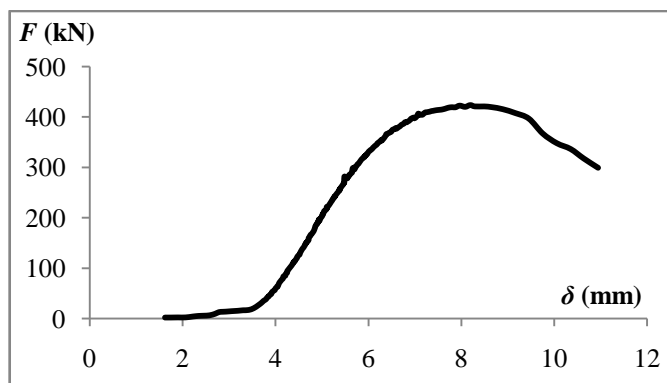


Figura 3.23 – Gráfico força-deslocamento até à rotura em compressão

As roturas por compressão caracterizam-se pelo surgimento de pregas, correspondentes ao esmagamento/instabilização de fibras. Em termos de localização, estas situaram-se geralmente na vizinhança de nós (Figura 3.24). Quando o provete apresentava uma curvatura significativa a rotura aconteceu, usualmente, na parte interior da curvatura (Figura 3.25), devido aos momentos de 2ª ordem no lado côncavo.



Figura 3.24 – Rotura na proximidade de nós



Figura 3.25 – Rotura devido à curvatura da peça

### 3.5.3 Teor de água e massa volúmica

O teor de água é por definição a massa de água que a peça possui, expressa em percentagem da sua massa seca. Uma vez que o teor de água afecta as propriedades mecânicas do material, o seu valor no momento do ensaio deve ser conhecido. A norma EN 14251 (CEN, 2003b) indica que os ensaios devem ser realizados com teor de água de 12%. Caso tal não se verifique é necessário aplicar correcções, segundo a norma EN 384 (CEN, 2004c), às propriedades mecânicas determinadas, de modo a obter os seus valores para o teor de água de referência.

Para a determinação do teor de água foi cortada uma rodela do toro, isenta de nós, próxima da zona de rotura, sendo posteriormente pesada e colocada num forno a  $103\pm 1^\circ\text{C}$  (Figura 3.26) onde o seu peso foi medido periodicamente até estabilizar. Considerou-se o peso estabilizado quando, entre duas pesagens consecutivas realizadas, num intervalo de tempo de 6 horas, a diferença foi menor ou igual a 0,1%.

A massa volúmica é um dos parâmetros mais importantes para a avaliação da qualidade da madeira, por ser de fácil determinação e estar relacionada com as propriedades mecânicas do material. Esta propriedade física varia entre espécies, entre proveniências da mesma espécie, entre indivíduos da mesma espécie e dentro da mesma árvore. A variação na árvore é observada no sentido longitudinal, da base para o topo, e no sentido radial, da medula para a casca (Brasil *et al.*, 1977). Segundo Mendes *et al.* (1999), no género *Pinus*, no qual se enquadra o Pinheiro bravo português (*Pinus Pinaster* Ait.), em termos longitudinais existe um decréscimo uniforme da massa volúmica com a altura.

Avaliação da massa volúmica foi efectuada com a rodela usada para a determinação do teor de água de ensaio. Para tal, para além do peso da rodela foi determinado o seu volume com base nos valores médios do diâmetro e altura (obtidos com base na média entre o valor mínimo e máximo).



Figura 3.26 – Secagem das rodela dos toros

### 3.6 Ensaio de madeira limpa

Dos toros ensaiados à flexão foram retirados, sempre que possível, segmentos não afectados pela rotura com um comprimento mínimo de 340mm. Dos referidos segmentos foram posteriormente obtidas, da parte mais exterior da secção transversal, peças de madeira limpa com 20x20mm de secção transversal e pelo menos 340mm de comprimento (Figura 3.27). Deste processo obteve-se uma amostra de 57 peças de madeira limpa, sendo 27 da amostra de toros do Centro e as restantes da amostra do Norte.



Figura 3.27 – Peças de madeira limpa obtidas dos toros



### 3.6.1 Ensaio de flexão

Este ensaio foi realizado no dispositivo da Figura 3.28, segundo os requisitos estipulados na norma ISO 3133 (ISO, 1975), sendo a peça simplesmente apoiada, com 320mm de distância entre apoios, e a carga aplicada a meio vão. Os apoios possuem capacidade de rotação, sendo constituídos por um cilindro de 60mm de diâmetro. No topo de cada cilindro foi colocada uma chapa metálica para minimização do esmagamento na madeira com 20mm de largura (Figura 3.29). A cabeça de carga é igualmente constituída por um cilindro semelhante ao do apoio, de modo a que a carga aplicada na peça de madeira seja o mais próximo possível de uma carga pontual (Figura 3.30).

Nas peças de madeira limpa foi medida a secção transversal a meio vão com um dispositivo de medição com precisão de 0,01mm e marcada a posição dos apoios e de aplicação de carga, previamente à sua colocação na máquina de ensaios.

O ensaio de flexão permite determinar o módulo de elasticidade e a resistência à flexão da peça de madeira limpa. Neste caso particular, contrariamente ao ensaio de flexão da madeira estrutural, uma vez que a carga é aplicada ao centro, apenas é possível determinar uma variante do módulo de elasticidade, o módulo de elasticidade global.

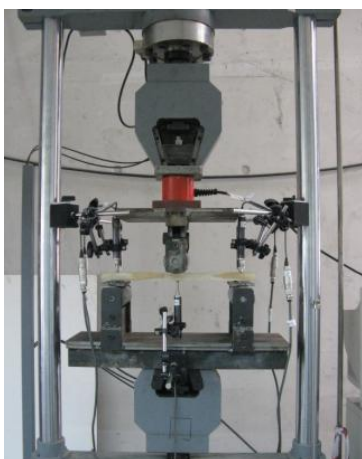


Figura 3.28 – Dispositivo de ensaio de flexão de madeira limpa



Figura 3.29 – Pormenor do apoio

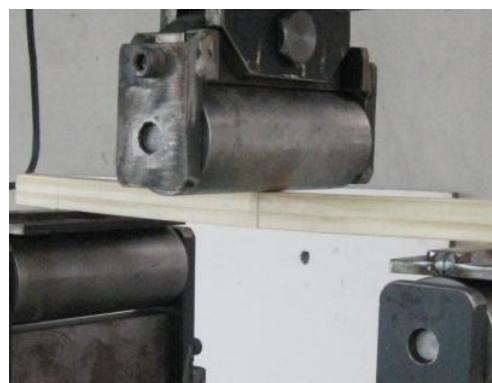


Figura 3.30 – Pormenor da aplicação da carga

Os equipamentos de medição eram constituídos por uma célula de carga de 25kN e 5 deflectómetros de 25mm, com um erro de não linearidade de 0,1%. Todos os equipamentos de medição foram ligados a um equipamento de aquisição de dados que efectuou leituras com um intervalo de 1 segundo.

Para determinação do módulo de elasticidade é necessário conhecer o deslocamento relativo entre os apoios e o meio vão. Para tal foi colocado um deflectómetro a meio vão e dois deflectómetros em cada apoio (Figura 3.31). Os deflectómetros nos apoios permitem contabilizar o esmagamento e ajuste aí existente. O deslocamento final será o deslocamento a meio vão deduzido da média dos esmagamentos registados nos apoios.

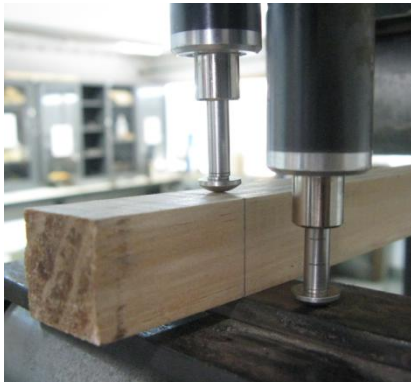


Figura 3.31 – Pormenor das medições nos apoios

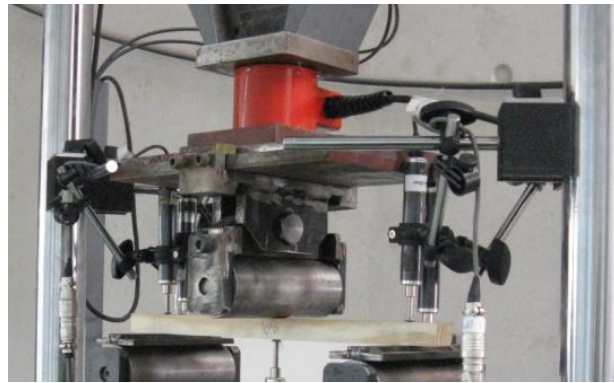


Figura 3.32 – Localização da célula de carga

A norma ISO 3133 (ISO, 1975) não apresenta indicações para o procedimento de determinação do módulo de elasticidade, pelo que se adoptaram as indicações da norma EN 408 (CEN, 2003d). Assim, a carga aplicada para a determinação do módulo de elasticidade correspondia a 40% da carga de rotura estimada. A velocidade de aplicação de carga foi de 0,003mm/s por milímetro de altura da peça, resultando numa velocidade de 0,06mm/s, segundo a norma EN 408 (CEN, 2003d). A carga foi medida com uma célula de carga colocada entre a prensa e a cabeça de carga localizada acima da peça (equipamento vermelho na Figura 3.32). Dado que a disposição da célula de carga não permite contabilizar o peso próprio do dispositivo, essa carga, cerca de 23,6kg (0,24kN), foi somada posteriormente à carga medida.

Para determinação da resistência à flexão ( $f_m$ ) a peça é levada à rotura. A velocidade do carregamento é definida de modo a que a rotura seja atingida dentro de um intervalo de tempo de  $90 \pm 30$  segundos (ISO, 1975). A força de rotura foi estimada a partir da tensão de rotura média obtida até então. Apesar de não ser possível medir os deslocamentos na rotura, por uma questão de segurança dos equipamentos de medida, foi possível traçar um gráfico força-deslocamento com base nos deslocamentos registados pela prensa no local de aplicação da força (Figura 3.33). Tal como no caso da madeira estrutural, apesar de todas as não linearidades que serão de esperar para esta medição, o comportamento força-deslocamento obtido é bastante linear até à rotura. As roturas aconteceram geralmente em tracção sob o ponto de aplicação de carga (Figura 3.34).

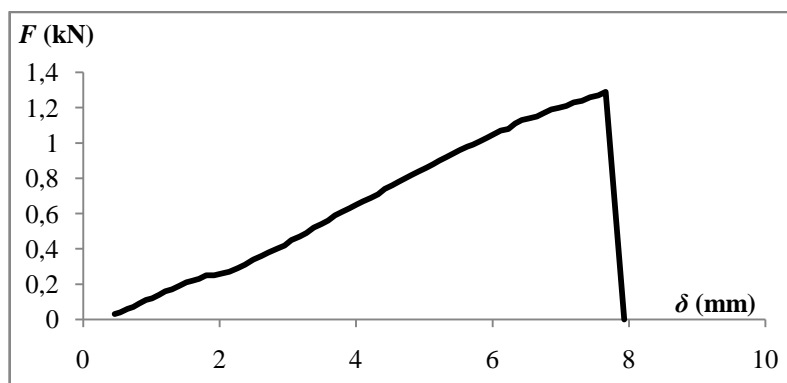


Figura 3.33 – Gráfico força-deslocamento até à rotura em flexão de uma peça de madeira limpa



Figura 3.34 – Roturas das peças de madeira limpa em tração na zona central

### 3.6.2 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão foi realizado segundo o preconizado na norma NP 618 (IPQ, 1973b). O ensaio foi realizado na mesma prensa que o ensaio anterior mas substituindo o dispositivo anterior por dois pratos paralelos, em que o prato superior é provido de uma rótula de modo a permitir a aplicação da carga sem induzir flexão (Figura 3.35). Os provetes foram retirados das peças de madeira limpa ensaiadas à flexão, de zonas não afectadas pela rotura. Os provetes possuíam um comprimento de 60mm de comprimento, com os topos maquinados de modo serem planos, paralelos entre si e perpendiculares ao eixo longitudinal da peça. A velocidade de aplicação de carga foi estimada de modo a que a rotura ocorresse em cerca de 180 segundos.

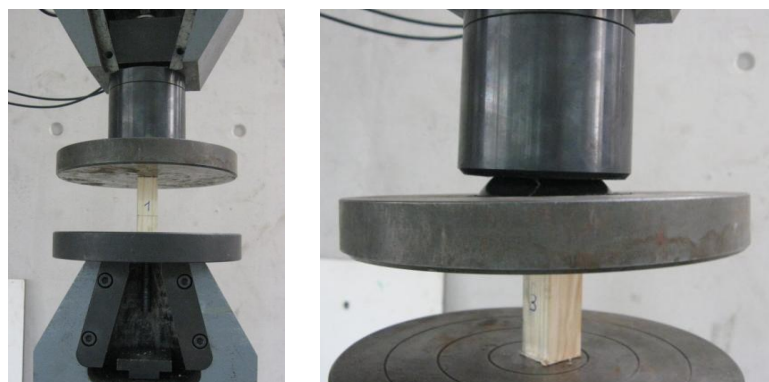


Figura 3.35 – Ensaio de compressão de provetes de peças de madeira limpa

Com base nos deslocamentos medidos pelo deflectómetro acoplado à prensa, é apresentado na Figura 3.36 o gráfico força-deslocamento típico deste tipo de ensaio. Da sua análise, e tal como aconteceu no ensaio de compressão com elementos estruturais, conclui-se que até ser atingida a carga máxima o comportamento é aproximadamente elástico linear. No entanto após esse ponto observa-se alguma ductilidade, não existindo um decréscimo tão acentuado na resistência após a rotura como nos ensaios de flexão. As roturas por compressão caracterizam-se pelo surgimento de pregas, correspondentes ao esmagamento/instabilização de fibras.

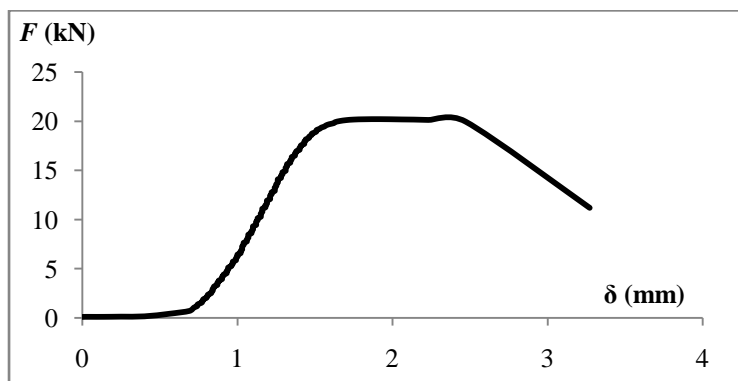


Figura 3.36 – Gráfico força/deslocamento até à rotura em compressão



Figura 3.37 – Exemplos de roturas no ensaio de compressão de provetes de madeira limpa

### 3.6.3 Teor de água e massa volúmica

A determinação do teor de água seguiu o procedimento preconizado na norma portuguesa NP 614 (IPQ, 1973a). Para tal, foram cortados, próximo da zona de rotura em flexão, prismas com comprimento entre 20 e 60mm. Após o corte, as peças foram medidas e colocadas num forno à temperatura de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , onde o seu peso foi medido periodicamente até estabilizar. Considerou-se o peso estabilizado quando, entre duas pesagens consecutivas, realizadas num intervalo de tempo de 2 horas, a diferença foi menor ou igual a 0,5%.

A avaliação da massa volúmica foi efectuada com os prismas usados para a determinação do teor de água de ensaio. Para tal, para além do peso da rodela foram medidas a altura, largura e comprimento, em termos de valores médios, para cálculo do volume das peças.

### 3.7 Tratamento de resultados

#### 3.7.1 Toros

Após a obtenção dos dados experimentais foi seguido o preconizado na norma EN14251 (CEN, 2003a) para a determinação das propriedades físicas e mecânicas dos toros das amostras.

O teor de água dos toros foi determinado através da equação(3.5) e a massa volúmica através da equação (3.6), sendo o volume da rodela estimado como um cilindro com base no diâmetro médio e na altura média da rodela (obtidos por média da dimensão máxima e mínima).

$$w = \frac{m_w - m_f}{m_f} \times 100 \quad (3.5)$$

$$\rho_w = \frac{m_w}{V} \quad (3.6)$$

Onde:

- $w$  - Teor de água
- $m_w$  - Massa da rodela com o teor de água de ensaio
- $m_f$  - Massa da rodela seca
- $\rho_w$  - Massa volúmica com o teor de água de ensaio
- $V$  - Volume da rodela

Na determinação do  $E_{\text{local}}$  foi usada a equação (3.7), preconizada na norma EN14251 (CEN, 2003b) e no caso do  $E_{\text{global}}$  a equação (3.9) referida na norma EN 408 (CEN, 2003d). Para a sua aplicação foram realizadas as necessárias adaptações.

$$E_{\text{local}} = \frac{\Delta M}{\Delta W_L} \frac{c^4}{6I_1} \left[ -\frac{1}{(c+l_1/2)^2} - \frac{D}{2} + \frac{1}{c^2} \right] \quad (3.7)$$

$$\text{com } c = \frac{l_1 d_1}{d_2 - d_1} \text{ e } D = \left( \frac{1}{c^2} - \frac{1}{(c+l_1)^2} \right) \quad (3.8)$$

$$E_{\text{global}} = \frac{\Delta F}{\Delta W_G} \frac{l^3}{12I} \left[ \frac{3a}{4l_e} - \left( \frac{a}{l_e} \right)^3 \right] \quad (3.9)$$

Onde:

- $F$  - Força aplicada (N)
- $M$  - Momento flector a meio vão (Nmm)
- $\Delta F/\Delta W_G$  - Declive da recta  $F-W_G$
- $\Delta M/\Delta W_L$  - Declive da recta  $F-W_L$
- $l_1$  - Distância  $5d_{\text{nom}}$  centrada no toro (mm)
- $I_1$  - Segundo momento de área da menor secção ao longo da distância  $l_1$  (mm<sup>4</sup>)
- $I$  - Segundo momento de área da secção a meio vão (mm<sup>4</sup>)
- $d_1$  - Menor diâmetro do toro ao longo da distância  $l_1$  (mm)

- $d_2$  - Maior diâmetro do toro ao longo da distância  $l_1$  (mm)  
 $l_e$  - Distância entre apoios (mm)  
 $a$  - Valor médio da distância dos pontos de carga ao apoio mais próximo (mm)

A determinação da resistência à flexão ( $f_m$ ) foi efectuada segundo a fórmula da equação (3.10), preconizada na norma EN 14251 (CEN, 2003b) e a resistência à compressão ( $f_{c,0}$ ) segundo a equação (3.11)

$$f_m = \frac{16F_{\max} a}{\pi d_h d_v^2} \quad (3.10)$$

$$f_{c,0} = \frac{4F_{\max}}{\pi d_{\min} d_{\max}} \quad (3.11)$$

Onde:

- $F_{\max}$  - Força de rotura (N)  
 $d_h$  - Diâmetro da secção a meio vão medido na horizontal (mm)  
 $d_v$  - Diâmetro da secção a meio vão medido na vertical (mm)  
 $d_{\min}$  - Diâmetro mínimo da secção próxima da rotura (mm)  
 $d_{\max}$  - Diâmetro máximo da secção próxima da rotura (mm)

Os valores obtidos devem ser ajustados, quando necessário, segundo a norma EN 384 (CEN, 2004c) devido a desfasamentos entre o teor de água medido e a situação de referência de 12%. As correcções aplicadas são apresentadas nas equações seguintes.

$$E_0(MPa) = E_{0,w}(1 + 0,02(w - 12)) \quad (3.12)$$

$$f_{c,0}(MPa) = f_{c,0,w}(1 + 0,03(w - 12)) \quad (3.13)$$

$$\rho(kg / m^3) = \rho_w(1 - 0,005(w - 12)) \quad (3.14)$$

Onde:

- $w$  - Teor de água de ensaio (%)  
 $E_{0,w}$  - Módulo de elasticidade com o teor de água de ensaio  
 $f_{c,0,w}$  - Resistência à compressão com o teor de água de ensaio  
 $\rho_w$  - Massa volúmica com o teor de água de ensaio

Segundo a norma EN 384 (CEN, 2004c), é necessário aplicar uma correcção de  $1/k_1$ , equação (3.15), devido a desvios entre a geometria de ensaio preconizada na norma e a real (comprimento do vão, distância entre apoios e pontos de aplicação de carga). Embora a norma refira que essa correcção apenas deva ser aplicada à resistência à flexão, optou-se por aplicar a mesma correcção ao módulo de elasticidade porque, em estudos realizados por Zangiácomo (2007), foi demonstrado que o vão de ensaio possui influência no módulo de elasticidade.

$$k_1 = \left( \frac{l_e + 5a_{fe}}{l_a + 5a_f} \right)^{0,2} \quad (3.15)$$

Onde:

- $k_1$  - Correção devida a desvios entre distâncias no ensaio e as normalizadas
- $l_e$  - Distância entre apoios no ensaio (mm)
- $l_a$  - Distância normalizada entre apoios (mm)
- $a_{fe}$  - Distância entre pontos de carga no ensaio (mm)
- $a_f$  - Distância normalizada entre pontos de carga (mm)

A determinação do valor médio da massa volúmica e do módulo de elasticidade na direcção do fio e dos valores característicos da resistência à compressão e à flexão foram determinadas com base nas equações (3.16)-(3.19). A determinação dos valores médios e característicos das restantes propriedades mecânicas necessárias do ponto de vista engenharia, e enunciadas na introdução do presente capítulo, podem ser aferidas com base nas determinadas experimentalmente através das fórmulas empíricas, equações (3.20)-(3.26), presentes na EN 384 (CEN, 2004c). Os resultados para as amostras em estudo são apresentados na Tabela 3.9 e na Tabela 3.10.

$$E_{0,mean} = \frac{\sum E_i}{N} 1,3 - 2690 \quad (3.16)$$

$$f_{m,k} = f_{m,05} \times K_s \quad (3.17)$$

$$f_{c,0,k} = f_{c,0,05} \times K_s \quad (3.18)$$

$$\rho_k (kg / m^3) = \rho_{mean} - 1,65\sigma \quad (3.19)$$

Onde:

- $E_{0,mean}$  - Módulo de elasticidade médio da amostra
- $\sum E_i$  - Somatório do módulo de elasticidade dos toros da amostra
- $N$  - Número de toros da amostra
- $\rho_{mean}$  - Valor médio da massa volúmica dos toros da amostra
- $\rho_k$  - Valor característico da massa volúmica da amostra
- $f_{m,k}$  - Valor característico da resistência à flexão da amostra
- $f_{m,05}$  - Percentil de 5% da resistência à flexão da amostra
- $f_{c,0,k}$  - Valor característico da resistência à compressão da amostra
- $f_{c,0,05}$  - Percentil de 5% da resistência à compressão da amostra
- $K_s$  - Coeficiente de ajustamento relativo ao tamanho da amostra, neste estudo toma o valor de 0,77 para cada amostra individual ou de 0,83 se considerada a amostra conjunta

$$f_{t,0,k} = 0,6 f_{m,k} \quad (3.20)$$

$$f_{v,k} = \min \begin{cases} 3,8 \\ 0,2 f_{m,k}^{0,8} \end{cases} \quad (3.21)$$

$$f_{t,90,k} = \min \begin{cases} 0,6 \\ 0,0015\rho_k \end{cases} \quad (3.22)$$

$$f_{c,90,k} = 0,007\rho_k \quad (3.23)$$

$$E_{0,05} = 0,67E_{0,\text{mean}} \quad (3.24)$$

$$E_{90,\text{mean}} = E_{0,\text{mean}} / 30 \quad (3.25)$$

$$G_{\text{mean}} = E_{0,\text{mean}} / 16 \quad (3.26)$$

Tabela 3.9 – Propriedades mecânicas das amostras de toros, determinadas experimentalmente

Valor	$f_m$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	$E_{\text{local}}$ (GPa)	$E_{\text{global}}$ (GPa)	$w$ (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Amostra Centro						
Médio	67,7	37,7	14,4	14,6	12,0	534,4
Característico	33,8	23,2	9,7	9,8	-	449,1
Mínimo	34,0	26,1	8,8	9,0	11,5	425,5
Máximo	116,7	51,1	23,1	23,2	12,4	736,0
Desvio padrão	15,5	5,3	2,4	2,4	0,2	51,7
$N$	40	40	40	40	40	40
Amostra Norte						
Médio	71,0	37,7	12,8	13,1	12,3	523,2
Característico	37,3	22,7	8,6	8,8	-	440,2
Mínimo	45,8	28,4	7,8	8,0	11,6	421,0
Máximo	106,1	49,6	18,4	20,7	13,0	618,3
Desvio padrão	14,7	5,4	2,3	2,4	0,4	50,3
$N$	40	40	40	40	40	40
Amostra Conjunta						
Médio	69,3	37,7	13,6	13,9	12,1	528,8
Característico	38,6	24,6	9,1	9,3	-	444,6
Mínimo	34,0	26,1	7,8	8,0	11,5	421,0
Máximo	116,7	51,1	23,1	23,2	13,0	736,0
Desvio padrão	15,1	5,3	2,4	2,5	0,4	51,0
$N$	80	80	80	80	80	80

Tabela 3.10 – Propriedades mecânicas das amostras de toros, determinadas segundo a norma EN 384

Amostra	$E_{\text{local 90, mean}}$ (GPa)	$E_{\text{global 90 mean}}$ (GPa)	$G_{\text{local mean}}$ (GPa)	$G_{\text{global mean}}$ (GPa)	$f_{t,90}$ (MPa)	$f_{c,90}$ (MPa)	$f_{t,0}$ (MPa)	$f_v$ (MPa)
Centro	0,48	0,49	0,90	0,91	0,60	3,14	20,25	3,34
Norte	0,43	0,44	0,80	0,82	0,60	3,08	22,37	3,62
Conjunta	0,45	0,46	0,85	0,87	0,60	3,11	23,15	3,72



Considerando os valores apresentados na norma EN 338 (CEN, 2003c), e ressalvando-se o facto de a norma ter sido concebida para elementos de madeira de secção rectangular, conclui-se que as amostras correspondem a uma madeira classe C30, sendo a resistência à compressão o parâmetro que impede a atribuição da classe C35 à amostra conjunta.

### 3.7.2 Madeira limpa

O teor de água e a massa volúmica foram determinados de forma similar ao referido no ponto 3.7.1. Neste caso, o volume da peça é estimado pelo volume de um prisma com a altura, largura e comprimento iguais aos respectivos valores médios das peças de madeira (obtidos com base na média entre a dimensão máxima e mínima).

A determinação da resistência à flexão ( $f_m$ ) foi efectuada segundo a fórmula da equação (3.27), indicada na norma ISO 3133 (ISO, 1975). O cálculo da resistência à compressão ( $f_{c,0}$ ) foi realizado segundo a equação (3.28), como referido na norma NP 618 (IPQ, 1973b). A determinação do módulo de elasticidade não é referida nem na norma ISO 3133 (ISO, 1975) nem na norma similar NP 619 (IPQ, 1973c). Assim, a determinação desta propriedade mecânica foi efectuada de acordo com a equação (3.29), obtida da teoria da elasticidade, para um elemento simplesmente apoiado, submetido a carga concentrada ao centro.

$$f_m = \frac{3F_{\max} l_e}{2bh^2} \quad (3.27)$$

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{bh} \quad (3.28)$$

$$E_0 = \frac{l_e^3}{48I} \times \frac{\Delta F}{\Delta W_G} \quad (3.29)$$

Onde:

$b$  - Largura da peça de madeira (mm)

$h$  - Altura da peça de madeira (mm)

$\Delta F/\Delta W_G$  - Declive da recta força-deslocamento

Os valores obtidos foram ajustados segundo a norma EN 384 (CEN, 2004c), devido a desfazamentos entre o teor de água de ensaio e a situação de referência de 12%, seguindo o procedimento apresentado no ponto anterior. A determinação dos valores médios e característicos das amostras, e a determinação das restantes propriedades mecânicas seguiram as formulações indicadas na norma EN 384 (CEN, 2004c), já apresentadas. Os resultados para as amostras são apresentados na Tabela 3.11 e Tabela 3.12.

Considerando os valores apresentados na norma EN 338 (CEN, 2003c), ressalvando-se o facto de a norma ser aplicável a madeira estrutural com defeitos, conclui-se que as amostras correspondem a uma madeira da classe C22, sendo o módulo de elasticidade o parâmetro que impede a atribuição de classes até C40, onde o mínimo são 14GPa de valor médio.

Tabela 3.11 – Propriedades mecânicas das peças de madeira limpa, determinadas experimentalmente

	$f_m$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	$E_0$ (GPa)	$w$ (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Amostra Centro					
Valor médio	85,9	44,2	11,1	11,9	541,9
Valor característico	54,8	28,1	7,4	11,5	453,0
Mínimo	43,6	31,0	6,6	11,4	419,4
Máximo	109,6	57,1	14,8	12,8	663,7
Desvio padrão	13,6	6,0	1,7	0,3	53,9
$N$	27	27	27	27	27
Amostra Norte					
Valor médio	85,5	44,2	10,4	12,2	544,3
Valor característico	51,3	32,7	7,0	11,7	438,3
Mínimo	61,5	31,2	6,7	11,6	424,5
Máximo	120,9	57,8	15,2	13,1	684,7
Desvio padrão	13,4	6,9	2,2	0,4	64,3
$N$	30	30	30	30	30
Amostra Conjunta					
Valor médio	85,7	44,2	10,8	12,0	543,2
Valor característico	55,7	28,1	7,2	11,5	445,7
Mínimo	43,6	31,0	6,6	11,4	419,4
Máximo	120,9	57,8	15,2	13,1	684,7
Desvio padrão	13,4	6,4	2,0	0,4	59,1
$N$	57	57	57	57	57

Tabela 3.12 – Propriedades mecânicas das peças de madeira limpa, determinadas segundo a norma EN384

Amostra	$E_{90, \text{mean}}$ (GPa)	$G_{90 \text{ mean}}$ (GPa)	$f_{t,90}$ (MPa)	$f_{c,90}$ (MPa)	$f_{t,0}$ (MPa)	$f_v$ (MPa)
Centro	0,37	0,69	0,60	3,20	32,90	3,80
Norte	0,35	0,65	0,60	3,10	30,80	3,80
Conjunta	0,36	0,67	0,60	3,10	33,40	3,80

### 3.8 Análise de resultados

#### 3.8.1 Comparação entre amostras

Neste estudo procurou-se obter amostras representativas das zonas de maior incidência de Pinheiro bravo, tendo sido estudadas duas amostras, de 40 toros cada, representativas da zona Centro e da zona Norte de Portugal. A comparação entre as características mecânicas médias das amostras é apresentada na Tabela 3.13.

Verifica-se da Tabela 3.13 que as propriedades mecânicas são semelhantes, possuindo a amostra do Norte um ligeiro ascendente em termos de resistência à compressão e módulo de elasticidade pelo que, apesar de oriundos de zonas geográficas bastante dispares e distantes, os toros apresentam propriedades mecânicas similares.

Tabela 3.13 – Comparação entre as propriedades mecânicas médias das amostras de toros

	$f_m$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	$E_{local}$ (GPa)	$E_{global}$ (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)
Amostra Centro	67,7	37,7	14,4	14,6	534,4	12,0
Amostra Norte	71,0	37,7	12,8	13,1	523,2	12,3
Amostra conjunta	69,3	37,7	13,6	13,9	528,8	12,1

De notar que apesar de os módulos de elasticidade local e global serem semelhantes, este último apresenta valores superiores quando, segundo Vries (1998b), o módulo de elasticidade global deveria ser inferior em 7 a 8% ao módulo de elasticidade local, devido à contribuição das deformações por corte. Tal facto pode ser justificado pela geometria irregular do toro, em termos de secção transversal e linearidade, bem como pela possibilidade de maior incidência de defeitos na zona central do que no resto do toro.

A comparação entre as amostras de toros e das peças de madeira limpa deles obtidas permite analisar a influência que os defeitos possuem nas propriedades mecânicas. Desta forma, é apresentada na Tabela 3.14 as propriedades mecânicas das peças de madeira limpa (ML) e dos toros de onde são originárias. De referir que as médias apresentadas para os módulos de elasticidade não foram corrigidas segundo a equação (3.16), para melhor comparação entre as amostras. A diferença relativa entre as propriedades mecânicas dos toros e respectivas peças de madeira limpa é apresentada na Tabela 3.15.

Tabela 3.14 – Comparação entre as propriedades mecânicas dos toros e da respectiva madeira limpa

	$f_m$ (MPa)		$f_{c,0}$ (MPa)		$E_0$ (GPa)		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		
	Toro	ML	Toro	ML	Toros	ML	Toros	ML	
Média	66,7	85,7	37,1	44,2	12,1	12,3	10,3	522,6	538,8
Mínimo	34,0	43,6	26,1	31,0	7,8	8,0	6,6	421,0	413,8
Máximo	106,1	120,9	49,6	57,8	15,3	15,0	15,2	618,3	668,4
Desvio padrão	13,3	13,4	5,4	6,4	1,8	1,8	2,0	46,8	60,0
$N$	57	57	57	57	57	57	57	57	57

Tabela 3.15 – Diferença relativa entre as propriedades mecânicas dos toros e respectiva madeira limpa

	$f_m$ (%)	$f_{c,0}$ (%)	$E_0$ (%)	$\rho$ (%)	
Média	31,7	20,2	-14,2	-15,5	3,1
Mínimo	-13,2	-9,9	-43,1	-44,1	-7,5
Máximo	153,1	60,3	20,1	23,3	17,7
Desvio Padrão	26,5	16,0	14,2	15,0	6,7
$N$	57	57	57	57	57

$P$  – Propriedade mecânica

Verifica-se que, em termos de resistência à flexão e à compressão, as peças de madeira limpa apresentam valores médios 20 a 30% superiores aos apresentados pelos toros de onde foram

retiradas, o que leva a concluir que os defeitos, como a presença de nós, apresentam uma grande influência nestas propriedades mecânicas.

Relativamente ao módulo de elasticidade a situação é diferente. Verifica-se que o módulo de elasticidade dos toros é cerca de 14 a 15% superior ao obtido nas respectivas peças de madeira limpa. Assim, a presença de defeitos no toro não influencia significativamente esta propriedade, tal como referido por Hanhijarvi *et al.* (2005) que afirma que o módulo de elasticidade é condicionado sobretudo pela madeira limpa e que a resistência é condicionada pelos defeitos. O facto de a madeira limpa apresentar valores de módulo de elasticidade inferiores aos dos respectivos toros pode estar relacionado com o facto de o toro ser uma estrutura natural bem organizada e a obtenção da madeira limpa implicar o corte das fibras e consequente perturbação dessa estrutura. Estudos com madeira limpa de Martins (2010) e Zangiácomo (2007) apresentam igualmente valores de módulo de elasticidade em peças estruturais superiores aos obtidos nas peças de madeira limpa delas retiradas.

Em termos de massa volúmica, esta propriedade nas peças de madeira limpa foi em média 3% superior à aferida nos toros que lhes deram origem. Tal deve-se a que os toros sejam constituídos maioritariamente por lenho juvenil, tal como foi referido no ponto 3.4.2, caracterizado por baixa massa volúmica. Assim, é possível que na periferia da secção dos toros possa existir crescimento de lenho adulto, que possui maior massa volúmica (tal como ilustrado anteriormente na Figura 3.4), traduzindo-se em peças de madeira limpa com massa volúmica superior à do toro de onde são oriundas.

### 3.8.2 Enquadramento das propriedades mecânicas

Na Tabela 3.16 é apresentada a comparação entre as propriedades mecânicas determinadas neste estudo, para a amostra conjunta de toros e para a amostra conjunta de madeira limpa, e as mesmas propriedades mecânicas da madeira serrada de Pinheiro bravo (IPQ, 1995). A comparação efectuada deverá ser observada tendo em atenção que existe uma enorme diferença de universo de amostragem entre as amostras. Enquanto a madeira das classes EE e E reflecte as características das classes de qualidade relativas à produção nacional de madeira de secção rectangular, as amostras deste estudo somente abrangem duas zonas de crescimento.

Tabela 3.16 – Comparação entre as propriedades mecânicas das amostras e das de madeira serrada de Pinheiro bravo para estruturas

	$f_{m,k}$ (MPa)	$f_{c,0,k}$ (MPa)	$E_{0,mean}$ (GPa)	$E_{0,05}$ (GPa)	$\rho_{mean}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_k$ (Kg/m <sup>3</sup> )
<b>Madeira serrada (Classe EE)</b>	35	24,7	14	9,38	610	490
<b>Madeira serrada (Classe E)</b>	18	18	12	8	580	460
<b>Amostra de toros</b>	38,6	24,6	13,6	9,1	528,8	444,6
<b>Amostra de madeira limpa</b>	55,7	28,1	10,8	7,2	543,2	445,7

Constata-se que em termos de resistência e módulo de elasticidade, a madeira de secção circular de Pinheiro bravo é semelhante à madeira serrada da classe EE. No que respeita à amostra de madeira limpa, esta apresenta valores característicos de resistência à flexão bastante superiores à madeira serrada, sendo ligeiramente superior em termos de resistência à compressão e inferior no que toca ao módulo de elasticidade.

A massa volúmica da madeira de secção circular é inferior à da madeira serrada, facto justificado pela forte presença de lenho juvenil, tal como referido anteriormente, caracterizado por uma massa volúmica inferior ao lenho adulto, consequência da idade e do diâmetro das árvores abatidas.

De modo a enquadrar as propriedades da madeira de secção circular de Pinheiro bravo como material de construção, é importante comparar o valor das propriedades mecânicas com o obtido para outras espécies em outros estudos. Tendo em conta os valores apresentados anteriormente na Tabela 3.1, do ponto 3.2 do presente trabalho, a comparação é apresentada sob forma gráfica, para melhor percepção, da Figura 3.38 à Figura 3.41. Para maior facilidade de análise, refere-se que a sequência de apresentação das barras, da esquerda para a direita, segue a sequência descendente, da esquerda para a direita, das linhas de legenda de ambas as colunas.

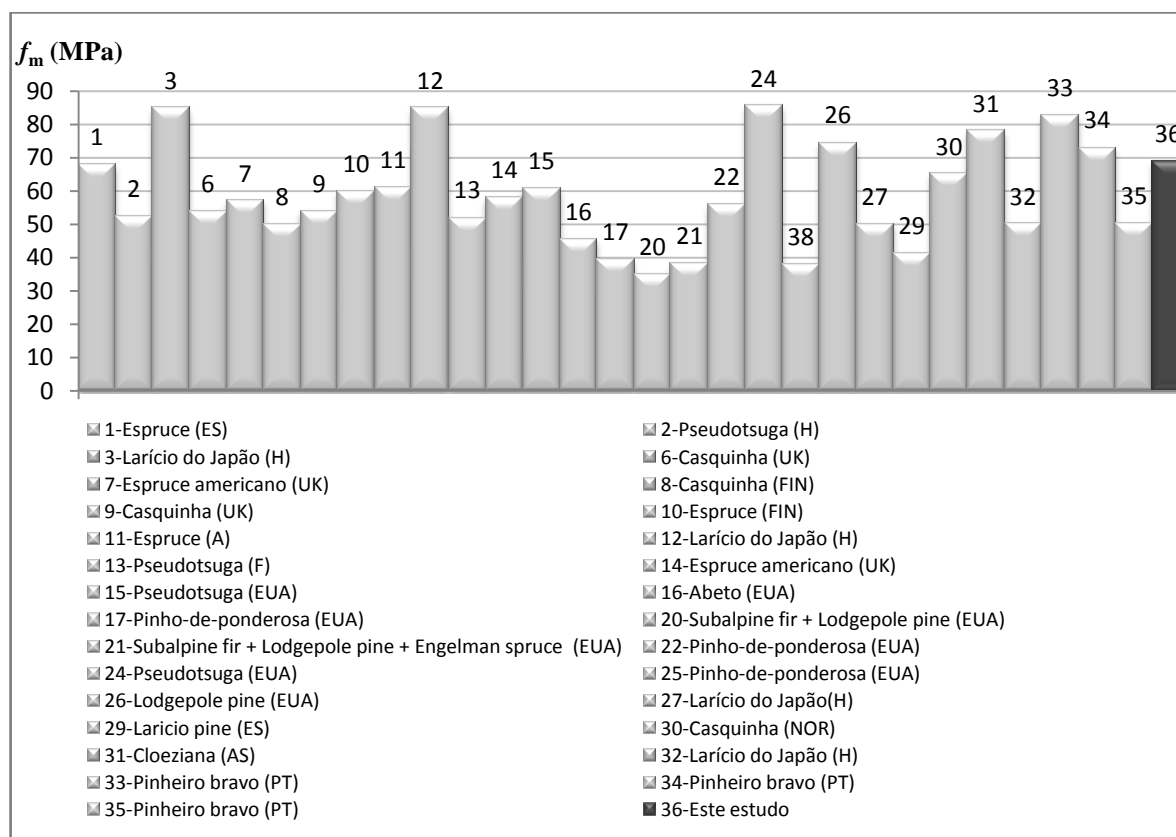


Figura 3.38 – Comparação da resistência à flexão de várias espécies

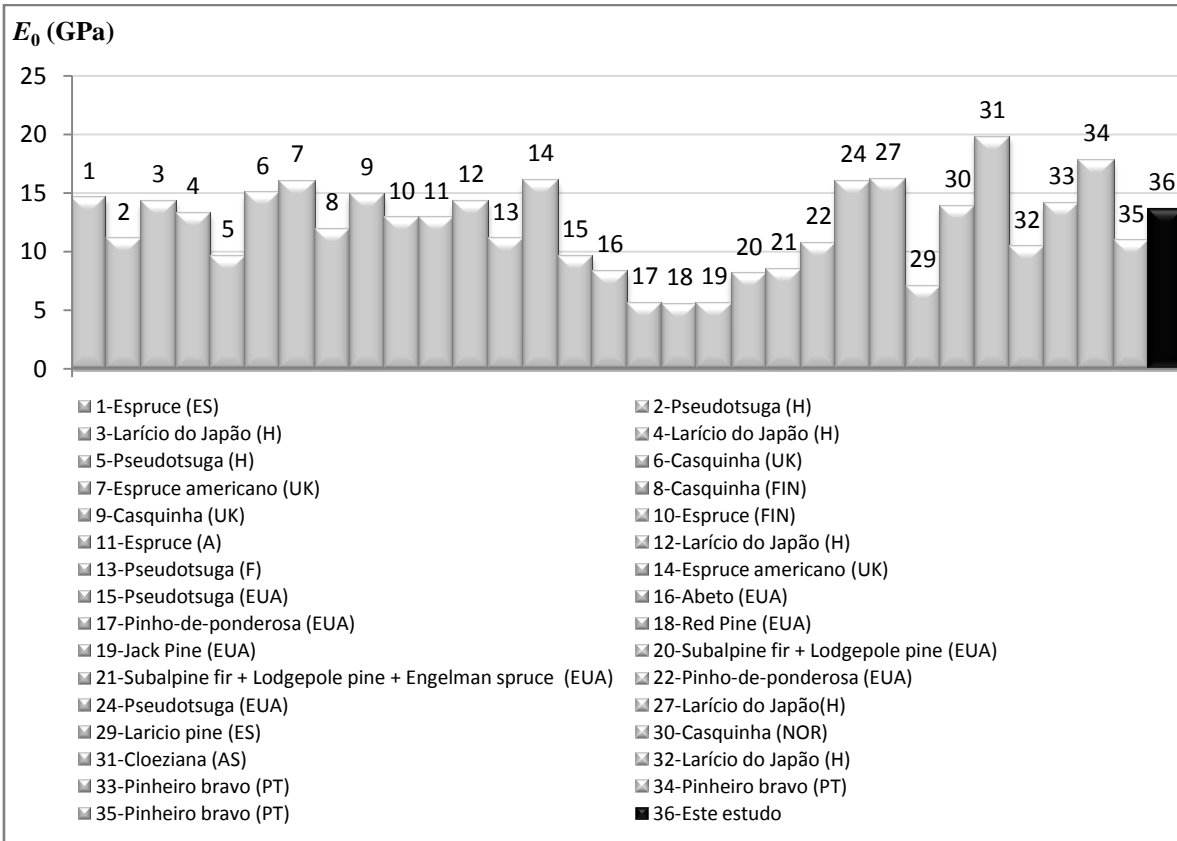


Figura 3.39 – Comparação do módulo de elasticidade de várias espécies de madeira de secção circular

Da Figura 3.38 verifica-se que a madeira circular de Pinheiro bravo deste estudo (*ultima coluna do lado direito*) apresenta propriedades bastante boas, possuindo uma resistência à flexão superior à obtida em cerca de 76% dos estudos, e semelhante à obtida em anterior estudo para esta espécie (Morgado, 2008). Em termos de módulo de elasticidade (Figura 3.39) a situação é semelhante, embora as diferenças sejam menos significativas.

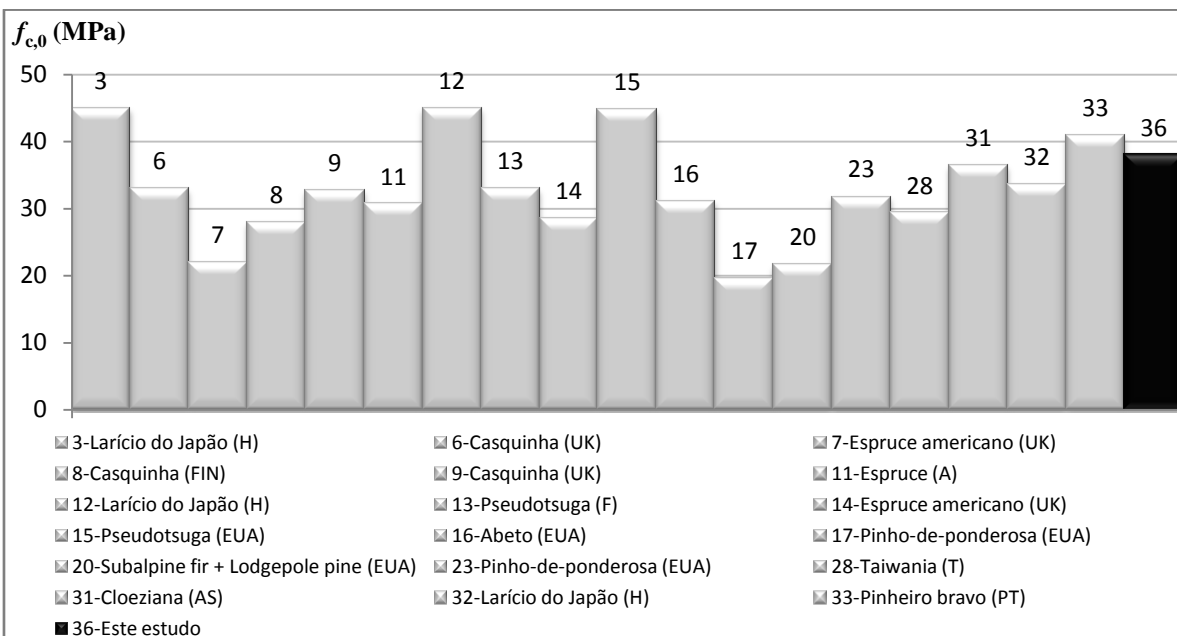


Figura 3.40 – Comparação da resistência à compressão de várias espécies de madeira de secção circular

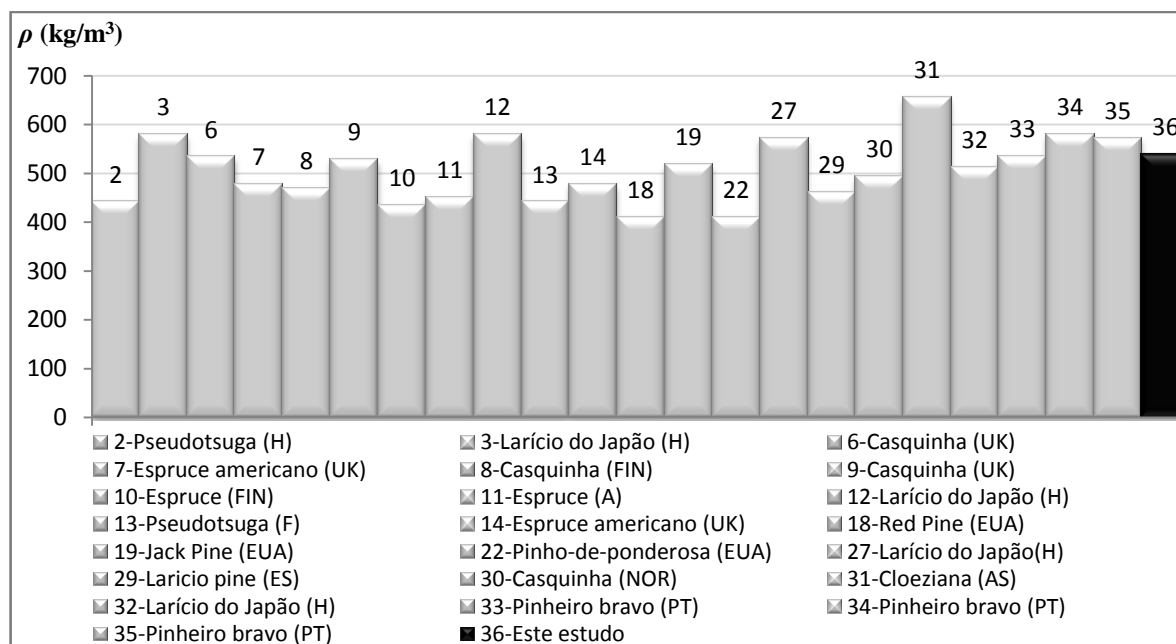


Figura 3.41 – Comparação da massa volúmica de várias espécies de madeira de secção circular

A resistência à compressão (Figura 3.40) obtida neste estudo é apenas 15% inferior à do Larício do Japão e da Pseudotsuga, estando ao mesmo nível da obtida em estudo anterior para esta espécie (Morgado, 2008). Em termos de massa volúmica (Figura 3.41), o valor obtido é superior a grande parte (60%) das espécies apresentadas, idêntico ao obtido em estudo anterior (Morgado, 2008) e cerca de 18% inferior ao do Eucalipto cloeziana que apresenta o valor mais elevado do comparativo.

### 3.8.3 Efeito do torneamento

O processamento de toros, nomeadamente o torneamento, permite a eliminação de defeitos geométricos como a curvatura, o adelgaçamento e a ovalidade, obtendo-se elementos cilíndricos com uma componente estética e de aplicabilidade superiores ao material original. No entanto, este tipo de processamento exige a remoção de parte do material mais exterior da secção transversal, o que perturba a estrutura natural implementada.

Para avaliação do efeito do torneamento, uma amostra de 40 toros, dos quais 30 são procedente da amostra do Centro e 10 da amostra do Norte, foram sujeitos a ensaio de flexão apenas para a determinação do seu módulo de elasticidade. A direcção e sentido de aplicação de carga foi marcada nos toros. Posteriormente, os toros foram torneados e sujeitos novamente a ensaio de flexão, assegurando a mesma direcção e sentido de aplicação de carga que no ensaio flexão anterior. Isto é importante porque evita que, por exemplo, um nó que se situava em zona de compressão, no ensaio anterior, se passe a situar em zona de tracção no novo ensaio de flexão. As propriedades mecânicas da amostra de toros torneados, obtidas de acordo com o apresentado no ponto 3.7.1 do presente trabalho, são apresentadas na Tabela 3.17.

Tabela 3.17 – Propriedades mecânicas da amostra de toros torneados

	$f_m$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	$E_{local}$ (GPa)	$E_{global}$ (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)
Valor médio	45,3	33,1	13,1	12,7	492,5	14,6
Valor característico	23,6	20,0	8,8	8,5	402,9	-
Mínimo	19,3	20,2	6,7	6,8	355,5	12,3
Máximo	68,8	52,7	17,1	17,2	653,6	16,1
Desvio padrão	12,0	6,8	2,4	2,4	54,3	0,8
$N$	40	40	40	40	40	40

O teor de água dos toros antes do torneamento foi estimado com um humidímetro de agulhas. Como os toros antes do processamento não foram ensaiados à rotura, não foi possível obter a massa volúmica através de uma rodela próxima da rotura, pelo que se optou por estimar a massa volúmica do toro ( $\rho_{toro}$ ) através do peso e do volume estimado deste. A comparação entre as propriedades mecânicas e algumas características visuais da amostra de toros, antes e após torneamento, é apresentada na Tabela 3.18 e na Tabela 3.19.

Tabela 3.18 – Comparação de características visuais da amostra de toros antes (NT) e após torneamento (T)

	Lenho juvenil (%)			Taxa de crescimento (mm)			$d_{nom}$ (mm)		
	NT	T	T-NT (%)	NT	T	T-NT (%)	NT	T	T-NT (%)
Valor médio	61,4	78,2	37,4	4,7	5,2	11,7	133,8	100,0	-25,3
Mínimo	5,1	8,7	0	7,1	7,9	0,3	113,0	78,0	-36,0
Máximo	100	100	94,5	2,6	2,8	34,6	154,4	120,0	-11,2
Desvio padrão	31,9	34,4	28,4	1,1	1,3	8,2	10,3	11,3	6,3
$N$	40	40	40	40	40	40	40	40	40

Tabela 3.19 – Comparação das propriedades mecânicas da amostra toros antes (NT) e após torneamento (T)

	$E_{local}$ (GPa)			$E_{global}$ (GPa)			$\rho_{toro}$ (kg/m <sup>3</sup> )		
	NT	T	T-NT (%)	NT	T	T-NT (%)	NT	T	T-NT (%)
Valor médio	13,0	13,1	2,5	12,8	12,7	-0,0	516,2	498,4	-3,5
Mínimo	6,9	6,7	-32,7	6,9	6,8	-28,1	407,2	371,4	-18,7
Máximo	19,8	17,1	60,0	19,1	17,2	47,1	687,6	683,0	7,6
Desvio padrão	2,5	2,4	19,8	2,5	2,4	15,1	49,6	58,8	5,4
$N$	40	40	40	40	40	40	40	40	40

Da Tabela 3.18 verifica-se que no processo de torneamento existiu uma redução média do diâmetro nominal de cerca de 25%, o que levou ao aumento médio da taxa de crescimento em 11,7%, do lenho juvenil em 37,4% e a uma diminuição da massa volúmica do toro de 3,5%. Isto deve-se à remoção do lenho maduro caracterizado por maior massa volúmica e maior densidade de anéis de crescimento.



Em termos de propriedades mecânicas, verifica-se que os módulos de elasticidade médios da amostra após torneamento são semelhantes aos obtidos antes do torneamento. De referir que, em média, o módulo de elasticidade local aumentou, em média, 2,5% após torneamento, não existindo, em média, variação no módulo de elasticidade global. No entanto este resultado é bastante influenciado pelo módulo de elasticidade local de 3 toros e pelo global de 1 toro, onde se verificou um aumento entre 34,9 e os 60%. Como este aumento no módulo de elasticidade destoou dos restantes resultados é possível que resulte de erros de medição na determinação dos módulos de elasticidade antes ou após o torneamento. Se ignorados esses resultados, verifica-se uma redução média no módulo de elasticidade local de 1,0% e de 1,2% no módulo de elasticidade global.

Na impossibilidade de se determinar a resistência antes do torneamento, esta é inferida com base na resistência dos toros não torneados (Tabela 3.20). Recordar-se que a amostra de toros torneados é composta por 30 toros oriundos da amostra do Centro e de 10 toros oriundos da amostra do Norte. Assim, da Tabela 3.20 admite-se uma redução de cerca de 37% na resistência à flexão dos toros torneados da amostra do Norte e de 26% na amostra do Centro sendo, em termos conjuntos, a redução média de cerca de 35%. Relativamente à resistência à compressão, considerando as amostras conjuntas, a redução foi de cerca de 12%. A massa volúmica da amostra de toros torneados é cerca de 7% inferior à da amostra conjunta de toros não torneados. Em termos de módulo de elasticidade, os toros torneados da amostra do Norte apresentam um módulo de elasticidade inferior, em 12% na variante local e 16% na variante global, ao da amostra de toros não torneados. No entanto, a amostra de toros torneados da amostra do Norte apresenta um módulo de elasticidade superior ao da amostra de toros da mesma origem não torneados. O facto de existir um aumento do módulo de elasticidade da amostra de toros torneados do Norte relativamente à variante não torneada pode ser justificada por ser uma amostra relativamente pequena, 10 toros, e por ser nesta amostra que se registaram os referidos aumentos abruptos no módulo de elasticidade.

Tabela 3.20 – Comparação entre o valor médio das propriedades mecânicas da amostra de toros torneados e não torneados

		$f_m$	$f_{c,0}$	$E_{local}$	$E_{global}$	$\rho$	$N$
		(MPa)	(MPa)	(GPa)	(GPa)	(kg/m <sup>3</sup> )	
Toros torneados	Amostra Centro	43,0	32,4	12,7	12,3	491,6	30
	Amostra Norte	52,5	35,5	14,4	14,0	492,9	10
	Amostra Conjunta	45,3	33,1	13,1	12,7	492,5	40
Toros não torneados	Amostra Centro	67,7	37,7	14,4	14,6	534,4	40
	Amostra Norte	71,0	37,7	12,8	13,1	523,2	40
	Amostra conjunta	69,3	37,7	13,9	12,1	528,8	80

A redução, admitida nesta última análise, nas propriedades mecânicas devida ao torneamento vem de encontro ao obtido em bibliografia. Darby (Huybers, 1996) refere reduções nas propriedades mecânicas devido a torneamento de 10 a 15%. Green *et al.* (2005) apresentam um estudo sobre o efeito do torneamento com toros de Pseudotsuga e Pinho-de-ponderosa. Os

autores verificaram que a resistência à flexão de toros torneados de *Pseudotsuga* com diâmetros entre 76,2 e 152,4mm sofreu uma redução de 8%, enquanto que o módulo de elasticidade sofreu uma redução de 15%. No caso dos toros de Pinho-de-ponderosa, com diâmetros semelhantes, a resistência à flexão sofreu um decréscimo de 12% e o módulo de elasticidade sofreu uma redução de 33%. Larson *et al.* (2004a) obtiveram de ensaios de flexão em 99 toros de Pinho-de-ponderosa uma redução na resistência à flexão de 20,3% e de 10% no módulo de elasticidade nos toros torneados, comparativamente aos toros não processados. No entanto, Larson *et al.* (2004b) em 250 ensaios de compressão em toros de Pinho-de-ponderosa verificaram que a resistência dos toros torneados e não torneados não evidenciava qualquer efeito do torneamento na resistência, sendo que o que mais influenciou a resistência à compressão foi a presença de nós.

#### 3.8.4 Relações estatísticas entre características

A previsão das propriedades mecânicas é fundamental no processo de selecção dos toros para fins estruturais. Se for conseguida uma relação satisfatória entre a resistência e outras características visuais, será possível estimar a resistência sem necessidade de ensaios destrutivos, permitindo economias importantes. Assim, estabelecer relações estatísticas entre as propriedades mecânicas e as características visuais é muito importante, uma vez que a caracterização visual de um toro é relativamente rápida quando comparada com o processo de determinação das propriedades mecânicas.

Os coeficientes de correlação entre todas as propriedades, físicas e mecânicas, e as características visuais, determinadas para os toros de cada uma das amostras, são apresentados na Tabela 3.21 e na Tabela 3.22. A característica dos nós é tida em conta como sendo o diâmetro do maior nó do toro, em valor absoluto e em percentagem do menor diâmetro do toro. Da análise dos resultados verifica-se que existem algumas diferenças nas relações estatísticas das duas amostras. A resistência à flexão apresenta, na amostra do Centro, melhor correlação com o módulo de elasticidade local, enquanto na amostra do Norte a melhor correlação é com a percentagem de lenho juvenil. O coeficiente de correlação entre a resistência à flexão e o módulo de elasticidade local obtido para a amostra do Centro,  $r=0,81$ , é superior ao obtido na amostra do Norte ( $r=0,69$ ). Em estudo semelhante com toros do Centro de Portugal (Morgado, 2008) foi obtido um coeficiente de correlação de  $r=0,75$ .

Da Tabela 3.21 e Tabela 3.22 é perceptível uma outra diferença significativa que ocorre com a correlação da resistência à flexão com características geométricas, nomeadamente com o adelgaçamento e diâmetro nominal. Enquanto que na amostra do centro a correlação da resistência à flexão com o diâmetro nominal é praticamente inexistente ( $r=-0,03$ ), na amostra do Norte foi obtido um coeficiente de  $-0,51$ , significativamente superior. No caso do adelgaçamento a situação é semelhante, obtendo-se um coeficiente de correlação de  $-0,23$  para a amostra do Centro e de  $-0,53$  para a amostra do Norte. Os coeficientes de correlação obtidos para a amostra do Centro são semelhantes aos obtidos em estudo anterior para a mesma zona de estudo (Morgado, 2008).

Tabela 3.21 – Correlações entre propriedades da amostra de toros do Norte de Portugal

% de Lenho juvenil	Taxa de crescimento	Nós	Nós	Ovalidade	Adelgaçamento	Desvio do fio	$d_{nom}$	$E_{global}$	$E_{local}$	$f_m$	$f_{c,0}$	$w$	$\rho$
1,00	0,72	0,48	0,48	-0,17	0,39	0,10	0,26	-0,52	-0,61	-0,77	-0,63	-0,24	-0,82
	1,00	0,37	0,38	-0,07	0,26	0,16	0,33	-0,61	-0,67	-0,71	-0,52	-0,07	-0,61
		1,00	1,00	-0,21	0,43	0,10	0,20	-0,40	-0,45	-0,54	-0,50	-0,28	-0,49
			1,00	-0,21	0,40	0,09	0,23	-0,40	-0,45	-0,54	-0,50	-0,26	-0,49
				1,00	-0,02	-0,22	-0,39	0,10	0,10	0,14	0,11	0,19	0,20
					1,00	-0,10	0,46	-0,26	-0,28	-0,53	-0,40	-0,28	-0,42
						1,00	-0,03	-0,30	-0,23	-0,15	-0,19	-0,21	0,00
							1,00	-0,19	-0,20	-0,51	-0,25	-0,10	-0,41
								1,00	0,95	0,62	0,35	0,08	0,51
									1,00	0,69	0,37	0,09	0,59
										1,00	0,58	0,09	0,77
											1,00	0,24	0,70
												1,00	0,21
													-0,82
													$\rho$

Tabela 3.22 – Correlações entre propriedades da amostra de toros do Centro de Portugal

% de Lenho juvenil	Taxa de crescimento	Nós	Nós	Ovalidade	Adelgaçamento	Desvio do fio	$d_{nom}$	$E_{global}$	$E_{local}$	$f_m$	$f_{c,0}$	$w$	$\rho$
1,00	0,85	0,48	0,46	0,00	0,13	0,37	-0,09	-0,49	-0,56	-0,64	-0,46	-0,31	-0,58
	1,00	0,49	0,48	0,08	0,08	0,30	0,08	-0,60	-0,64	-0,69	-0,50	-0,19	-0,58
		1,00	0,98	0,01	0,33	0,28	0,20	-0,48	-0,51	-0,66	-0,43	-0,05	-0,57
			1,00	-0,06	0,33	0,25	0,36	-0,49	-0,52	-0,66	-0,48	-0,07	-0,59
				1,00	0,02	-0,04	-0,32	-0,04	-0,01	-0,01	-0,07	0,14	0,05
					1,00	0,28	0,45	-0,30	-0,29	-0,23	-0,20	-0,19	-0,06
						1,00	0,05	-0,35	-0,41	-0,38	0,02	0,13	-0,15
							1,00	-0,17	-0,12	-0,03	-0,15	-0,11	-0,03
								1,00	0,97	0,78	0,58	0,12	0,77
									1,00	0,81	0,58	0,12	0,80
										1,00	0,53	0,21	0,74
											1,00	0,19	0,64
												1,00	0,14
													1,00

As amostras apresentam similares coeficientes de correlação entre a resistência à flexão e a massa volúmica ( $r=0,74$  e  $r=0,77$ ). O referido é igualmente válido para a resistência à compressão ( $r=0,64$  e  $r=0,70$ ). No entanto, os coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica obtidos na amostra do Centro ( $r=0,77$  a  $r=0,80$ ) são superiores aos da amostra do Norte ( $r=0,51$  a  $r=0,59$ ). Em estudo semelhante com toros do Centro de Portugal (Morgado, 2008) foi obtido um coeficiente de correlação de  $r=0,60$  entre o módulo de elasticidade local e a massa volúmica.

De entre as características visuais, verificou-se que a melhor correlação com a resistência à flexão foi obtida com a taxa de crescimento ( $r=0,69$ ), no caso da amostra do Centro, e com a percentagem de lenho juvenil ( $r=0,77$ ), no caso da amostra do Norte. O diâmetro do maior nó, sem diferença assinalável em ser considerado em valor absoluto ou em percentagem do menor diâmetro do toro, apresenta-se como sendo a seguinte característica visual com melhor correlação com a resistência à flexão ( $r=0,54$  a  $r=0,66$ ). O referido é válido para a resistência à compressão, mas com coeficientes de correlação menores. A ovalidade foi a característica visual com menor correlação com a resistência, sendo esta praticamente desprezável, como já tinha sido constatado em estudo anterior (Morgado, 2008). Em termos de módulo de elasticidade, a situação é semelhante, sendo a taxa de crescimento nas duas amostras a característica visual com melhor correlação ( $r=0,60$  a  $r=0,67$ ) com esta propriedade mecânica.

A resistência à compressão possui um coeficiente de correlação de 0,53 a 0,55 com a resistência à flexão, existindo, portanto uma correlação razoável entre estas duas propriedades. A norma EN 384 (CEN, 2004c) apresenta uma fórmula empírica, equação (3.30), para a determinação da resistência à compressão em função da resistência à flexão. Esta expressão é apenas válida para madeira serrada, pelo que será avaliada a sua aplicabilidade a madeira de secção circular. Assim, no gráfico da Figura 3.42 são apresentados os pares de valores da resistência à compressão e à flexão experimentais e os obtidos pela equação (3.30). Verifica-se que os valores obtidos segundo a norma EN 384 (CEN, 2004c) são 10% inferiores, em média, aos experimentais. Assim, a aplicação da expressão permite a obtenção de valores conservadores de resistência à compressão, podendo ser usada na impossibilidade de obtenção de valores experimentais.

$$f_{c,0} = 5f_m^{0,45} \quad (3.30)$$

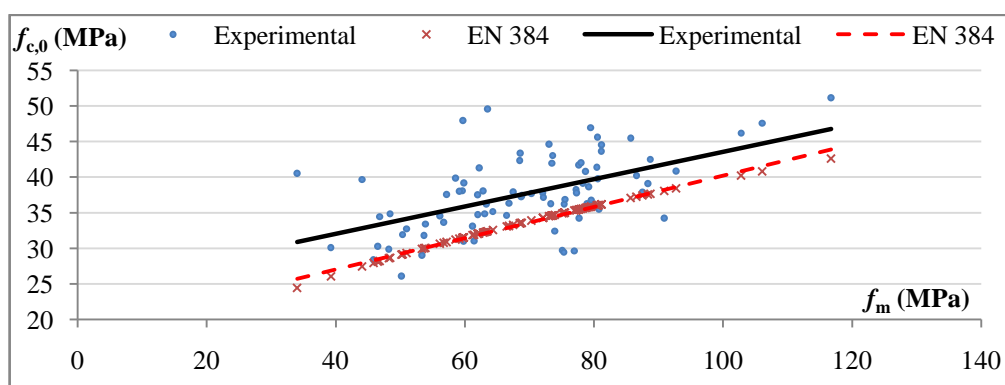


Figura 3.42 – Relação entre  $f_{c,0}$  e  $f_m$

Para finalizar a análise, é de referir que as melhores correlações nos toros da amostra do Centro foram obtidas entre o módulo de elasticidade local e global ( $r=0,97$ ), entre a taxa de crescimento e a percentagem de lenho juvenil ( $r=0,85$ ) e entre o módulo de elasticidade local e a resistência à flexão ( $r=0,81$ ). No caso da amostra de toros do Norte de Portugal, as melhores correlações foram obtidas entre o módulo de elasticidade local e global ( $r=0,95$ ), tal como na amostra do Centro, entre a percentagem de lenho juvenil e a massa volúmica ( $r=0,82$ ) e entre a massa volúmica e a resistência à flexão ( $r=0,77$ ).

Para melhor correlacionar o módulo de elasticidade, que foi dos parâmetros com melhor correlação com a resistência, especialmente nos toros da amostra do Centro, foram considerados múltiplos parâmetros através de uma regressão linear múltipla (Tabela 3.23). Os parâmetros considerados foram os que individualmente apresentaram melhor correlação com a resistência. Nesta análise, como seria de esperar, foi possível obter correlações superiores às apresentadas anteriormente.

Tabela 3.23 – Previsão da resistência das amostras de toros usando uma regressão linear múltipla

Modelo	Amostra Centro		Amostra Norte		Parâmetros do modelo							
	R		R		$E_{local}$	$E_{global}$	Desvio do fio	Adelgaçamento	Nós	Massa volúmica	Taxa de crescimento	Lenho juvenil
	$f_m$	$f_{c,0}$	$f_m$	$f_{c,0}$								
1	0,81	0,58	0,69	0,37	x							
2	0,81	0,64	0,69	0,38	x		x					
3	0,81	0,58	0,77	0,48	x			x				
4	<b>0,86</b>	0,60	0,74	0,53	x				x			
5	0,83	<b>0,65</b>	<b>0,82</b>	<b>0,71</b>	x					x		
6	0,84	0,60	0,77	0,52	x						x	
7	0,84	0,60	0,82	0,63	x							x
8	<b>0,88</b>	<b>0,72</b>	<b>0,87</b>	<b>0,79</b>	x		x	x	x	x	x	x
9	0,78	0,58	0,62	0,35		x						
10	0,79	0,64	0,62	0,36		x	x					
11	0,78	0,58	0,72	0,47		x		x				
12	<b>0,85</b>	0,60	0,69	0,53		x			x			
13	0,81	<b>0,65</b>	<b>0,81</b>	<b>0,70</b>		x				x		
14	0,83	0,60	0,75	0,52		x					x	
15	0,84	0,60	0,81	0,63		x						x
16	<b>0,88</b>	<b>0,72</b>	<b>0,87</b>	<b>0,77</b>		x	x	x	x	x	x	x

Da análise da Tabela 3.23 verifica-se que o módulo de elasticidade, quer local quer global, e o diâmetro dos nós, em percentagem do diâmetro mínimo do toro, são o par de características que possuem a melhor correlação ( $r=0,85$  a  $r=0,86$ ) com a resistência à flexão. Quando se consideram todos os parâmetros, existem melhorias na previsão da resistência ( $r=0,88$ ). Da análise destes resultados verifica-se que o aumento no coeficiente de correlação obtido ao considerar mais que um parâmetro não justifica o cálculo de todos os parâmetros, uma vez que só o módulo de elasticidade local permite obter um coeficiente de correlação de 0,81. O

referido para a resistência à flexão é válido para a resistência à compressão, no entanto com coeficientes de correlação menores.

Analisando os resultados referente à amostra de toros do Norte, constata-se que o módulo de elasticidade, quer local quer global, e a massa volúmica possuem a melhor correlação ( $r=0,82$ ) com a resistência à flexão, melhorando significativamente a obtida considerando somente o módulo de elasticidade ( $r=0,69$ ) e sendo semelhante à obtida em estudo anterior (Morgado, 2008). Quando se consideram todos os parâmetros existem melhorias na previsão da resistência ( $r=0,87$ ), mas, mais uma vez, o aumento no coeficiente de correlação não justifica o cálculo de todos os parâmetros.

O referido anteriormente para a resistência à flexão é válido para a resistência à compressão, frisando-se que, neste caso, existe uma melhoria considerável ao considerar o módulo de elasticidade e a massa volúmica, comparativamente a usar somente o módulo de elasticidade. Isto deveu-se ao coeficiente de correlação entre a resistência à compressão e a massa volúmica ( $r=0,70$ ) que foi bastante superior ao obtido com o módulo de elasticidade. Neste caso, para previsão da resistência à compressão não se justifica a determinação do módulo de elasticidade.

De modo a aferir a influência dos defeitos da madeira nas relações apresentadas, foi efectuada uma análise, semelhante à descrita anteriormente, em termos de correlações entre as propriedades das peças de madeira limpa. Adicionalmente, é analisada a correlação entre as propriedades das peças de madeira e as dos toros estruturais que lhe deram origem. Os coeficientes de correlação são apresentados na Tabela 3.24.

Tabela 3.24 – Correlações entre propriedades da madeira limpa e entre as propriedades dos toros e da respectiva madeira limpa

		Madeira limpa							
		Amostra Centro $N=27$				Amostra Norte $N=30$			
		$\rho$	$f_{c,0}$	$f_m$	$E_0$	$\rho$	$f_{c,0}$	$f_m$	$E_0$
Madeira Estrutural	$\rho$	<b>0,83</b>	0,73	0,71	0,43	<b>0,79</b>	0,63	0,62	0,60
	$f_{c,0}$	0,65	0,63	0,58	0,51	0,50	0,46	0,58	0,55
	$f_{m,0}$	0,74	0,68	0,80	0,61	0,50	0,56	0,41	0,47
	$E_{local}$	0,48	0,50	0,53	0,53	0,52	0,59	0,54	0,63
	$E_{global}$	0,34	0,38	0,44	0,50	0,38	0,46	0,46	0,51
	Desvio do fio	-0,02	-0,12	-0,09	-0,07	-0,15	-0,17	-0,20	-0,37
	Taxa de crescimento	-0,68	-0,69	-0,65	-0,61	-0,60	-0,59	-0,53	-0,67
	% de Lenho Juvenil	-0,73	-0,71	-0,66	-0,57	-0,69	-0,63	-0,52	-0,67
Madeira limpa	$\rho$	1,00	<b>0,93</b>	0,83	0,49	1,00	0,86	0,79	0,75
	$f_{c,0}$		1,00	0,79	0,61		1,00	0,81	0,77
	$f_{m,0}$			1,00	0,71			1,00	<b>0,87</b>
	$E$				1,00				1,00

Em termos de correlação entre as propriedades das peças de madeira limpa, constata-se que nas peças de madeira limpa da amostra do Centro a melhor correlação obtida foi entre o módulo de elasticidade e a resistência à flexão ( $r=0,87$ ). No caso da amostra do Norte, a melhor correlação foi entre a massa volúmica e a resistência à compressão ( $r=0,93$ ). Tal como se tinha verificado em análise similar com as peças de dimensão estrutural, as peças de madeira limpa da amostra do Norte apresentam correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à flexão ( $r=0,71$ ) inferior à obtida nas peças da amostra do Centro ( $r=0,87$ ). Da análise dos dados verifica-se que no caso da amostra do Centro o módulo de elasticidade da madeira limpa possui boas correlações com as restantes propriedades, sendo superiores às obtidas na amostra do Norte.

Em termos de correlação entre as propriedades das peças de madeira limpa e as propriedades dos toros que lhes deram origem, constata-se que em ambas as amostras existe uma correlação elevada entre a massa volúmica dos toros e a da respectiva madeira limpa ( $r=0,79$  a  $0,83$ ). Uma grande diferença entre coeficientes de correlação foi verificada entre a resistência à flexão da madeira limpa e a dos respectivos toros, tomando o coeficiente de correlação o valor de  $0,41$  na amostra do Centro e o valor de  $0,80$  na amostra do Norte. Isto poderia levar a concluir que existiu maior incidência de defeitos nos toros da amostra do Centro, no entanto, na caracterização visual efectuada no ponto 3.4 verificou-se que as amostras apresentavam características visuais semelhantes. A correlação entre o módulo de elasticidade das peças de madeira limpa e o dos respectivos toros ( $r=0,50$  a  $r=0,63$ ) esperava-se mais alta por se admitir que o módulo de elasticidade não é afectado por defeitos locais, contrariamente ao que acontece com a resistência à flexão (Hanhijarvi *et al.*, 2005). Em estudo similar com postes de Pinheiro bravo saturados (Martins, 2010), foi obtido um coeficiente de correlação superior,  $r=0,77$ , entre o módulo de elasticidade da madeira limpa e respectivos postes.

### 3.9 Conclusões

Neste capítulo procedeu-se à determinação das propriedades mecânicas de duas amostras de toros de Pinheiro bravo. Uma amostra procedente do Centro de Portugal e uma outra procedente do Norte. Adicionalmente, foi analisada uma amostra de peças de madeira limpa oriunda dos toros ensaiados e estudado. O efeito do torneamento foi igualmente estudado numa sub-amostra de toros.

A comparação entre as características mecânicas das amostras não revelou diferenças significativas, apesar de serem oriundas de zonas geográficas bastante díspares e distantes. Verificou-se que as amostras, tendo em conta o sistema de classes da norma EN 338 (CEN, 2003c), e ressalvando-se o facto de a norma ter sido concebida para elementos de madeira de secção rectangular, correspondem a uma madeira da classe C30, sendo a resistência à compressão o parâmetro que impede a atribuição da classe C35.

Comparando com a madeira serrada de Pinheiro bravo, constata-se que, em termos de resistência e módulo de elasticidade, a madeira de secção circular de Pinheiro bravo é



semelhante à madeira serrada da classe EE. Adicionalmente, os valores das propriedades mecânicas obtidas neste estudo estão ao nível dos mais elevados que foram obtidos em outros estudos com outras espécies de madeira de secção circular.

Relativamente ao efeito do torneamento nas propriedades mecânicas dos toros, verificou-se que a amostra de toros torneados possuía uma resistência à flexão significativamente inferior, em cerca de 35%, à da amostra de toros não torneados 35%. Quanto ao módulo de elasticidade, as diferenças registadas foram pouco significativas.

As peças de madeira limpa apresentaram valores de resistência à flexão e à compressão superiores, em 20 a 30%, aos dos toros que lhes deram origem. Desta forma, o efeito dos defeitos nos toros foi significativo. A melhor correlação entre as propriedades das peças de madeira limpa e as dos toros que lhe deram origem foi obtida com a massa volúmica.

Em termos de relações entre as propriedades dos toros, a resistência revelou boa correlação com o módulo de elasticidade, a massa volúmica, a taxa de crescimento e a percentagem de lenho juvenil, sendo assim possível aferir esta propriedade por meios não destrutivos. A utilização de regressões lineares múltiplas permitiu obter melhores correlações com a resistência, não sendo significativo, no entanto, o incremento no coeficiente de correlação.



# AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA

---

## 4.1 Introdução

A avaliação não destrutiva permite a determinação da condição e propriedades de um material sem prejudicar o seu uso futuro. Cada técnica não destrutiva tem vantagens e desvantagens que afectam a sua aplicabilidade. Um uso adequado deste tipo de técnicas permite uma avaliação das propriedades do material, mantendo a sua integridade estrutural.

Segundo Carreira *et al.* (2003), a hipótese fundamental da avaliação não destrutiva da madeira foi fundamentada por Jayne em 1959. Ele propôs que a energia armazenada e as propriedades de dissipação da madeira, as quais podem ser medidas por meios não destrutivos, são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento estático da madeira. Como consequência, convenientes relações matemáticas entre estas propriedades e as propriedades estáticas de resistência e elasticidade podem ser obtidas por meio de análises de regressão.

Por ser um material gerado pela Natureza, a madeira apresenta grande variabilidade nas suas propriedades mecânicas, constituindo um dos factores que mais penaliza este material quando comparado com outros materiais de construção. Esta elevada variabilidade leva à necessidade de um largo volume de ensaios destrutivos de forma obter os valores característicos das propriedades mecânicas. De modo a evitar, por um lado, o desperdício de uma quantidade significativa de material e, por outro, o subaproveitamento das propriedades mecânicas, têm vindo a ser usadas diversas técnicas que permitam estimar as propriedades mecânicas da madeira. Desta forma é possível fazer uma selecção do material e obter lotes, classes de qualidade, de madeira mais homogêneos com um valor característico das propriedades mecânicas mais próximo do valor médio.

Consoante se usem técnicas de avaliação não destrutiva visuais ou mecânicas, existem ao nível da normalização europeia, dois sistemas de classificação de madeira para estruturas, visual e mecânica. Para diversas espécies de diversas origens estão definidas várias normas de classificação visual de madeira serrada para fins estruturais que atribuem classes de qualidade

ao material. Estas classes de qualidade têm definidas correspondências em termos de classes de resistência segundo a norma EN 1912 (CEN, 2004b). Nesta situação encontra-se a norma portuguesa NP 4305 (IPQ, 1995) para madeira serrada de Pinheiro bravo.

Para a madeira de secção circular de Pinheiro bravo não existe qualquer norma ou procedimento para selecção de toros para fins estruturais. Desta forma, neste capítulo procedeu-se, numa fase inicial, ao levantamento e análise das técnicas de avaliação não destrutiva existentes de modo a avaliar a sua aplicabilidade a madeira de secção circular. Numa fase posterior, procedeu-se à avaliação das técnicas não destrutivas, que demonstraram mais potencial na análise efectuada, na previsão das propriedades mecânicas dos toros das amostras estudadas no capítulo anterior.

## **4.2 Técnicas de avaliação não destrutiva**

### **4.2.1 Avaliação visual**

A necessidade de implementar sistemas de classificação visual é já referida em 1800, como forma de alcançar algum controlo sobre a qualidade da madeira para estruturas. Embora no Estado do Maine (Estados Unidos da América) uma primeira classificação tenha sido posta em prática a partir de 1833, somente em 1902 se inicia, nos Estados Unidos da América, um estudo sistemático para associar valores de resistência mecânica às classes de qualidade derivadas da classificação visual. Deste processo resulta, em 1912, o aparecimento de um sistema de classificação que veio a constituir a base da elaboração da norma D-245-27 (Machado, 2000).

A classificação visual engloba a avaliação visual de defeitos e de propriedades susceptíveis de afectar a resistência de uma peça de madeira, impondo as normas de classificação limites quanto à presença e/ou grandeza destes parâmetros. Saliente-se que na medição de determinados parâmetros poder-se-á recorrer a ferramentas auxiliares. A classificação visual possui, no entanto, vários inconvenientes. Um deles reside na impossibilidade de determinar propriedades que se relacionam fortemente com a resistência como a massa volúmica e o módulo de elasticidade. Acresce ainda a fraca relação entre os parâmetros medidos e a resistência das peças de madeira, neste estudo, para a resistência à flexão, foram obtidos coeficientes de determinação ( $r^2$ ) de 0,29-0,44 para nós e de 0,48-0,50 para a taxa de crescimento, pelo que estas características apenas explicam 29 a 50% da variabilidade da resistência à flexão. Um outro inconveniente é a impossibilidade de criar normas que abranjam todas as complexidades e combinações das propriedades que afectam a resistência. As normas tentam assim seleccionar os parâmetros de classificação mais significativos para cada espécie de madeira, dependendo a eficácia da sua aplicação, em grande medida, da experiência e qualidade do classificador, devido, nomeadamente, à rapidez do processo de classificação visual. Buehlmann e Thomas (2002) efectuaram um estudo para medição da performance dos operadores humanos na detecção de defeitos. Os autores verificaram que cerca de 78,2% dos defeitos foram detectados incorrectamente. Apesar de todas estas dificuldades, a classificação visual é largamente preferível ao não uso de qualquer classificação.

Nos Estados Unidos da América, a ASTM (American Society for Testing and Materials) e a ANSI (American National Standards Institute) publicam especificações para a madeira de secção circular, dando requisitos mínimos de qualidade e procedimentos para derivar valores de dimensionamento (Wolfe e Moseley, 2000). Foi estabelecida apenas uma classe de qualidade devido ao baixo coeficiente de variação das propriedades mecânicas, quando comparado com o da madeira serrada.

Na Europa foi tomada uma iniciativa com o objectivo de desenvolver uma norma europeia para a classificação de madeira de secção circular. Isto resultou em 2006 num projecto de norma, o prEN 14544. Este projecto de norma descreve ensaios e métodos alternativos para madeira de secção circular, mas não descreve perfis de resistência. Esta iniciativa acabou por ser abandonada em 2008.

Em Portugal, em termos de Pinheiro bravo para aplicações estruturais, como referido no início deste capítulo, existe apenas a norma portuguesa NP 4305 (IPQ, 1995), que define as regras de classificação de madeira serrada de secção rectangular. Para a madeira de secção circular não existem normas ou procedimentos de classificação. No entanto, a nível europeu, são conhecidos alguns estudos que fornecem indicações para uma possível aplicação da classificação visual a madeira de secção circular, que a seguir se apresentam de forma sucinta.

Boren e Barnard (2000) com base na caracterização mecânica e visual de toros de Casquinha, provenientes do Reino Unido e Finlândia, sugerem a classificação visual apresentada na Tabela 4.1, para aplicação em toros torneados com diâmetros entre os 69 e os 182mm, de modo a atribuir a classe C24 ou C30, segundo a norma EN 338 (CEN, 2003c).

Tabela 4.1 – Classificação visual sugerida por Boren e Barnard (2000)

Avaliação visual	Classe de resistência	
	C24	C30
Soma do diâmetro dos nós na secção (mm)	125	100
Soma do diâmetro dos nós na secção em percentagem do perímetro da secção (%)	93	75
Diâmetro do maior nó (mm)	39	35
Taxa de crescimento (mm)	5	3
Adelgaçamento (mm/m)	13	5

Ranta-Maunus (1999a) sugere a classificação visual da Tabela 4.2 para a aplicação a toros de Espruce europeu e Casquinha com diâmetros até 200mm, para o estabelecimento de duas classes de qualidade, sem valores de propriedades mecânicas a elas associados. Para além de respeitarem os limites dessas características, os toros não devem apresentar casca, apodrecimento ou buracos de insectos, e apenas podem possuir fendas do tipo radial cuja profundidade não ultrapasse a medula.

Tabela 4.2 – Classificação visual sugerida por Ranta-Maunus (1999a)

Avaliação visual	Classe “A”	Classe “B”
Diâmetro do nó em relação ao diâmetro de classificação (%)	25	30
Soma do diâmetro de nós agrupados em relação ao diâmetro de classificação (%)	75	100
Desvio do fio	1:10	1:7
Taxa de crescimento (mm)	3	5
Profundidade da fenda em relação ao diâmetro de classificação (%)	50%	50%
Comprimento das fendas (mm)	ilimitado	ilimitado
Soma da profundidade de quaisquer duas fendas numa secção em relação ao diâmetro da secção (%)	75	75
Percentagem de lenho de reacção na secção (%)	10	10
Adelgaçamento de toros torneados (mm/m)	3	5
Adelgaçamento de toros não torneados (mm/m)	5	10
Ovalidade em de qualquer secção de toros torneados (%)	5	10
Ovalidade em de qualquer secção toros não torneados (%)	10	20
Curvatura do toro (mm/m)	2,5	5
Profundidade máxima de dano mecânico (mm)	5	5
Comprimento máximo de dano mecânico em relação ao comprimento do toro (%)	25	25
Superfície de câmbio em relação à superfície de um 1m de toro (%)	10	10

Em estudo anterior (Morgado *et al.*, 2010) com duas amostras de toros de Pinheiro bravo, uma com cerca de 200 toros, com diâmetro médio de 103mm, e uma outra com 59 toros, com diâmetro médio de 197mm, oriundos de Centro de Portugal, foi proposta a classificação visual da Tabela 4.3. O sistema de classificação proposto permitia o estabelecimento de duas classes de qualidade, semelhante ao apresentado na norma para madeira serrada. A consideração de mais classes poderia traduzir-se num melhor aproveitamento do material mas iria tornar o processo de classificação mais lento. A consideração de apenas uma classe tornaria o processo mais rápido (apto para aplicação estrutural vs não apto para aplicação estrutural), mas conduziria a um maior subaproveitamento do material. As características visuais seleccionadas foram as que apresentaram melhor correlação com a resistência. No estabelecimento dos limites dessas características visuais procurou-se a maior diferenciação entre classes, em termos de propriedades mecânicas, assegurando uma representatividade de cada classe não inferior a 15% da amostra.

A classe A corresponde à classe de resistência C50 e a classe B à C35, segundo a norma EN 338 (CEN, 2003c). Este processo de atribuição não é totalmente correcto, dado que a norma foi elaborada para madeira de secção rectangular. Para além dos limites apresentados na Tabela 4.3, de modo a assegurar que os toros possuem características geométricas adequadas a aplicações estruturais, foram adoptados os limites sugeridos por Ranta-Maunus (1999a), apresentados na Tabela 4.2, de 10% e 20% em termos de ovalidade e de 2,5mm/m e 5mm/m em termos de curvatura o limite de 2,5mm/m, respectivamente para a classe A e B.

Tabela 4.3 – Classificação visual sugerida por Morgado *et al.* (2010)

	Classe A	Classe B
Característica visual	Limite	
Desvio do Fio (cm/m)	20	20
Diâmetro do nó em relação ao menor diâmetro do toro(%)	20	50
Taxa de Crescimento (mm)	3,00	5,00
Adelgaçamento (mm/m)	15,00	15,00
Propriedades mecânicas		
$f_{m,mean}$ (MPa)	91,6	77,5
$f_{m,k}$ (MPa)	59,0	45,5
$f_{c,0,mean}$ (MPa)	45,0	40,8
$f_{c,0,k}$ (MPa)	31,0	27,5
$E_{local,mean}$ (GPa)	18,0	14,5
$E_{local,0,05}$ (GPa)	12,1	9,7
$E_{global\ mean}$ (GPa)	16,6	13,8
$E_{global\ 0,05}$ (GPa)	11,1	9,2
$\rho_{mean}$ (kg/m <sup>3</sup> )	595	535
$\rho_k$ (kg/m <sup>3</sup> )	514	4325
$E_{local\ 90, mean}$ (GPa)	0,60	0,48
$E_{global\ 90, mean}$ (GPa)	0,55	0,46
$G_{local\ mean}$ (GPa)	1,12	0,91
$G_{global\ mean}$ (GPa)	1,03	0,86
$f_{t,0,k}$ (MPa)	35,4	27,3
$f_{t,90,k}$ (MPa)	0,60	0,60
$f_{v,k}$ (MPa)	3,80	3,80
$f_{c,90,k}$ (MPa)	3,60	3,03

#### 4.2.2 Análise de imagem

Os métodos de análise de imagem consistem, essencialmente, no uso de técnicas que permitem a obtenção de imagens internas ou da superfície dos elementos de madeira para detecção de defeitos. Este tipo de técnicas tem sido usado sobretudo na classificação de madeira serrada. Neste tipo de técnicas encontram-se a análise de imagens obtidas por câmara de vídeo, termografia, ressonância nuclear magnética e radiografia, sendo esta última a mais usada na análise de toros.

A análise de imagens por câmara de vídeo (Bostrom, 1998; Pham e Alock, 1998) consiste na reconstrução da superfície da madeira serrada recorrendo a câmaras de vídeo que efectuam um varrimento da superfície da peça. Ruz *et al.* (2009) desenvolveram um sistema deste género de baixo custo com o qual, em 550 peças de madeira com 11 tipos de defeitos diferentes, foi obtida uma classificação 91% correcta.

A termografia baseia-se na premissa que a temperatura da superfície de um material sujeita a uma excitação térmica, aquecimento ou arrefecimento, depende das suas propriedades térmicas e massa volúmica, provocando a presença de defeitos um desvio local da temperatura. Isto torna possível avaliar algumas propriedades físicas de um material ou a detecção de defeitos medindo a temperatura superficial. Existem alguns estudos usando esta técnica na avaliação do teor de água e da massa volúmica da madeira (Malik *et al.*, 2002). O procedimento mais usado para detecção *in situ* consiste numa câmara de infravermelhos, a qual produz uma imagem de um objecto através da detecção da radiação na gama de infravermelhos emitidos pelo objecto após aquecimento da sua superfície (Bucur, 2003).

A ressonância nuclear magnética é das técnicas mais poderosas e versáteis para caracterização de materiais. O elemento é submetido a um poderoso campo magnético o qual, mediante um manuseamento e interpretação adequados, permite criar informação suficiente para caracterizar e construir uma imagem do elemento. O desenvolvimento tecnológico permitiu o aumento da velocidade, sensibilidade e flexibilidade das caracterizações. Possíveis aplicações desta técnica passam pela medição da distribuição do teor de água, monitorização contínua do processo de secagem e impregnação da madeira. Somente o custo dos equipamentos limita a utilização desta técnica na madeira (Bucur, 2003).

A radiografia, tipicamente, envolve o posicionamento de uma energia radiográfica, raios X, raios gama ou micro-ondas, num lado do elemento de madeira e um meio de gravação, como um filme, no lado oposto ( Lee *et al.*, 2006). A radiação trespassa o elemento de madeira e atinge o filme. A massa volúmica local controla a quantidade de radiação que passa pelo elemento de madeira resultando numa imagem bidimensional da variação da massa volúmica do objecto em estudo. Adjanohoun *et al.* (1998) usaram uma máquina de raios-x para estimar as propriedades mecânicas de toros de *Pseudotsuga*. O método baseou-se na medição local da massa volúmica, sendo os nós foram detectados por possuírem uma massa volúmica cerca de 2,5 vezes superior à da madeira limpa. A máquina de raios-x efectuou uma radiografia numérica da madeira, fornecendo uma cartografia na qual cada ponto está ligado à massa volúmica para essa coordenada (Figura 4.1). A cartografia permitiu obter a evolução da massa volúmica do toro centímetro a centímetro, com erro de cerca de  $4\text{kg/m}^3$  (Figura 4.2). Usando regressões com base em 10 parâmetros, foram obtidos coeficientes de correlação de 0,53 com a resistência à flexão e de 0,71 com o módulo de elasticidade (Ranta-Maunus, 1999a).

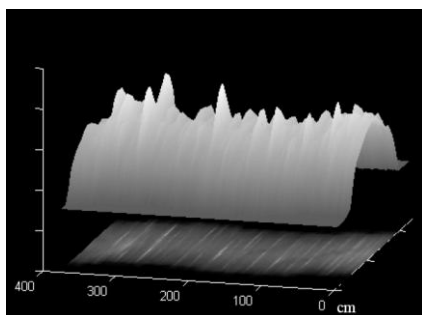


Figura 4.1 – Mapa da massa volúmica do toro (Adjanohoun *et al.*, 1998)

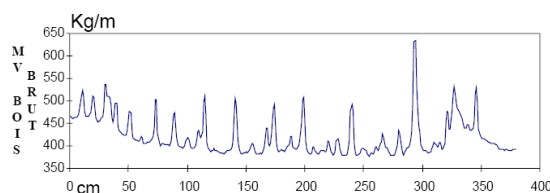


Figura 4.2 – Evolução da massa volúmica média ao longo do toro (Adjanohoun *et al.*, 1998)



Uma técnica mais avançada denominada tomografia computacional pode ser usada para produzir uma representação tridimensional da estrutura do elemento de madeira. O elemento é essencialmente radiografado em várias orientações e depois construída uma imagem tridimensional usando um computador. A principal desvantagem desta metodologia está relacionada com o facto de requer equipamento dispendioso (Pham e Alock, 1998).

A tomografia computacional tem vindo a ser usada na detecção e localização automática de defeitos internos em toros. Tsai *et al.* (2008) mostraram ser possível determinar a localização e dimensão de vazios no interior das árvores com recurso à tomografia ultrasónica. Bhandarkar *et al.* (2005) desenvolveram um método que permite a detecção e localização de fendas em toros, com vista a melhorar o rendimento em serração. Bhandarkar *et al.* (1999 e 2006) apresentaram um sistema de rastreamento com base na tomografia computacional que permite a detecção, localização e a representação tridimensional dos defeitos internos de toros (Figura 4.3). Sepúlveda (2001) e Sepúlveda *et al.* (2002) concluíram ser possível estimar o valor do fio torcido recorrendo a correlações com base em parâmetros obtidos da tomografia, os coeficientes de correlação obtidos foram na ordem de 0,72. Lee *et al.* (2006) usaram a tomografia computacional, por meio de raios-x e ultrasons, para a reconstrução de secções de madeira de secção circular, com vista a identificar zonas com degradação biológica.

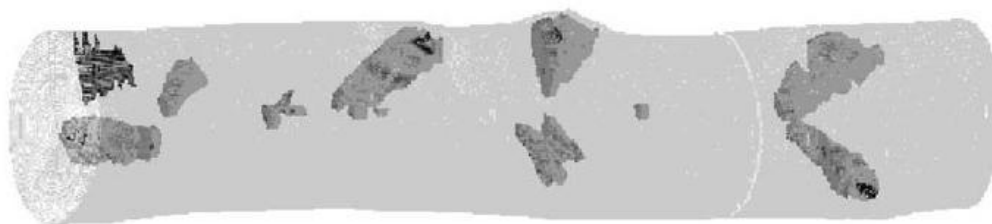


Figura 4.3 – Representação de um toro mostrando os seus defeitos internos (Bhandarkar *et al.*, 2006)

As técnicas de inspecção de microondas envolvem a propagação de ondas electromagnéticas, provenientes de sondas, a frequências entre os 300MHz e os 300GHz. A medição da amplitude, fase e polarização das ondas são usadas para a obtenção de uma imagem da estrutura do material. A obtenção de imagens por meio de microondas permite a detecção de defeitos internos como nós, fio inclinado, apodrecimento, vazios e descontinuidades em toros, bem como a massa volúmica e o teor de água (Bucur, 2003, Ghodgaonkar *et al.*, 1998, Al-Mattarneh *et al.*, 2002, Al-Mattarneh *et al.*, 2002). As dificuldades em aplicar esta técnica à madeira devem-se às propriedades inerentes do material, como a anisotropia, heterogeneidade e a presença de defeitos naturais na madeira. A vibração dos toros constitui, igualmente, uma dificuldade importante ao perturbar a medição da polarização (Bucur, 2003). Halabe *et al.* (2009) usaram esta técnica para a avaliação de defeitos em 6 toros de folhosas, de modo a rentabilizar o processo de serração dos mesmos. Os autores concluíram que este método permite identificar com boa precisão defeitos como nós, apodrecimento e objectos metálicos inseridos em toros. No entanto, foram verificados problemas na detecção de defeitos de pequenas dimensões (um furo com cerca de 9,5mm de diâmetro e 90mm de comprimento não foi detectado).

Taras e Iordanescu (1998) efectuaram a avaliação não destrutiva de 280 postes usando um instrumento de raios gama. O instrumento deslocava-se ao longo do elemento de madeira permitindo estimar a massa volúmica com base no teor de água e na intensidade de radiação que atravessava o poste. Usando a massa volúmica, os autores obtiveram um coeficiente de correlação 0,6 com a resistência à flexão.

### 4.2.3 Ultrasons

A técnica dos ultrasons consiste na medição de propriedades da onda sonora que atravessa o material. Podem ser consideradas duas subcategorias consoante a onda se propague no campo ultrasónico ou sonoro. Este último caso é frequentemente apelidado de onda de tensão ou *Stress Wave*.

O princípio da técnica de ultrasons consiste na emissão de uma onda de alta frequência ( $f \geq 20$  kHz) na direcção que se deseja estudar e medir o tempo necessário para que esta onda atinja a face oposta. Conhecida a distância ( $L$ ) entre o transdutor emissor e o transdutor receptor e medindo-se o tempo necessário para a onda percorrer este caminho ( $\Delta t$ ), pode-se determinar a velocidade de propagação da onda ( $C$ ) no interior do material pela equação (4.1). O valor do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{\text{din}}$ ) pode ser determinado, usando a velocidade  $C$  e a massa volúmica do material, pela equação (4.2). Segundo Wang (2006) o módulo de elasticidade dinâmico, para teores de água inferiores ao ponto de saturação das fibras, aumenta com a diminuição do teor de água. Acima do ponto de saturação das fibras o módulo de elasticidade dinâmico mantém-se relativamente constante.

$$C = \frac{L}{\Delta t} \quad (4.1)$$

$$E_{\text{din}} = \rho \times C^2 \quad (4.2)$$

A propagação das ondas ultrasónicas na madeira é influenciada por diversos factores:

- teor de água, aumento da velocidade de propagação com o aumento deste;
- apodrecimento, menor velocidade de propagação nestas zonas;
- massa volúmica, aumento da velocidade de propagação com o aumento desta;
- desvio do fio, a velocidade da onda é superior na direcção das fibras (Figura 4.4 e Figura 4.5);
- presença de fendas;
- resistência mecânica da peça;
- temperatura ambiente;
- espécie de madeira;
- dimensão das peças de madeira.

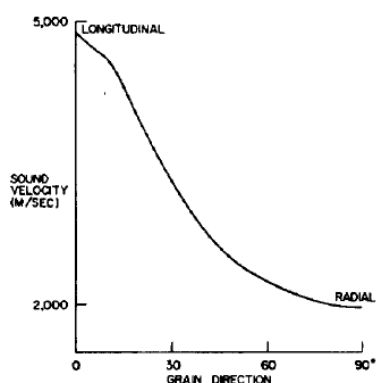


Figura 4.4 – Variação típica da velocidade da onda com a orientação do fio, da direcção longitudinal para a radial (Schafer, 2000)

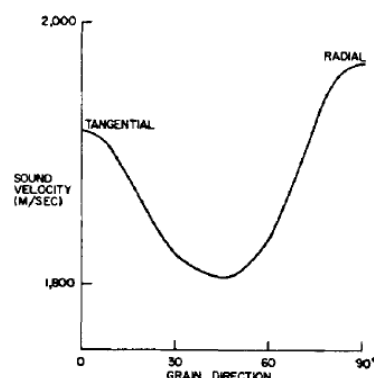


Figura 4.5 – Variação típica da velocidade da onda com a orientação do fio, da direcção tangencial para a radial (Schafer, 2000)

A técnica de ultrasons tem sido usada para a detecção de defeitos penalizadores da resistência como os nós, desvio do fio e apodrecimento nos elementos de madeira. Grande parte das aplicações deste método passa pela avaliação da qualidade dos elementos de madeira em ambiente fabril. As dificuldades principais associadas com o uso de ultrasons estão relacionadas com:

- ligação efectiva entre os transdutores e a superfície de madeira;
- limitações na dimensão do material para uma avaliação efectiva devido à elevada atenuação da onda pela madeira;
- necessidade de aceder às faces opostas dos elementos de madeira para transmitir e receber a energia ultrasónica.

Uma vez que as ondas de elevada frequência se atenuam significativamente em distâncias relativamente pequenas na madeira, a detecção ultrasónica do apodrecimento e outros defeitos é eficaz, principalmente, em pequenos troços. Isto limita a utilidade desta técnica para elementos de madeira com grandes dimensões. Segundo Emerson *et al.* (1998), a necessidade de usar as faces opostas dos elementos de madeira foi parcialmente superada com o uso de ondas criticamente refractadas.

Sandoz (1991) usou o equipamento Sylvatest para previsão das propriedades mecânicas de toros de Espruce tendo obtido coeficientes de correlação entre a velocidade de onda e o módulo de elasticidade e a resistência à flexão de 0,58 e 0,80, respectivamente. Sandoz e Pavillet (1998) sugerem a aplicação deste equipamento a árvores de modo a ser possível obter madeira de melhor qualidade. Os autores desenvolveram um modelo empírico que relaciona a velocidade da onda ultrasónica medida na árvore com o módulo de elasticidade da madeira resultante. Ranta-Maunus (1999a) usou igualmente o Sylvatest para a medição da velocidade da onda ultrasónica em 180 toros de *Pseudotsuga* com 120mm de diâmetro. Os coeficientes de correlação da resistência à flexão e módulo de elasticidade com o módulo de elasticidade dinâmico foram de 0,54 e 0,81, respectivamente.

Sales *et al.* (*apud* Carreira *et al.*, 2006) empregaram a técnica de ultrasons para a avaliação de propriedades mecânicas de 25 postes de Eucalipto citriodora. Os postes foram ensaiados à flexão e posteriormente foram extraídos dois toros, um do topo e outro da base dos postes, de 50cm de comprimento de regiões não afectadas pela ruptura. Os toros foram submetidos à emissão ultrasónica nas direcções axial e radial, para determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Os autores obtiveram coeficientes de correlação de 0,78 e 0,62 com o módulo de elasticidade estático e a resistência à flexão, respectivamente.

Prieto *et al.* (2007) usaram ultrasons para avaliação não destrutiva de toros de Pinho Larício (*Pinus nigra* subsp. *Saltzmanii*). Os autores obtiveram um coeficiente de correlação de 0,82 entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade estático. Concluíram que a posição dos transdutores na secção transversal do toro não introduzia diferenças significativas nos resultados.

Em termos Pinheiro bravo, Machado (2000) determinou a velocidade de propagação dos ultrasons na direcção paralela às fibras em peças de madeira serrada. Os coeficientes de correlação obtidos entre o quadrado da velocidade da onda e o módulo de elasticidade estático variaram entre 0,59 e 0,62, para as diversas frequências usadas (37kHz, 54kHz e 150kHz).

A variante de ondas de tensão ou *stress waves*, do método de ultrasons, tem sido aplicada com frequência a madeira de secção circular. As ondas de tensão são geradas por um impacto no topo do toro, gerando uma onda de compressão que se propaga a uma velocidade  $C$ . A monitorização do movimento do topo contrário resulta numa série de impulsos, igualmente espaçados no tempo, cuja magnitude decresce exponencialmente com o tempo. A velocidade de propagação  $C$  da onda é determinada pela equação (4.1), usando o período de tempo ( $\Delta t$ ) entre impulsos e o comprimento do toro  $L$ .

Anthony *et al.* (1998b) desenvolveram um modelo denominado *Pole Test* que permite prever a resistência à flexão de postes. O modelo usa as propriedades da onda de tensão aplicada transversalmente na secção de encastramento e características dos postes, como o comprimento e o diâmetro, para prever, por meio de correlações, a resistência dos postes. Os autores obtiveram um coeficiente de correlação de 0,63 entre a resistência à flexão experimental e prevista, numa amostra de 80 postes de linhas aéreas de Casquinha. Adicionalmente, os autores usaram ondas de tensão longitudinais em 23 postes da mesma espécie, tendo obtido um coeficiente de correlação de 0,95 entre a carga de rotura estimada e a experimental

Wang *et al.* (2001a e 2001b) estudaram a possibilidade de usar ondas de tensão em árvores de modo a estimar as propriedades da madeira resultante das mesmas. Os autores mediram o módulo de elasticidade dinâmico num troço de 1,22m em 84 árvores de Western hemlock (*Tsuga heterophylla*) e 84 árvores de Espruce americano. Posteriormente, as árvores foram cortadas e, do referido troço de 1,22 de comprimento, foram obtidas peças de madeira limpa

de 25x25x406m, às quais foram aplicadas ondas de tensão. Os autores obtiveram um coeficiente de correlação de 0,83 entre a velocidade da onda medida nas árvores e nas peças de madeira limpa e um coeficiente de correlação de 0,66 entre o módulo de elasticidade dinâmico nas árvores e o módulo de elasticidade estático da madeira limpa. Os resultados deste estudo indicam que o uso de ondas de choque *in situ* pode fornecer informação relativamente precisa sobre a qualidade da madeira resultante do processamento do tronco de uma árvore.

O uso mais comum das ondas de tensão para previsão das propriedades mecânicas dos toros passa pela correlação entre estas e o módulo de elasticidade dinâmico, obtido pela equação (4.2). Na Tabela 4.4 são apresentados os coeficientes de correlação obtidos em diversos estudos. Verifica-se uma grande variação de valores, assumindo o coeficiente de correlação entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico valores entre 0,40 e 0,87.

Tabela 4.4 – Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre o  $E_{din}$  obtido por ondas de tensão e as propriedades mecânicas

Referência	Espécie	$\rho$	$E_{c,0}$	$E_0$	$f_{t,0}$	$f_{c,0}$	$f_m$
Pellerin <i>et al.</i> (1989)	Lodgepole pine	0,26	0,56	-	0,52	-	-
Wolfe e Moseley (2000)	Pseudotsuga, Abeto e Pinho-insigne	-	-	0,40	-	-	0,39
Wang <i>et al.</i> (2001b)	Red pine	-	-	0,87	-	-	-
	Jack pine	-	-	0,77	-	-	-
Green <i>et al.</i> (2004)	Subalpine e Lodgepole pine	-	-	0,82	-	0,71	0,50

#### 4.2.4 Vibração

As técnicas de vibração baseiam-se na teoria de que todos os materiais têm uma frequência natural à qual vibram. No caso específico da madeira, estas técnicas têm sido usadas para estimar o módulo de elasticidade através da indução de movimento vibratório no elemento de madeira (Bell *et al.*, 1954). O módulo de elasticidade resultante fornece uma indicação da rigidez, podendo a resistência ser estimada por meio de correlações.

A rigidez pode ser determinada com base na relação entre a frequência de uma peça de madeira que vibra livremente e o seu módulo de elasticidade. Uma vez que este método é independente de problemas de geometria da peça, como a curvatura ou adelgaçamento, pode ser apropriado para a classificação de madeira de secção circular (Vries, 1998b). Este método é baseado na teoria de viga de Euler para vibrações livres de flexão. A frequência própria de um elemento é a vibração básica de todo o elemento no modo normal. A vibração pode ser iniciada por um impacto longitudinal ou transversal.

No caso de a vibração ser iniciada por um impacto longitudinal e considerando um elemento prismático com condições de apoio livres e de propriedades constantes ao longo do comprimento, a equação de vibração livre é dada pela equação (4.3) (Clough e Penzien, 1993), onde  $EA$  é a rigidez axial,  $m$  a massa do elemento de comprimento  $L$  e  $u(x,t)$  o

deslocamento axial. Esta equação pode ser trabalhada de modo a chegar à frequência própria de vibração  $f$ , equação (4.4), para os vários modos de vibração  $n$ . Assim, considerando o primeiro modo de vibração ( $n=1$ ),  $\rho$  e  $E$  constantes, e que as extremidades estão livres, o módulo de elasticidade dinâmico é dado pela equação (4.5).

$$EA \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \frac{m}{L} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (4.3)$$

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.4)$$

$$E_{\text{din}} = 4L^2 f^2 \rho \quad (4.5)$$

Tal como no método anterior, a previsão das propriedades mecânicas dos toros é efectuada por meio de correlação com o módulo de elasticidade dinâmico, neste caso obtido pela equação (4.5). Na Tabela 4.5 são apresentados os coeficientes de correlação obtidos em diversos estudos. Verifica-se que os valores são elevados, assumindo o coeficiente de correlação entre a resistência à flexão e o módulo de elasticidade dinâmico valores entre 0,76 e 0,90.

Tabela 4.5 – Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre o  $E_{\text{din}}$  obtido por vibração longitudinal e as propriedades mecânicas

Referência	Espécie	$E_{\text{local}}$	$E_{\text{global}}$	$f_{c,0}$	$f_m$
Gard <i>et al.</i> (1998)	Larício do Japão	0,82	0,85		0,76
Gard <i>et al.</i> (1998)	Pseudotsuga	0,59	0,87		
Vries e Gard (2006b)	Larício do Japão		0,87		0,77
Vries (2009)	Cloeziãna		0,42		
Morgado <i>et al.</i> (2010)	Pinheiro bravo	0,76	0,75	0,67	0,77
Rodrigues e Vries (2010)	Larício do Japão	0,93	0,94		0,90

No caso de a vibração ser iniciada por um impacto transversal, esta pode ser ilustrada por analogia entre o comportamento de uma viga em vibração e a vibração de uma massa que está acoplada a uma mola com peso desprezável e uma força de amortecimento interna. Assim, considerando a situação da Figura 4.6 onde corpo de massa  $m$  é suportado por uma mola de constante elástica  $K$ , com um amortecedor cujo coeficiente de amortecimento é  $r$ . Quando a massa  $m$  é colocada em vibração por uma força de valor  $P_0 \sin \omega t$  a sua equação de movimento pode ser expressa pela equação (4.6), que pode ser resolvida em ordem a  $K$  ou  $r$ . A solução para  $K$  resulta numa expressão para o módulo de elasticidade, apresentada na equação (4.7), para a uma viga livre sem apoios. No caso de uma viga simplesmente apoiada, a expressão obtida é apresentada na equação (4.8).

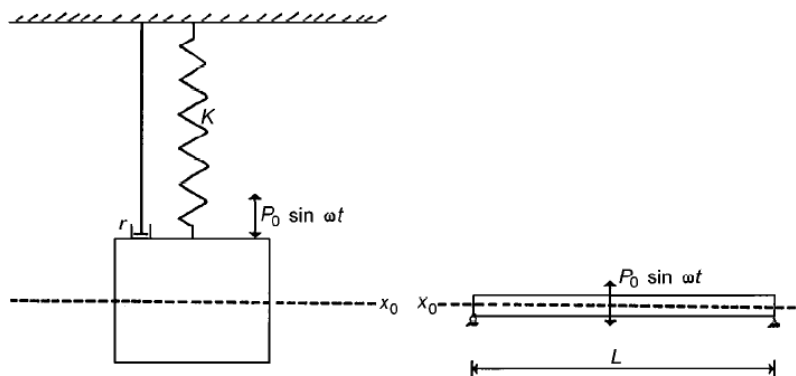


Figura 4.6 – Esquema do modelo de vibração transversal (Ross e Pellerin, 1994)

$$m \left( \frac{d^2 x}{dt^2} \right) + r \left( \frac{dx}{dt} \right) + Kx = P_0 \sin \omega t \quad (4.6)$$

$$E_{\text{din}} = \frac{f^2 L^3 m}{12.65 I g} \quad (4.7)$$

$$E_{\text{din}} = \frac{f^2 L^3 m}{2.46 I g} \quad (4.8)$$

Onde:

$I$  - Segundo momento de área da secção transversal da viga

$g$  - Aceleração da gravidade

Para o caso de vigas com adelgaçamento, Murphy (2000) estudou uma solução numérica para o caso de uma viga simplesmente apoiada, considerando que esta era constituída por cilindros justapostos, chegando à equação (4.9), onde  $r_0$  é o raio do maior topo e  $r_1$  o raio do menor topo..

$$f^2 = 2.467 g \frac{E_{\text{din}} r_0 r_L}{L^4 \rho} \quad (4.9)$$

Na Tabela 4.6 são apresentados os coeficientes de correlação, obtidos em diversos estudos, entre o módulo de elasticidade dinâmico, obtido por vibração transversal, e as propriedades mecânicas de toros. Verifica-se que os coeficientes de correlação são mais elevados que os apresentados para a vibração longitudinal, assumindo o coeficiente de correlação entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico valores entre 0,73 e 0,97. Alguns estudos apresentados também usaram o método das ondas de tensão, sendo os coeficientes de correlação obtidos inferiores.

Tabela 4.6 – Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre  $E_{din}$  obtido por vibração transversal e as propriedades mecânicas

Referência	Espécie	$E_0$	$f_{c,0}$	$f_m$
Chui <i>et al.</i> (1999)	Red pine	0,92		0,69
Wang <i>et al.</i> (2001b)	Red pine	0,97		
	Jack pine	0,92		
Green <i>et al.</i> (2004)	Subalpine e Lodgepole pine	0,94	0,77	0,71
Green <i>et al.</i> (2005)	Ponderosa pine	0,91		
	Pseudotsuga	0,89		
Green <i>et al.</i> (2006)	Engelmann spruce, Alpine fir e Lodgepole pine	0,91	0,71	0,73
Green <i>et al.</i> (2008)	Pseudotsuga	0,73		0,62
	Ponderosa pine	0,81		0,84

#### 4.2.5 Introdução de esforços mecânicos

Este tipo de teste não destrutivo consiste, tal como o nome sugere, em estimar as propriedades mecânicas dos elementos de madeira com base na sua resposta à aplicação de um determinado esforço. Com base neste tipo de teste, para aplicação a madeira serrada, foi desenvolvida a máquina MSR (*Machine Stress Rated*). Ao entrar na máquina, a madeira passa por uma série de rolos (Figura 4.7), neste processo, uma força provocando flexão é aplicada perpendicularmente ao eixo de menor inércia da secção transversal da peça e é medida a deformação para o cálculo do módulo de elasticidade. A resistência da peça é estimada por correlação com o módulo de elasticidade medido. A máquina pode ainda incluir scanners de microondas para obter parâmetros adicionais de classificação o que permite aumentar o coeficiente de correlação (Nguyen *et al.*, 2002). Esta máquina é, no entanto, limitada à classificação de materiais finos, espessura até 38mm (Carreira *et al.*, 2003), pelo que a sua aplicação a toros, como os do presente estudo, iria requerer uma máquina de grandes dimensões.

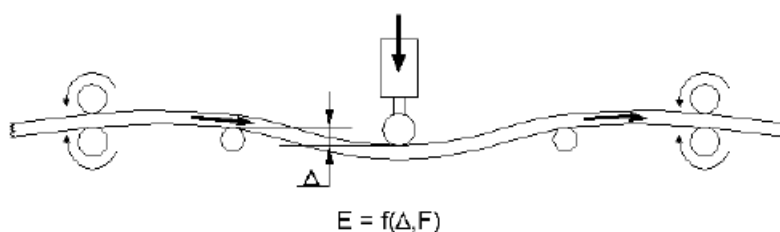


Figura 4.7 – Esquema de funcionamento de uma máquina MSR (Carreira *et al.*, 2003)

Uma outra técnica baseada na introdução de esforços é denominada de emissões acústicas. Quando um material é carregado, a energia cinética libertada irá originar ondas de pequena amplitude ao longo do elemento. Estas são conhecidas como emissões acústicas e, embora sejam geralmente audíveis, podem ser detectadas como pequenos deslocamentos por sensores posicionados na superfície do material. Como as emissões acústicas são sensíveis a concentrações de esforços em torno de defeitos, é um método com potencial para avaliar a



madeira com nós ou outras irregularidades (Malik *et al.*, 2002). Este método pode ainda ser usado para minimizar os efeitos de secagem, detectar apodrecimento e estimar propriedades mecânicas. No entanto, segundo Kawamoto e Williams (2002), este método possui diversas desvantagens, nomeadamente:

- na medição é difícil distinguir entre os sinais reais das emissões acústicas e o ruído de fundo;
- em alguns casos, a geração de emissões acústicas não acontece até o material ser carregado até ao limite proporcional de deformação;
- no caso da madeira, as emissões acústicas mais pequenas são de difícil detecção devido à atenuação das ondas durante a propagação;
- as técnicas convencionais que assumem velocidade isotrópica não podem ser usadas na madeira, uma vez que a velocidade de propagação das ondas na madeira é diferente nas direcções longitudinal, radial e tangencial.

Outra técnica com base na introdução de esforços tem por base a determinação da resistência à furação da peça. Trata-se de um método semi destrutivo usado para determinar a massa volúmica e detectar apodrecimento nas árvores e na madeira. É classificado como um método semi destrutivo porque um furo de pequeno diâmetro (1,5mm a 3mm) é efectuado na madeira. No entanto, este furo é pequeno o suficiente para que tenha efeitos insignificantes na resistência da secção, podendo ser selado para evitar apodrecimento.

A resistência à furação é determinada medindo a energia gasta na perfuração da madeira. O gráfico resistência à furação-profundidade da perfuração permite avaliar a condição interna de uma árvore ou elemento de madeira e identificar a localização de apodrecimentos (Anthony *et al.*, 1998a). A previsão da massa volúmica é obtida por meio de correlação com a resistência à furação. Esta relação é dependente da inclinação da furação, sendo máxima, segundo os resultados de Tseng e Hsu (2004b) na direcção radial. Um resumo dos coeficientes de correlação com a resistência à furação, encontrados em bibliografia, para madeira serrada, é apresentado na Tabela 4.7. Verifica-se que a correlação com a massa volúmica é bastante elevada, no entanto, o número de estudos e espécies é reduzido.

Tabela 4.7 – Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre a resistência à furação e propriedades mecânicas

Referência	Espécie	$\rho$	$f_{c,0}$	$f_{c,90}$	$E_{c,90}$
Tseng e Hsu (2004a)	China fir ( <i>Cunninghamia lanceolata</i> )		0,58	0,82	
Tsai <i>et al.</i> (2004)	China fir ( <i>Cunninghamia lanceolata</i> )	0,95			
Tseng e Hsu (2004b)	China fir ( <i>Cunninghamia lanceolata</i> )	0,92		0,88	0,56

Uma vez que este método apenas fornece uma medição localizada da massa volúmica, para dele tirar o melhor partido, deve usar-se esta metodologia em conjunto com outros métodos não destrutivos, que permitam estimar a localização de zonas passíveis de possuírem apodrecimento, nas quais este método pode ser usado para aferir a respectiva condição.

Outros métodos semelhantes consistem na medição da resistência ao arrancamento de parafusos e da resistência à perfuração por impacto. Neste último caso pode ser usado um equipamento como o Pilodyn, que dispara contra a madeira uma haste metálica, sendo medido o comprimento de perfuração. Um resumo dos coeficientes de correlação, obtidos de estudos realizados, com a massa volúmica, usando estes dois métodos, é apresentado na Tabela 4.8. Verifica-se que, apesar do reduzido número de estudos encontrados, o Pilodyn permite obter melhores coeficientes de correlação que o método de medição da resistência ao arrancamento de parafusos.

Tabela 4.8 – Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre a resistência ao arrancamento de parafusos ou a resistência à perfuração por impacto e a massa volúmica

Referência	Método	Espécie	$\rho$
Bobadilla <i>et al.</i> (2004)	Arrancamento de parafusos	Contraplacado	0,22
	Pilodyn		0,86
Maldonado <i>et al.</i> (2007)	Arrancamento de parafusos	Tábuas de Pinho radiata	0,69
	Pilodyn		0,63
	Arrancamento de parafusos	Tábuas de Scots pine	0,71
	Pilodyn		0,59
	Arrancamento de parafusos	Tábuas de Laricio pine	0,70
	Pilodyn		0,70

#### 4.2.6 Avaliação qualitativa das técnicas de avaliação não destrutiva

A determinação das propriedades mecânicas da madeira de secção circular é um passo determinante para uma adequada aplicação estrutural deste material. Mediante a revisão bibliográfica realizada constata-se que existem diversos métodos não destrutivos para este fim.

A avaliação visual consiste na determinação de determinadas características visuais das peças de madeira, as quais, por meio de correlações, permitem estimar as propriedades mecânicas. Desta forma, com a aplicação de limites às características visuais é possível separar as peças de madeira em classes de qualidade. Para este fim existem normas de classificação visual, no entanto, estas apenas são aplicáveis a madeira de secção circular, existindo em bibliografia apenas algumas propostas de classificação visual para madeira de secção circular. É uma técnica de avaliação não destrutiva de fácil aplicação e baixo custo, requerendo apenas pessoas qualificadas para a efectuar, pelo que a eficiência da avaliação visual está dependente da qualidade do avaliador. A principal desvantagem desta técnica está relacionada com o facto de a correlação entre as características visuais e as propriedades mecânicas não ser elevada, pelo que se espera uma variabilidade elevada das propriedades mecânicas dentro das classes de qualidade.

Os métodos de análise de imagem permitem a obtenção de uma imagem da peça de madeira para visualização de defeitos e da sua estrutura. Com base na análise das imagens as

propriedades mecânicas podem ser estimadas. Estes métodos possuem um elevado potencial, no entanto exigem equipamento dispendioso, e, em alguns casos, existe algum perigo de radiação para o utilizador. São métodos adequados para uso fixo, devido, geralmente, à sua pouca portabilidade.

O método da introdução de esforços mecânicos baseia-se na determinação de uma propriedade, geralmente o módulo de elasticidade, para a previsão da resistência por meio de correlações. Este procedimento é usado actualmente para classificação de tábuas com espessura máxima de 38mm, sendo a sua aplicação a madeira de secção circular dificultada pelo facto de exigir uma máquina de dimensões incomportáveis.

Uma outra técnica baseada na introdução de esforços é denominada de emissões acústicas. Quando um material é carregado, a energia cinética libertada irá originar ondas de pequena amplitude, denominadas emissões acústicas, ao longo do elemento que podem ser detectadas por sensores posicionados na superfície do material. Como as emissões acústicas são sensíveis a concentrações de esforços em torno de defeitos, é um método com potencial para avaliar a madeira com nós ou outras irregularidades. No entanto, este método é bastante sensível, pelo que deve ser executado em ambiente controlado, onde não existam outros ruídos, de modo a não existirem interferências.

Estimar a massa volúmica através do método semi destrutivo da furação ou arrancamento, baseia-se no facto de a massa volúmica possuir boa correlação com a resistência à furação ou arrancamento. Assim, com este método procura-se obter uma mediação localizada da massa volúmica do elemento. Este método é adequado, especialmente, para detectar apodrecimento, uma vez que a massa volúmica dessa zona é bastante inferior à da madeira sã. O principal inconveniente deste método é o facto de apenas poder analisar a madeira localmente, sendo imprescindível usar um outro método não destrutivo que indique as hipotéticas zonas de apodrecimento.

A avaliação não destrutiva por ultrasons consiste na avaliação das propriedades da onda sonora que atravessa o elemento de madeira, nomeadamente a sua velocidade. No caso de a onda se propagar no campo sonoro, este método é usualmente designado por ondas de tensão. A previsão das propriedades mecânicas é feita por correlação com a velocidade de onda ou com o módulo de elasticidade dinâmico. Segundo os dados em bibliografia, no campo sonoro é possível obter coeficientes de correlação com as propriedades mecânicas de 0,58 a 0,80, enquanto no caso campo ultra sónico, estes podem variar entre 0,29 e 0,87.

O método de vibração baseia-se no princípio que todos os corpos possuem um frequência própria à qual vibram quando sujeitos a uma excitação externa. Este método pode ser subdividido em vibração longitudinal, no caso de a excitação ser introduzida na direcção longitudinal do elemento, ou vibração transversal, no caso de a vibração ser introduzida na direcção perpendicular. Com base na frequência de vibração é determinado o módulo de

elasticidade dinâmico da peça, o qual é usado para estimar as propriedades mecânicas por meio de correlações. Com base nos dados em bibliografia, é possível obter coeficientes de correlação com as propriedades mecânicas entre 0,59 e 0,93, para o caso da vibração longitudinal, e entre 0,62 e 0,97, caso seja usada a vibração transversal.

De modo a tomar decisões para o presente estudo, apresenta-se na Tabela 4.9 um resumo, em termos qualitativos, dos métodos referidos. Para aplicação à madeira de secção circular de pequeno diâmetro, os métodos a usar devem ser os mais eficientes na relação previsão das propriedades mecânicas *vs* custo do equipamento, e serem de fácil aplicação. Com base nesta premissa e na Tabela 4.9, as técnicas de imagem não se adequam a este tipo de material, por exigirem equipamento bastante dispendioso. O método de introdução de esforços mecânicos não é adequado para aplicação a madeira de secção circular, pelas razões referidas anteriormente. O método das emissões acústicas é de difícil aplicabilidade, devido à sua elevada sensibilidade. A determinação da resistência à furação ou arranque possui a desvantagem de apenas poder avaliar a madeira localmente, o que não se revela viável para classificação. A avaliação das propriedades mecânicas por meio de métodos de vibração e ultrasons possuem uma boa relação custo/aplicabilidade e revelaram bons coeficientes de correlação. A avaliação visual é a técnica de avaliação não destrutiva que não requer qualquer tipo de equipamento específico, para além de vulgares equipamentos de medição, tendo um custo muito baixo. Assim, optou-se por avaliar as amostras do presente estudo com recurso a estas três últimas técnicas.

Tabela 4.9 – Comparação qualitativa das técnicas de avaliação não destrutiva

Técnica	Custo	Facilidade de Aplicação	Medição
Avaliação visual	Baixo	Média	Características visuais
Imagem	Elevado	Média	Imagem do elemento de madeira
Ultrasons	Baixo	Elevada	Módulo de elasticidade dinâmico
Vibração	Baixo	Elevada	Módulo de elasticidade dinâmico
Resistência à furação ou arrancamento	Baixo	Elevada	Medição local da resistência à furação ou arrancamento
Introdução de esforços mecânicos	Médio	Baixa	Módulo de elasticidade estático
Emissões acústicas	Médio	Baixa	Emissões acústicas

### 4.3 Avaliação não destrutiva das amostras

#### 4.3.1 Avaliação visual

A caracterização visual das amostras em estudo foi efectuada no capítulo anterior, nomeadamente no ponto 3.4. Assim, optou-se, em detrimento de definir novos limites para as características visuais que apresentaram melhor correlação com as propriedades mecânicas, apresentadas no ponto 3.8.4, em verificar a aplicabilidade da proposta de classificação visual

sugerida em estudo anterior para toros desta espécie, apresentada na Tabela 4.3 do ponto 4.2.1, a toros oriundos de diferentes zonas territoriais de Portugal.

A classificação visual efectuada resultou na rejeição de 34 toros do total de 80 que compõem a amostra conjunta deste presente estudo. O motivo da maioria das rejeições na classe A (94% dos toros) deveu-se ao limite imposto de 3mm para a taxa de crescimento. Ao nível da classe B, as rejeições também se deveram, em grande percentagem (39%), ao limite adoptado para a taxa de crescimento de 5mm.

Dos toros que não foram rejeitados, 4 foram classificados como classe A e 42 toros classificados como classe B. Na Tabela 4.10 à Tabela 4.12 são apresentadas as propriedades mecânicas dos toros obtidos para cada classe e as dos toros rejeitados, de modo a ser possível comparar com as propriedades mecânicas de referência existentes na proposta de classificação visual.

Tabela 4.10 – Propriedades mecânicas dos toros classificados como classe A

Valor	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_m$ (MPa)	$E_{local}$ (GPa)	$E_{global}$ (GPa)
Médio	598,4	41,8	90,4	19,4	19,3
Mínimo	529,8	38,2	77,2	14,5	14,7
Máximo	736,0	51,1	116,7	23,1	23,2
Percentil 5%	534,8	38,3	77,5	14,6	14,7
Desvio padrão	93,1	6,3	18,2	4,1	4,2
<i>N</i>	4	4	4	4	4

Tabela 4.11 – Propriedades mecânicas dos toros classificados como classe B

Valor	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_m$ (MPa)	$E_{local}$ (MPa)	$E_{global}$ (MPa)
Médio	543,4	39,7	74,4	14,3	14,5
Mínimo	470,0	29,6	44,1	9,	8,0
Máximo	618,3	49,6	106,1	18,4	20,7
Percentil 5%	478,1	32,8	54,0	10,2	10,3
Desvio padrão	39,8	4,7	13,1	2,0	2,3
<i>N</i>	42	42	42	42	42

Tabela 4.12 – Propriedades mecânicas dos toros rejeitados

Valor	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_m$ (MPa)	$E_{local}$ (MPa)	$E_{global}$ (MPa)
Médio	502,7	34,7	60,6	12,1	12,5
Mínimo	421,0	26,1	34,0	7,8	8,0
Máximo	609,0	44,6	81,2	14,1	14,3
Percentil 5%	428,0	28,8	43,5	8,6	8,7
Desvio padrão	43,8	4,4	11,7	1,8	1,7
<i>N</i>	34	34	34	34	34

Comparando os valores médios das propriedades dos toros alocados a cada classe, verifica-se que as propriedades dos toros classificados como classe A são superiores, em alguns casos significativamente, às propriedades homólogas dos toros classificados como classe B. Em termos de quinto percentil, a situação é similar, especialmente na resistência à flexão.

De modo a averiguar a aplicabilidade dos valores de referência das propriedades apresentados na proposta de classificação da Tabela 4.3, estes serão comparados com os obtidos dos toros classificados. Em termos de valores característicos, os que realmente interessam em termos de dimensionamento, o quinto percentil das propriedades mecânicas dos toros classificados como classe A são ligeiramente superiores aos valores referenciados na proposta de classificação visual. Em termos de valores médios, os obtidos para a massa volúmica e módulo de elasticidade são ligeiramente superiores aos de referência. Fazendo análise análoga com os toros classificados como classe B, verifica-se que a situação é semelhante, com os valores do quinto percentil superiores aos de referência apresentados na proposta de classificação visual. Em termos de valores médios, o obtido para a massa volúmica é ligeiramente superior ao valor de referência da proposta. No caso do módulo de elasticidade, o valor médio do módulo de elasticidade local é ligeiramente inferior (1,5%) ao de referência da classe B.

Analisando a Tabela 4.12, verifica-se que o valor médio e o quinto percentil das propriedades mecânicas são efectivamente menores que os dos toros não rejeitados. No entanto, tal como seria de esperar, existiu algum desperdício de material uma vez que 71% dos toros rejeitados possui propriedades mecânicas superiores aos valores característicos de referência da classe B. Destes toros, apenas 30% possui massa volúmica superior ao valor médio de referência e, em termos de módulo de elasticidade, nenhum deles possui valor superior ao médio de referência, pelo que inclusão destes toros na classe B iria levar à diminuição dos valores médios de massa volúmica e módulo de elasticidade do total de toros alocados à classe B.

Em termos gerais, é possível afirmar que a proposta de classificação visual sugerida em estudo anterior, e aqui apresentada na Tabela 4.3, permite classificar com sucesso e segurança a madeira de secção circular de Pinheiro bravo. A optimização desta proposta pode passar pela eliminação da classe A, uma vez que neste estudo apenas 5% da amostra foi alocada a essa classe, o que iria aumentar em termos de rapidez o processo de classificação, e pelo aumento do limite da taxa de crescimento para 6mm. Considerando este novo limite para a taxa de crescimento e apenas uma classe de qualidade, apenas 13% dos toros são rejeitados, apresentando-se na Tabela 4.13 as propriedades mecânicas do conjunto de toros aceites para aplicação estrutural, onde se verifica que o quinto percentil continua acima dos valores de referência da classe B, embora o valor médio do módulo de elasticidade seja ligeiramente inferior (2,6%).

Tabela 4.13 – Propriedades mecânicas do conjunto de toros seleccionados para aplicação estrutural tendo em conta novos critérios de classificação

Valor	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_m$ (MPa)	$E_{local}$ (GPa)	$E_{global}$ (GPa)
Médio	535,4	38,2	71,7	14,1	14,3
Mínimo	421,0	26,1	44,1	7,8	8,0
Máximo	736,0	51,1	116,7	23,1	23,2
Percentil 5%	460,6	29,7	49,0	9,9	10,2
Desvio padrão	50,8	5,4	14,1	2,3	2,4
<i>N</i>	69	69	69	69	69

### 4.3.2 Vibração

A avaliação não destrutiva por meio de vibração foi efectuada com recurso ao equipamento comercial *Timber Grader* MTG (Figura 4.8). Este equipamento permite determinar o módulo de elasticidade dinâmico pelo método da vibração longitudinal, ponto 4.2.4 do presente trabalho. A aplicação do MTG requer a selecção da espécie do toro, a introdução do peso, dimensões de uma secção rectangular com área igual à área da secção transversal do toro, e o teor de água. Com todos os dados inseridos e o toro colocado de modo a estar simplesmente apoiado (Figura 4.8) o equipamento foi encostado a um dos topos do toro e premido o botão que faz disparar uma esfera interior provocando a vibração. Com base nos parâmetros da onda gerada o módulo de elasticidade dinâmico é determinado e apresentado no mostrador do MTG.



Figura 4.8 – Equipamento de vibração longitudinal, *Timber Grader* MTG, e sistema de apoio dos toros

Os valores do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{din,vi}$ ) e da frequência própria de vibração ( $f$ ), para as amostras em estudo, são apresentados na Tabela 4.14. Os coeficientes de correlação obtidos entre estas propriedades dinâmicas ( $E_{din,vi}$  e  $f$ ) e as propriedades mecânicas dos toros, para as amostras em estudo, são apresentados na Tabela 4.15. Comparando os valores do módulo de elasticidade dinâmico com os valores do módulo de elasticidade estático, verifica-se que o módulo de dinâmico foi, em média, 7,6% inferior ao módulo de elasticidade estático local e 7,4% inferior ao módulo de elasticidade global. De referir que o torneamento dos toros originou uma redução média no módulo de elasticidade dinâmico de 13,0%.

Tabela 4.14 – Frequência própria de vibração ( $f$ ) e módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{\text{din,vl}}$ ) das amostras de toros

Valor	Amostra Centro		Amostra Norte		Amostra de toros torneados	
	$E_{\text{din,vl}}$ (GPa)	$f$ (Hz)	$E_{\text{din,vl}}$ (GPa)	$f$ (Hz)	$E_{\text{din,vl}}$ (GPa)	$f$ (Hz)
Médio	11,9	980,4	11,4	948,9	9,9	873,6
Mínimo	7,6	708,0	8,6	839,0	6,1	688,0
Máximo	20,3	1205,0	15,5	1049,0	14,7	1077,0
Desvio padrão	2,0	138,5	1,6	42,5	1,9	73,3
$N$	70	70	50	50	40	40

Tabela 4.15 – Coeficientes de correlação entre as propriedades dinâmicas ( $E_{\text{din,vl}}$  e  $f$ ) e as propriedades mecânicas das amostras de toros

Amostra	$f_m$	$f_{c,0}$	$E_{\text{local}}$	$E_{\text{global}}$
Correlação com o $E_{\text{din,vl}}$				
Centro	0,72	0,70	0,85	0,82
Norte	0,75	0,59	0,67	0,61
Toros torneados	0,74	0,69	0,71	0,78
Correlação com $a f^2$				
Centro	0,12	0,21	0,37	0,42
Norte	0,64	0,53	0,61	0,62
Toros torneados	0,50	0,31	0,45	0,52

Analisando a Tabela 4.15 verifica-se que as correlações com o  $E_{\text{din,vl}}$  são superiores às obtidas usando somente o  $f^2$ , esta diferença é significativa na amostra de toros do Centro. Para além disso, os coeficientes de correlação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico são superiores na amostra do Centro, passando-se o mesmo com a resistência à compressão. No caso da resistência à flexão os coeficientes de correlação são similares para as amostras em estudo. Em estudo anterior (Morgado *et al.*, 2010), com madeira de secção circular de Pinheiro bravo, foi obtido semelhante coeficiente de correlação com a resistência à flexão e um coeficiente de correlação de 0,76 com o módulo de elasticidade local.

Para melhor correlacionar o módulo de elasticidade dinâmico, tal como efectuado anteriormente para o módulo de elasticidade estático, foram considerados vários parâmetros através de uma regressão linear múltipla, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.16. Nesta análise foi possível obter correlações superiores. Os parâmetros considerados foram os usados em regressões lineares múltiplas anteriores, pelas mesmas razões.

Da análise da Tabela 4.16 verifica-se que o módulo de elasticidade dinâmico e o diâmetro dos nós, em percentagem do diâmetro mínimo do toro, são o par de características que possuem a melhor correlação ( $r=0,83$ ) com a resistência à flexão, em semelhança ao obtido anteriormente para o módulo de elasticidade estático. Quando se consideram todos os parâmetros existem melhorias na previsão da resistência ( $r=0,86$ ). Da análise destes resultados verifica-se não ser significativo o aumento no coeficiente de correlação obtido ao considerar



mais que um parâmetro. O referido para a resistência à flexão é válido para a resistência à compressão, no entanto com coeficientes de correlação menores.

Analisando os resultados referentes à amostra de toros do Norte, constata-se, novamente, que o módulo de elasticidade dinâmico e a massa volúmica possuem a melhor correlação ( $r=0,82$ ) com a resistência à flexão, semelhante à obtida em estudo anterior (Morgado, 2008). Quando se consideram todos os parâmetros existem melhorias na previsão da resistência ( $r=0,88$ ), mas, e à semelhança da amostra do Centro, o aumento no coeficiente de correlação não justifica o cálculo de todos os parâmetros. Estas observações são igualmente válidas para a resistência à compressão.

Tabela 4.16 – Previsão da resistência das amostras de toros usando o  $E_{din,vl}$  numa regressão linear múltipla

Modelo	Amostra Centro		Amostra Norte		Parâmetros do modelo						
	R		R		$E_{din,vl}$	Desvio do fio	Adelgaçamento	Nós	Massa volúmica	Taxa de crescimento	Lenho juvenil
	$f_m$	$f_{c,0}$	$f_m$	$f_{c,0}$							
1	0,72	0,7	0,75	0,59							
2	0,74	0,72	0,77	0,63	x						
3	0,73	0,72	0,79	0,62			x				
4	0,83	0,73	0,71	0,65				x			
5	0,78	0,72	0,82	0,72					x		
6	0,79	0,71	0,79	0,61						x	
7	0,78	0,71	0,85	0,68							x
8	0,86	0,78	0,88	0,76	x	x	x	x	x	x	x

### 4.3.3 Ultrasons

A avaliação não destrutiva por meio de ultrasons foi efectuada com recurso ao *Pundit Plus* (Figura 4.9). Este equipamento é constituído por duas sondas, uma para emissão de sinal e uma outra para recepção, fornecendo como leitura o tempo que a onda demora a percorrer o toro.



Figura 4.9 – Equipamento de ultra sons, *Pundit Plus*

O procedimento seguido passou pela colocação do toro sobre dois blocos de madeira (Figura 4.10), sendo necessárias duas pessoas a exercer pressão com as sondas nos topos do toro. Entre as sondas e os topos foi colocado gel para permitir uma melhor estabilidade nas leituras.



Figura 4.10 – Execução do método dos ultrasons

A velocidade de onda  $C$  foi considerada como a média das primeiras cinco leituras. O módulo de elasticidade dinâmico foi estimado com base no exposto anteriormente no ponto 4.2.3. Foram estudados dois casos, considerando a massa volúmica da rodela isenta de nós retirada do toro após o ensaio de flexão e a massa volúmica estimada de todo o toro, (usando peso e volume de todo o toro). Os valores do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{\text{din,us}}$ ) e da velocidade da onda ( $C$ ), para as amostras em estudo, são apresentados na Tabela 4.17. Os coeficientes de correlação obtidos, para as amostras em estudo, são apresentados na Tabela 4.19 e na Tabela 4.19. O módulo de elasticidade dinâmico das peças de madeira limpa (ML) também foi determinado, de modo a verificar a influência dos defeitos na eficácia do método dos ultrasons.

Tabela 4.17 – Velocidade da onda ultrasónica ( $C$ ) e módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{\text{din,us}}$ ) dos toros

Valor	Amostra Centro			Amostra Norte			Amostra toros torneados		
	$E_{\text{din,us}}$ (GPa)		$C$ (m/s)	$E_{\text{din,us}}$ (GPa)		$C$ (m/s)	$E_{\text{din,us}}$ (GPa)		$C$ (m/s)
	1)	2)		1)	2)		1)	2)	
Médio	14,44	14,29	5,17	13,87	13,76	5,14	11,71	12,12	4,85
Mínimo	10,00	8,96	4,38	9,65	10,24	4,70	6,86	7,54	4,17
Máximo	24,41	24,69	6,34	18,60	18,57	5,62	16,24	17,29	5,60
Desvio padrão	2,43	2,57	0,30	2,14	1,95	0,21	2,26	2,27	0,31
$N$	40	70	70	40	50	50	40	40	40

1)  $E_{\text{din,us}}$  obtido usando a massa volúmica de uma rodela do toro isenta de nós

2)  $E_{\text{din,us}}$  obtido usando a massa volúmica estimada de todo o toro

Da análise da Tabela 4.17 constata-se que a diferença entre o módulo de elasticidade dinâmico determinado usando a massa volúmica de uma rodela isenta de nós do toro e o obtido usando a massa volúmica estimada do toro é desprezável. Comparando os valores do módulo de elasticidade dinâmico com o estático, verifica-se que o módulo de dinâmico foi, em média, 11,1% superior ao módulo de elasticidade estático local e 11,8% superior ao

módulo de elasticidade global. De referir que o torneamento dos toros originou uma redução no módulo de elasticidade dinâmico de 11,1%.

Tabela 4.18 – Coeficientes de correlação entre a  $C$  medida nos toros e nas peças de madeira limpa (ML) e as suas propriedades mecânicas

Amostra	$f_m$	$f_{c,0}$	$E_{local}$	$E_{global}$
Centro	0,34	0,49	0,54	0,56
Norte	0,74	0,38	0,74	0,67
Toros torneados	0,51	0,20	0,49	0,57
ML Centro	0,59	0,39	-	0,74
ML Norte	0,37	0,17	-	0,82

Tabela 4.19 – Coeficientes de correlação entre o  $E_{din,us}$  dos toros e das peças de madeira limpa (ML) e as suas propriedades mecânicas

Amostra		$f_m$	$f_{c,0}$	$E_{local}$	$E_{global}$
Centro	$E_{din,us}$	0,74	0,70	0,85	0,82
Norte		0,80	0,53	0,71	0,62
Toros torneados	$(\rho_{toro})$	0,68	0,55	0,67	0,75
Centro	$E_{din,us}$	0,80	0,71	0,90	0,88
Norte		0,87	0,63	0,76	0,68
Toros torneados	$(\rho)$	0,68	0,49	0,63	0,72
ML Centro	$E_{din,us}$	0,86	0,80	-	0,95
ML Norte		0,80	0,69	-	0,95

Da análise da Tabela 4.18 e da Tabela 4.19 verifica-se que usando apenas a velocidade de onda  $C$  foram obtidos coeficientes de correlação, em geral, inferiores aos obtidos usando o módulo de elasticidade dinâmico, sendo a diferença mais notória no módulo de elasticidade estático da amostra do Centro. No entanto, na amostra do Norte os coeficientes de correlação obtidos usando o módulo de elasticidade dinâmico são apenas ligeiramente superiores aos obtidos usando somente a velocidade  $C$ .

Da Tabela 4.19 verifica-se que não existe uma diferença substancial ao usar a massa volúmica estimada do toro ou ao usar a massa volúmica da rodela desse toro isenta de nós, ainda que usando esta ultima se tenham obtido coeficientes de correlação ligeiramente superiores. No entanto a determinação da massa volúmica estimada do toro é mais expedita.

A aplicação do método dos ultrasons às peças de madeira limpa dos toros, Tabela 4.19, revelou coeficientes de correlação superiores aos obtidos na sua aplicação aos elementos estruturais, sobressaindo o coeficiente de correlação de 0,95 entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico. Estes coeficientes de correlação mais elevados são justificados pelo menor tamanho das peças e pela ausência de defeitos.

Para melhor correlacionar o módulo de elasticidade dinâmico, tal como efectuado anteriormente para o método da vibração, foram considerados vários parâmetros através de uma regressão linear múltipla, Tabela 4.16. Nesta análise, como seria de esperar, foi possível obter coeficientes de correlação superiores. Os parâmetros considerados foram os usados em regressões lineares múltiplas anteriores.

Tabela 4.20 – Previsão da resistência das amostras de toros usando o  $E_{din,us}$  numa regressão linear múltipla

Modelo	Amostra Centro		Amostra Norte		Parâmetros do modelo						
	$f_m$	$f_{c,0}$	$f_m$	$f_{c,0}$	$E_{din,us}$	Desvio do fio	Adelgaçamento	Nós	Massa volúmica	Taxa de crescimento	Lenho juvenil
1	0,65	0,7	0,87	0,63							
2	0,73	0,7	0,87	0,65		x					
3	0,65	0,7	0,89	0,65			x				
4	0,76	0,71	0,87	0,66				x			
5	0,76	0,72	0,87	0,7					x		
6	0,75	0,7	0,87	0,64						x	
7	0,74	0,71	0,87	0,66							x
8	0,86	0,74	0,90	0,76		x	x	x	x	x	x

Da análise da Tabela 4.16 verifica-se que o módulo de elasticidade dinâmico e o diâmetro dos nós, em percentagem do diâmetro mínimo do toro, ou a massa volúmica, são o par de características que possuem a melhor correlação ( $r=0,76$ ) com a resistência à flexão. Quando se consideram todos os parâmetros existem melhorias na previsão da resistência ( $r=0,86$ ). Da análise destes resultados verifica-se, mais uma vez, que o aumento no coeficiente de correlação obtido ao considerar mais que um parâmetro não justifica o cálculo de todos os parâmetros. O referido para a resistência à flexão é válido para a resistência à compressão, no entanto com coeficientes de correlação menores.

Analisando os resultados referentes à amostra de toros do Norte, constata-se que módulo de elasticidade dinâmico e o adelgaçamento possuem a melhor correlação ( $r=0,89$ ) com a resistência à flexão. Quando se consideram todos os parâmetros, existem melhorias na previsão da resistência ( $r=0,90$ ) mas o aumento no coeficiente de correlação não justifica o cálculo de todos os parâmetros, uma vez que usando somente o  $E_{din}$  é obtido um coeficiente de correlação de 0,87. Estas observações são igualmente válidas para a resistência à compressão.

#### 4.3.4 Análise das técnicas de avaliação não destrutiva

Neste estudo foram aplicados três métodos de avaliação não destrutiva das propriedades mecânicas de toros de madeira de secção circular de Pinheiro bravo. Um método de avaliação visual e dois métodos de avaliação mecânica, vibração e ultrasons.

A avaliação visual mostrou ser um método prático e rápido, requerendo apenas a determinação do adelgaçamento e menor diâmetro do toro, bem como o maior desvio do fio, taxa de crescimento e diâmetro do maior nó. A aplicação da proposta de classificação visual sugerida em estudo anterior mostrou-se ser eficaz e segura, mas demasiado restritiva em termos de limites impostos às características visuais, pelo menos no que respeita aos toros do presente estudo.

O método de vibração longitudinal com recurso ao equipamento *Timber Grader* MTG mostrou-se, em termos de facilidade de aplicação, superior ao método dos ultrasons, aplicado com recurso ao *Pundit Plus*, exigindo apenas uma pessoa.

Comparando os módulos de elasticidade dinâmico, obtido pelos dois métodos, verificou-se que o valor obtido pelo método de ultrasons foi, em média, 17,1% superior. Relativamente aos coeficientes de correlação com as propriedades mecânicas, a comparação é apresentada na Tabela 4.21, verificando-se não existir um ascendente significativo de um dos equipamentos. Assim, dos dois equipamentos de avaliação não destrutiva aqui estudados, e tendo em conta o que foi exposto, o MTG mostra-se o mais adequado para classificar toros de Pinheiro bravo.

Tabela 4.21 – Comparação dos coeficientes de correlação entre o  $E_{din}$  obtidos pelos dois equipamentos e as propriedades mecânicas dos toros

Amostra		$f_m$	$f_{c,0}$	$E_{local}$	$E_{global}$
Centro		0,72	0,70	0,85	0,82
Norte	$E_{din,vi}$	0,75	0,59	0,67	0,61
Toros torneados		0,74	0,69	0,71	0,78
Centro		0,80	0,71	0,90	0,88
Norte	$E_{din,us}$	0,87	0,63	0,76	0,68
Toros torneados		0,68	0,49	0,63	0,72

#### 4.4 Conclusões

Neste capítulo procedeu-se à avaliação não destrutiva das amostras de madeira de secção circular de Pinheiro bravo com recurso à sua avaliação visual e mecânica, esta última com recurso vibração e ultrasons.

A avaliação visual revelou-se rápida e eficaz, e consistiu na determinação de determinadas características visuais dos toros e na aplicação dos limites impostos por uma anterior proposta de classificação, sendo assim as amostras classificadas em duas classes de qualidade. A classificação visual efectuada resultou na rejeição de 34 toros do total de 80 que compõem a amostra conjunta deste presente estudo. O motivo da maioria das rejeições deveu-se aos limites impostos para a taxa de crescimento. De modo a tornar o processo de classificação mais eficaz é sugerido, devido ao reduzido número de toros alocados à classe superior, a redução do número de classes de qualidade de duas para apenas uma e o aumento do limite imposto à taxa de crescimento.

A avaliação mecânica consistiu na determinação do módulo de elasticidade dinâmico, por meio de vibração longitudinal, recorrendo ao equipamento MTG, e por meio de ultrasons no campo ultrasónico, usando o equipamento *Pundit Plus*. Verificou-se que o módulo de elasticidade dinâmico obtido por vibração longitudinal foi, em média, inferior ao estático, enquanto o módulo de elasticidade dinâmico obtido por ultrasons, foi, em média, superior. Os dois métodos apresentaram semelhantes coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e as propriedades mecânicas dos toros, entre 0,61 e 0,90. Não existindo diferenças significativas entre os coeficientes de correlação obtidos para os toros torneados e não torneados. Dos equipamentos testados, o MTG revelou-se o mais prático, por requerer apenas uma pessoa para realizar a avaliação.

Foi estudada a possibilidade de usar o módulo de elasticidade dinâmico juntamente com outras propriedades, por meio de regressões lineares múltiplas, de modo a melhorar os coeficientes de correlação. Desse estudo constatou-se que o incremento no coeficiente de correlação não justificava o uso de mais parâmetros para além do módulo de elasticidade dinâmico.

# MODELAÇÃO

---

## 5.1 Introdução

Ferramentas que permitam a geração de toros virtuais, baseada na distribuição estatística de determinadas características visuais e físicas, e estimar as suas propriedades mecânicas são de grande utilidade para a indústria, na medida em que permitem prever a qualidade da madeira de secção circular que um povoamento florestal pode fornecer. Com esta finalidade em mente, neste capítulo procedeu-se ao desenvolvimento do algoritmo SIMPOLE (*SIMulator of POLES*) que possibilita efectuar a modelação de toros de Pinheiro bravo, com o objectivo de estimar as suas propriedades mecânicas, nomeadamente o módulo de elasticidade e a resistência à flexão. Na estrutura do SIMPOLE foram considerados dois módulos distintos.

Um dos módulos é o responsável pela geração da geometria do toro, massa volúmica e distribuição de nós ao longo do seu comprimento. Para a geração destas características tem-se por base as distribuições estatísticas a elas associadas, obtidas com base em medições efectuadas. É igualmente possível ao utilizador inserir valores para as características, em lugar de serem geradas, de modo a ser possível estudar troncos reais. O toro é posteriormente dividido em troços de madeira limpa e em troços de madeira com nós. A cada um desses troços são atribuídos valores de resistência à flexão e de módulo de elasticidade, em função da massa volúmica desses troços. No caso de troços com nós, as propriedades mecânicas desses troços são penalizadas com base nas características dos nós existentes.

O último módulo permite a determinação da resistência à flexão e do módulo de elasticidade do toro gerado ou inserido no módulo anterior. Para tal, o toro é modelado como sendo um elemento constituído por troços justapostos com determinadas propriedades mecânicas, segundo o esquema de ensaio da norma EN 14251, para ensaio como viga simplesmente apoiada, ou da norma EN 14229, para ensaio como viga encastrada. Durante o processo de determinação da resistência à flexão é identificada a zona e a causa de rotura.

## 5.2 Modelos para características e propriedades da madeira

O desenvolvimento de um algoritmo que permita, por um lado, simular as características visuais e físicas de toros de madeira de secção circular de Pinheiro Bravo e, por outro, obter as propriedades mecânicas desses mesmos toros, implica um conhecimento profundo das características e do comportamento do material em causa. Nesse sentido foi levada a cabo uma revisão bibliográfica com o intuito de adquirir conhecimento em três frentes:

- características da madeira e possíveis abordagens de modelação;
- estudos sobre a modelação da variabilidade das propriedades mecânicas;
- métodos e estudos sobre a geração aleatória de valores.

### 5.2.1 Características visuais

Os defeitos e a sua influência no comportamento mecânico da madeira de secção circular foram abordados no ponto 3.4 do presente documento. De entre esses defeitos, os nós são aqueles que foram alvo de estudo mais intenso, com várias abordagens de modelação publicadas. Os nós são considerados o defeito mais importante, aquele com mais influência nas propriedades mecânicas, mas também o mais difícil de modelar (Hoffmeyer, 1987). Existem modelos simples, com fácil aplicação em classificação, e modelos complexos, para caracterização detalhada dos efeitos dos nós, tendo em conta as suas propriedades, localização e geometria. Apresentam-se em seguida estudos que se inserem nos tipos de modelos anteriormente descritos.

Samson (1993) desenvolveu um modelo para a estimar a geometria de nós em toros. O modelo requer diversos parâmetros relativamente à forma e posição dos nós. Assumindo uma forma cónica, com o vértice na medula, para a extensão do nó (Figura 5.1) e que a linha da medula corresponde ao eixo z, o modelo permite prever a forma do nó em diversos planos de corte. Estudos feitos com madeira de Casquinha permitiram constatar uma boa precisão deste modelo (Figura 5.2). Potenciais aplicações para este método passam por uma classificação automatizada da madeira serrada ou a reconstrução computadorizada de toros.

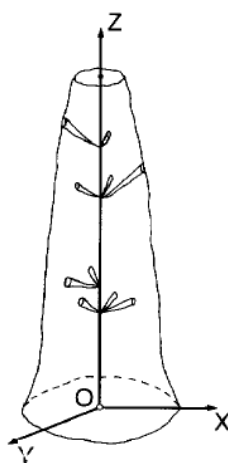


Figura 5.1 – Esquema da modelação dos nós (Samson, 1993)

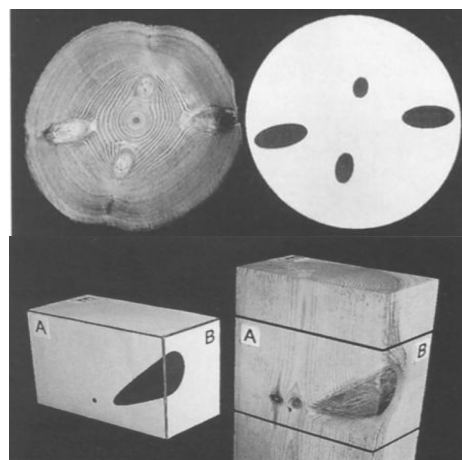


Figura 5.2 – Previsão da forma dos nós segundo um plano de corte (Samson, 1993)



Patzelt e Olbrich (1998) desenvolveram um modelo que permite determinar a redução na resistência à flexão da madeira de secção circular usando o número e diâmetro dos nós. Para a elaboração do modelo, os autores efectuaram ensaios de flexão em 4 pontos, em 200 toros de Espruce provenientes da Áustria, com diâmetros entre 100 e 160mm. Na zona de rotura foi determinada a massa volúmica, o teor de água e medidos o desvio do fio, as fendas e os nós. Das regressões lineares múltiplas efectuadas, os autores constataram que o melhor ajuste aos resultados experimentais foi obtido usando a equação (5.1). Apenas os nós com dimensões superiores a 15mm devem ser contabilizados. A aplicação da expressão a diferentes combinações de número de nós e dimensões dos mesmos é apresentada no gráfico da Figura 5.3.

$$\text{Redução da } f_m \text{ (MPa)} = 0,1543 \times \sum d_{\text{nó}} - 0,0098 \times \sum d_{\text{nó}}^2 \quad (5.1)$$

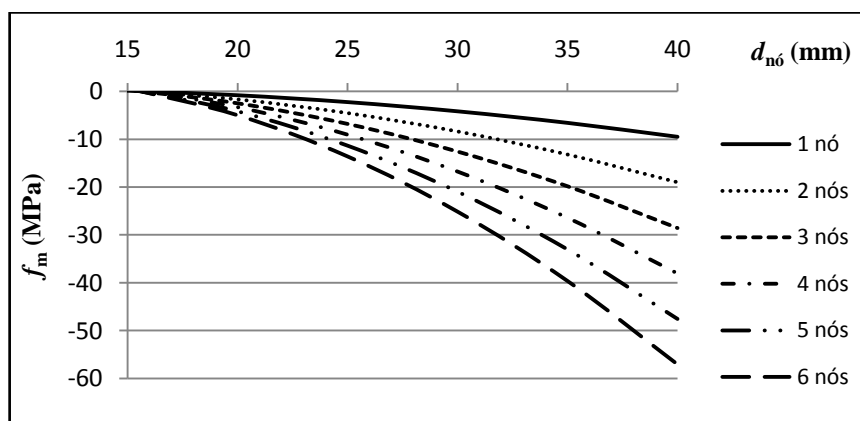


Figura 5.3 – Redução da resistência à flexão devido às características dos nós existentes (adaptado de Patzelt e Olbrich, 1998)

Esta abordagem, apesar de bastante expedita, possui limitações, negligenciando o efeito do posicionamento do nó no tronco. Este factor é relevante, uma vez que o efeito de um nó posicionado na zona de tracção, considerando um ensaio de flexão, é distinto do seu efeito se localizado na zona de compressão.

Xu (2002) desenvolveu um modelo para avaliação do efeito dos nós no módulo de elasticidade longitudinal da madeira estrutural de Pinho-insigne, tendo em conta o efeito do ângulo dos ramos inseridos no tronco e o volume dos nós. No modelo foi assumido que a madeira dos nós possui uma estrutura anisotrópica e que possui um módulo de elasticidade superior ao da madeira limpa. Segundo o autor a madeira em torno dos nós foi tratada como madeira limpa porque:

- não existe diferença significativa entre massa volúmica média dessa zona e a da madeira limpa;
- apesar de existirem variações de rigidez devidas ao desvio do fio, a avaliação desse desvio é complicada devido à elevada variabilidade do desvio do fio na região do nó.

O modelo consistia numa lei de misturas modificada que permitia obter um valor médio da rigidez da madeira limpa, a qual inclui a contribuição da madeira circundante dos nós na rigidez longitudinal. A lei de misturas é um método que permite obter uma estimativa das propriedades de um material compósito, baseando-se na suposição que as propriedades desse material são definidas pela média ponderada, com base no volume, das propriedades de cada um dos seus constituintes. Esta lei é aplicável a compostos com rigidez constante. Assim, o modelo proposto pelo autor para a determinação do módulo de elasticidade de um troço de madeira contendo nós é apresentado na equação (5.2). No caso de agrupamentos de nós a lei de misturas continua a ser aplicável, sendo o módulo de elasticidade do troço estimado com base nos módulos de elasticidade médios de cada um dos volumes existentes.

$$E_1 = E_{lc} V_c + E_{lk} V_k \quad (5.2)$$

Onde:

- $E_1$  -Módulo de elasticidade da mistura de madeira
- $E_{lc}$  -Módulo de elasticidade médio da madeira limpa
- $E_{lk}$  -Módulo de elasticidade médio da madeira dos nós na direcção do fio da madeira
- $V_c$  -Percentagem de volume de madeira limpa no troço de madeira considerado
- $V_k$  -Percentagem de volume de nós no troço de madeira considerado

A parcela  $E_{lk}$  corresponde ao módulo de elasticidade da madeira dos nós convertida para a direcção longitudinal da peça de madeira. Para a sua determinação, o autor definiu a matriz rigidez da madeira dos nós como um material ortotrópico definido por propriedades elásticas, das quais 9 são independentes: módulos de elasticidade, módulos de distorção e coeficientes de Poisson nas direcções radial ( $r$ ), longitudinal ( $l$ ) e tangencial ( $t$ ). Com a matriz rigidez definida segundo o eixo do nó ( $l$ ) o autor procedeu à transposição da matriz para a direcção longitudinal da peça de madeira ( $l'$ ), obtendo desta forma a rigidez da madeira dos nós segundo o eixo da peça de madeira (Figura 5.4).

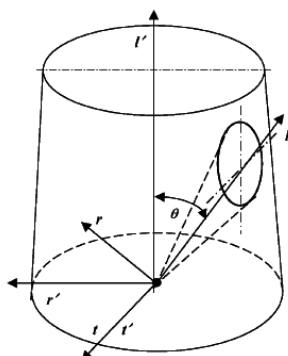


Figura 5.4 – Definição da direcção longitudinal, radial, tangencial e do ângulo de inserção dos ramos (Xu, 2002)

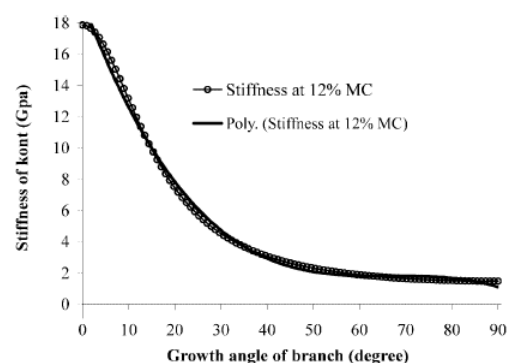


Figura 5.5 – Variação do módulo de elasticidade dos nós segundo o ângulo de inserção dos ramos no tronco (Xu, 2002)

Considerando que a madeira dos nós possui um módulo de elasticidade de 17,88GPa, o autor apresenta a variação do módulo de elasticidade da madeira dos nós segundo o eixo da peça

para ângulos de inserção dos ramos ( $\theta$ ) a variar entre os 0 e 90° (Figura 5.5), a qual pode ser aproximada pela equação (5.3). Para um ângulo de 45° entre o eixo do nó e o eixo da peça o módulo de elasticidade da madeira dos nós reduz para cerca 2,6GPa.

$$E_{lk} = -6 \times 10^{-5} \theta^3 + 0,012 \theta^2 - 0,788 \theta + 19,383 \quad (5.3)$$

O modelo foi validado com 150 amostras de madeira serrada de Pinho-insigne com ângulos de inserção entre 40 e 60°. Devido à dificuldade da medição do volume de nós, foi usado o KAR (*knot area ratio*) na lei de misturas. Os resultados teóricos mostraram bom ajuste com os resultados experimentais. Este tipo de modelação permite uma fácil contabilização do efeito dos nós no módulo de elasticidade. No entanto, e tal como o estudo de Patzelt e Olbrich (1998), negligencia a posição dos nós na secção. Um nó situado ao nível do eixo neutro não possui o mesmo efeito no módulo de elasticidade que um nó situado nas zonas mais solicitadas da secção.

Um dos factores penalizadores dos nós na resistência está relacionado com a concentração de tensões que ocorre em torno deles. A determinação dos factores de concentração de tensão anisotrópicos para determinação do carregamento de rotura foi primeiramente efectuada por Green e Taylor (Hoffmeyer, 1987), apresentando-se na Figura 5.6 os resultados obtidos. Para o caso do esforço de tracção, Figura 5.6a, pode-se observar que o factor de concentração de tensão para  $\theta=90^\circ$  toma o valor de 3 para o material isotrópico e cerca de 6,4 para a madeira de Espruce. Para o caso de esforço transverso, Figura 5.6b, e para a situação de carregamento segundo a direcção do fio, este esforço atinge o máximo de aproximadamente 0,9 no material isotrópico e de cerca de 0,7 no Espruce. A posição de esforço transverso máximo para o Espruce ocorre para  $\theta=80^\circ$  e no material isotrópico para  $\theta=65^\circ$ .

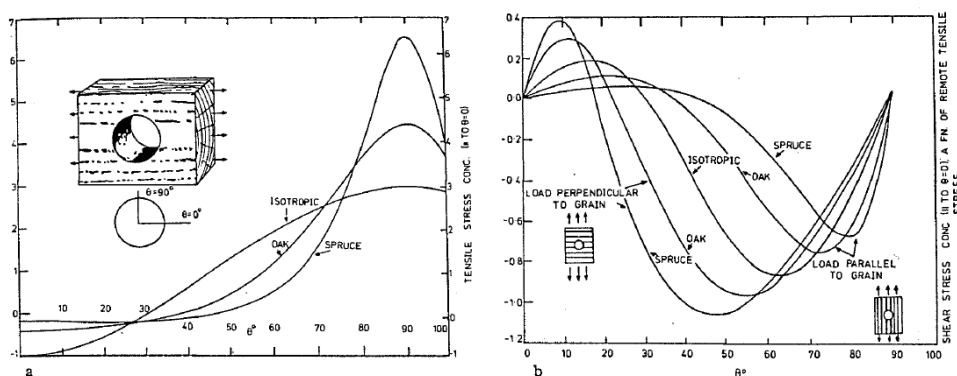


Figura 5.6 – Concentração de tensões segundo a direcção do fio em redor de um buraco em função do ângulo  $\theta$ . a) esforço de tracção, b) esforço de corte (Hoffmeyer, 1987)

No final da década de 70 o Método dos Elementos Finitos já se encontrava bem estabelecido, sendo possível atribuir diferentes propriedades em diferentes direcções, tornando-o, apropriado para aplicação a materiais ortotrópicos, como o caso da madeira. Usando elementos finitos, Goodman e Bodig em 1978 (*apud* Foley, 2003) apresentaram uma expressão matemática para a variação generalizada da direcção do fio em redor dos nós no

plano longitudinal-tangencial (Figura 5.7), a que apelidaram de “*Flow Grain Analogy*”. Nesta abordagem o padrão das fibras é comparado a hipotéticas linhas de fluxo de um fluido que passa ao redor de um obstáculo elíptico.

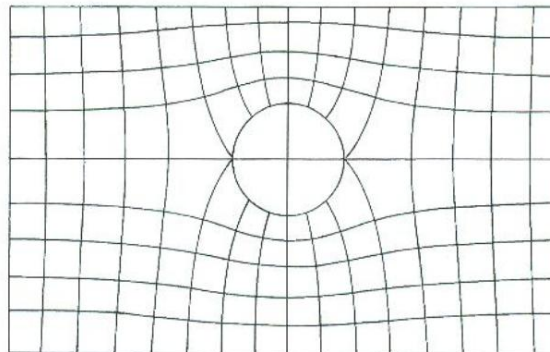


Figura 5.7 – Malha de elementos finitos baseada na *Flow Grain Analogy* (Foley, 2003)

Philips *et al.* (apud Foley, 2003) efectuaram comparações entre o desvio do fio previsto pela “*Flow Grain Analogy*” e o medido em toros contendo nós vivos. Os autores cortaram segmentos de toros longitudinalmente em tiras de 6mm de espessura, onde o diâmetro dos nós variava entre 8 e os 54 mm. Foram estudadas 6 tiras de *Pseudotsuga* e 10 tiras de *Lodge pine*. Os autores encontraram erros médios nos ângulos estimados de 4 a 7 graus, os erros máximos foram de 36 graus para a *Pseudotsuga* e de 20 graus para o caso do *Lodge pine*, com os ângulos previstos a serem, geralmente, inferiores aos reais. Não foi encontrada relação entre o diâmetro do nó e o erro observado.

Franco e Pellicane (1993) ensaiaram e modelaram 9 postes de linhas aéreas, com comprimentos entre 15,24 e 18,29m, representativos de 3 espécies muito usadas na América do Norte (*Western Red Cedar*, *Pseudotsuga* e *Southern Pine*). Os postes foram analisados visualmente, em termos de nós e fio torcido, e ensaiados como consolas até à rotura. De cada um dos postes ensaiados foram obtidos 4 provetes de 610mm de comprimento, de locais uniformemente distribuídos ao longo do comprimento do poste. De cada um destes provetes foram obtidas 3 peças de 25,4x25,4x381mm, localizadas a cada um dos terços do raio, para a determinação da resistência e rigidez local. Desta forma foi obtida a variação destes parâmetros ao longo do comprimento do poste.

Os autores efectuaram a modelação dos postes no programa de elementos finitos *Georgia Tech Structural Design Language* e efectuada uma análise elástica linear, com o objectivo de prever a resistência e a localização da rotura dos postes ensaiados. Na modelação foi tida em conta a influência do fio torcido, dos nós e respectivo fio inclinado e a variação radial e longitudinal das propriedades mecânicas. A modelação do poste foi feita em troços de 457 mm, apresentando-se na Figura 5.8 um esquema da modelação efectuada. No modelo foram tomadas as seguintes suposições (Pellicane e Franco, 1994a e 1994b):

- os postes não apresentavam fendas;
- os nós possuíam rigidez e resistência nulas, quer em tracção quer em compressão;
- as secções constituíam um círculo perfeito;

- os troços de 457mm de comprimento possuíam diâmetro constante, igual ao maior topo desse segmento;
- a madeira possuía um comportamento elástico-linear;
- o desvio do fio era constante no troço de 457mm de comprimento.

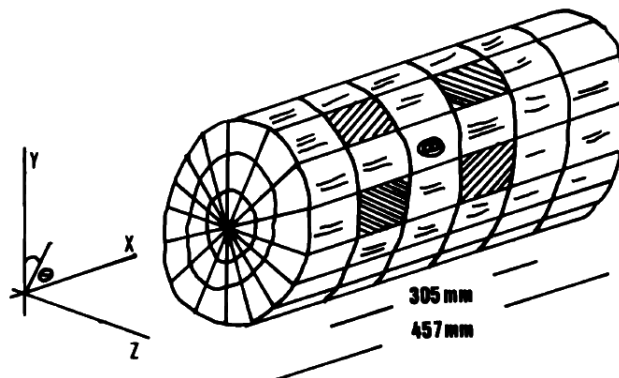


Figura 5.8 – Esquema representativo da modelação de um troço de um poste (Franco e Pellicane, 1993)

No modelo, a presença de nós foi modelada, pelos autores, através de cones emanando da medula, a rigidez do elemento onde surgem foi penalizada pelo rácio entre a largura do elemento, subtraída do diâmetro do nó, e a largura do elemento. O desvio do fio ao redor dos nós foi calculado usando a *Flow Grain Analogy* e foi tido em conta nos quatro elementos mais penalizados pela presença do nó, elementos preenchidos com linhas inclinadas na Figura 5.8. No caso de nós agrupados, os autores consideraram uma sobreposição do desvio do fio na modelação de agrupamentos de nós. O modelo estimou a resistência dos postes com um erro médio de 7%, a localização da rotura foi bem sucedida em 6 dos 9 postes ensaiados.

Para além do referido, os autores, usando a *flow grain analogy*, procederam ao estudo da área em que a orientação das fibras era influenciada pela presença do nó. Desse estudo resultou a equação (5.4). O desvio máximo do fio obtido para um nó de 50,8mm foi de 54,5°. Para as restantes dimensões dos nós verificaram que o desvio máximo do fio podia ser estimado pela equação (5.5).

$$A_{\text{influência do nó}} = 2,742d_{\text{nó}}^2 + 1,753 \quad (5.4)$$

$$\theta = \frac{A_{\text{influência do nó}}}{A_{\text{influência do nó de 50,8mm}}} \times 54,5^\circ \quad (5.5)$$

Cramer e Goodman (1983), usando a metodologia da *Flow Grain Analogy*, calcularam os factores de concentração de tensão como sendo dependentes da posição de um nó circular cujo diâmetro era  $\frac{1}{4}$  da largura da tábua sujeita a tensão. De acordo com a Figura 5.9, os factores de concentração de tensões longitudinais atingem um máximo de cerca de 12 quando existe apenas uma pequena fracção de madeira entre o nó e a extremidade. A concentração

máxima de esforço transversal é observada quando o nó já ultrapassou a extremidade. O estudo mostra que o factor de concentração de tensões para um nó central é inferior ao determinado para um buraco por Green e Taylor (Hoffmeyer, 1987). Este resultados permite afirmar que apesar de o desvio do fio em torno dos nós provocar uma diminuição da resistência, o nó possui mais resistência que um buraco de iguais dimensões.

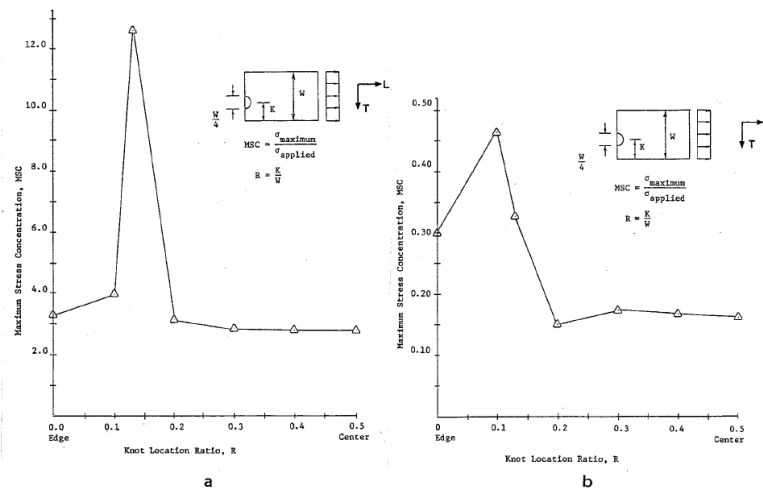


Figura 5.9 – a) Factores de concentração de tensões longitudinais para diversas posições do nó b) factores de concentração de tensões transversais para diversas localizações do nó (Cramer e Goodman, 1983)

Hatayama (*apud* Foley, 2003) apresentou um método empírico que permitia prever a resistência de elementos de madeira serrada com base na inclinação do fio em torno dos nós. O método proposto não tem em conta a concentração de tensões em redor do nó nem a desigual distribuição de esforços devida à excentricidade da secção transversal provocada pela presença de nós.

O autor propôs uma expressão empírica para a variação espacial do ângulo do fio ao longo do desenvolvimento da rotura, em função das características do nó. Trata-se de uma expressão empírica obtida com base na medição da direcção das fibras no plano de rotura de tiras de 2mm de espessura, contendo nós, que foram ensaiadas à tracção. Baseando-se nessas medições o autor chegou à equação (5.6), que relaciona o ângulo do desvio das fibras e as características do nó.

$$\theta = \frac{15\sqrt{N^\phi d_{\text{nó}}}}{\sqrt{x}} - \frac{d_{\text{nó}}}{2} - 5 \quad (5.6)$$

Nesta equação,  $\theta$  (em graus) é o desvio das fibras no plano de rotura de cada tira a uma distância horizontal  $x$  (em cm) do nó. O diâmetro do nó, em cm, é definido como sendo a média das dimensões do nó, medidas na direcção perpendicular ao fio, em ambas as faces da tira.  $N$  é uma constante dependente do tipo de nó ( $0,9 \leq N \leq 1,3$ ). Apesar de não serem apresentados valores de correlação, o autor refere a existência de uma boa correspondência entre os ângulos estimados e os medidos.

Usando a expressão para a variação do ângulo do fio, o autor determinou as constantes da fórmula de Hankinson, que asseguravam o melhor ajuste com a resistência e o módulo de elasticidade obtidos experimentalmente.

O método proposto para a determinação da resistência à compressão e à tracção consiste na divisão dos elementos de madeira em tiras individuais fictícias e na aplicação de sucessivos incrementos de carga até à rotura de todas as tiras (Figura 5.10). A resistência da tira é prevista pela equação de Hankinson para o ângulo da equação (5.6) e para a distância  $x$  da tira ao nó. Os valores de resistência à tracção e à compressão para tiras com os nós foram considerados nulos, salvo o caso de nós vivos onde a resistência à compressão da tira foi considerada como sendo 50% da correspondente à madeira limpa. Quando o esforço excede a resistência de uma tira fictícia, esta é excluída e o carregamento distribuído pelas restantes tiras da secção transversal. Se nenhuma tira entra em rotura, o carregamento é incrementado e o procedimento repetido até que a rotura de todas as tiras seja atingida.

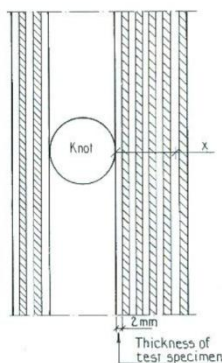


Figura 5.10 – Divisão dos elementos em tiras e definição de  $x$  (Foley, 2003)

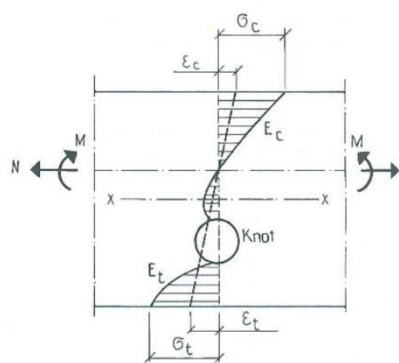


Figura 5.11 – Distribuição das tensões num elemento de madeira com nós sujeito a flexão (Foley, 2003)

Hatayama analisou igualmente elementos à flexão assumindo que a hipótese de Bernoulli era aplicável. Assim, em cada tira fictícia foram determinados os esforços de compressão ou de tracção actuantes, dependendo da sua distância em relação ao eixo neutro, cuja posição foi determinada através de equações de equilíbrio na secção transversal (Figura 5.11).

A resistência à flexão foi determinada aplicando procedimento semelhante ao usado para a determinação da resistência à tracção e à compressão. Assim, quando a tensão de tracção actuante numa tira excedeu a sua resistência o esforço foi reduzido a zero, simulando assim uma rotura por tracção. A tensão actuante nas tiras comprimidas foi mantida constante após a tensão máxima ser atingida, simulando assim comportamento elasto-plástico perfeito. Após a rotura ou plastificação de tiras, a nova posição do eixo neutro foi calculada.

A verificação experimental do modelo foi efectuada em quatro espécies resinosas: Western hemlock, Amabilis fir, Sugi e Akamtsu. O tamanho dos nós variava entre 11 e 63mm nos elementos ensaiados à tracção e flexão, e entre 4 e 53mm para os ensaiados à compressão. Os resultados experimentais obtidos apresentaram boa concordância com os resultados

estimados. O rácio médio entre a resistência à tracção estimada e real, para 55 ensaios de elementos com dimensões de 90-190x16-20mm, foi de 0,96 com um coeficiente de variação de 12,8%. O rácio médio para os 121 ensaios de compressão foi de 0,99, com um coeficiente de variação de 8,4%. No caso dos elementos ensaiados à flexão, com dimensões de 90-240x32-40, foram obtidos rácios médios de 0,91, com um coeficiente de variação de 17,2%.

Em termos de geração de características visuais, Winn *et al.* (2004) desenvolveram o programa ALOG (Artificial LOG Generator) em Microsoft<sup>®</sup> Excel para geração aleatória de toros para uso como input em programas de simulação de serração. A vantagem deste tipo de amostragem face à selecção aleatória de toros em base de dados é a garantia de que cada toro obtido é único, uma vez que a probabilidade de se gerarem dois toros iguais é muito pequena. A geração de toros e seus defeitos seguia o seguinte processo:

- definição da posição do toro na árvore e a sua classe, estes parâmetros podem ser inserido pelo utilizador ou definidos aleatoriamente pelo programa;
- geração do diâmetro, comprimento, adelgaçamento e curvatura do toro;
- geração da quantidade e dimensão, com base nas distribuições estatísticas dos defeitos, e posicionamento radial e longitudinal dos seguintes defeitos: gomo dormente, distorção da casca, nó incluso, nó firme e nó solto;
- determinação das características internas dos defeitos, nomeadamente o ângulo com a medula, profundidade e volume. Estas características são obtidas com base em correlações com o diâmetro do toro e as características externas geradas na etapa anterior.

Este programa não permite, no entanto, estimar as propriedades mecânicas dos toros gerados ou das tábuas a que podem dar origem.

### 5.2.2 Propriedades mecânicas

O valor da resistência da madeira resulta, sobretudo, da influência da massa volúmica, desvio do fio e lenho de reacção, sendo as quedas na resistência devidas a nós (Hoffmeyer, 1987). A distribuição dos nós depende da espécie e do crescimento particular de cada árvore.

Riberholt e Madsen (1979) propuseram um modelo para ter em conta a variação da resistência ao longo de uma viga de madeira. Os autores consideraram que a resistência ao longo da viga era constante, excepto quando ocorriam defeitos, como por exemplo nós ou fio inclinado (Figura 5.12). A resistência entre nós era regida pelas propriedades da madeira limpa, as quais foram assumidas como uniformes ao longo do comprimento. Na zona dos defeitos a resistência dependia do tamanho dos nós e da inclinação das fibras.

A resistência das secções sem defeitos era descrita por uma variável estocástica, a ocorrência de defeitos por um processo de Poisson, e a resistência das secções com defeitos por uma outra variável estocástica.



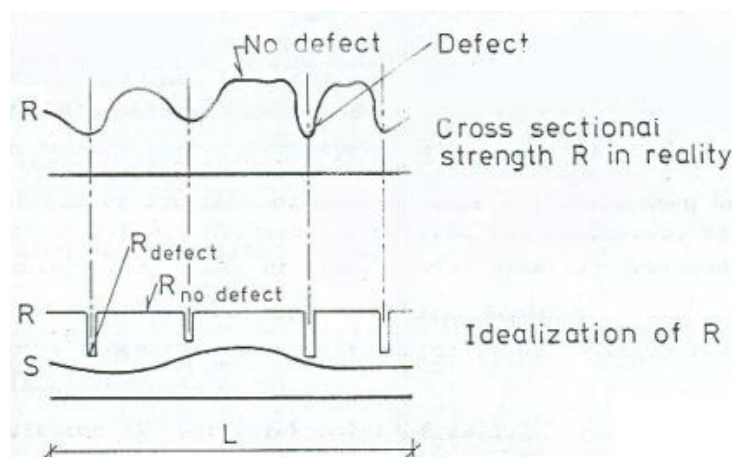


Figura 5.12 – Resistência (R) de uma viga sujeita a um esforço S (Riberholt e Madsen, 1979)

A resistência de uma zona aleatória com defeitos pode ser estimada por dois métodos. O primeiro método é baseado na suposição de que a resistência das secções com nós é estocasticamente independente, podendo a FDA (função distribuição acumulada) ser estimada com base na resistência obtida em ensaios, ou seja, a resistência da secção mais fraca da peça. No segundo método a resistência de cada secção com defeitos é obtida por meio de regressões lineares múltiplas usando o tamanho e dimensão dos nós, taxa de crescimento e massa volumica. A função distribuição acumulada é, desta forma, estimada com base em medições indirectas da resistência.

A distância entre defeitos e o seu número, tal como referido anteriormente, eram descritas por um processo de Poisson com intensidade constante ao longo da viga. Assim, a distância  $x$  entre duas secções com defeitos pode ser definida a partir da função de distribuição exponencial indicada na equação (5.7). O número de secções com defeitos  $n$ , num comprimento  $L$ , seguia uma distribuição de Poisson de parâmetro  $\lambda L$ , equação (5.8). A intensidade  $\lambda$  é definida pelo valor médio das distâncias medidas entre defeitos ou pelo número médio de defeitos numa distância  $L$ .

$$h(x,1) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

$$f(n) = \frac{\lambda L^n}{n!} e^{-\lambda L} \quad (5.8)$$

Czmoch *et al.* (1991) consideraram um modelo semelhante ao anterior para a modelação da variabilidade da resistência à flexão ao longo do comprimento de madeira estrutural. Foi assumido que:

- a madeira é composta por zonas fracas ligadas por secções de madeira limpa;
- as zonas fracas correspondem a zonas com nós ou grupos de nós e são aleatoriamente distribuídas;
- a rotura acontece apenas no centro das zonas fracas;
- a resistência das zonas fracas é aleatória.

A variação da resistência ao longo do elemento de madeira foi modelada atribuindo um valor de resistência às zonas de madeira limpa e às zonas fracas, aleatoriamente distribuídas. A rotura ocorre sempre nas zonas fracas, devido ao distúrbio provocado na direcção do fio, à concentração de tensões e à diferença entre as propriedades do nó e da madeira circundante. O modelo necessitava dos seguintes dados:

- distribuição estatística da distância da primeira zona fraca;
- correlação e distribuição estatística da distância entre zonas fracas;
- correlação e distribuição estatística da resistência das zonas fracas.

Segundo os autores, a distribuição estatística da resistência das zonas fracas é o parâmetro para o qual não existem valores de referência. Ensaio de tracção conduzidos por Lam e Varuglu (1991) sugerem que apenas secções afastadas de, pelo menos, 1,83 m podem ser consideradas estatisticamente independentes. Assim, Czmocho *et al.* (1991) efectuaram uma análise de sensibilidade de modo a avaliar a influência da suposição de as zonas fracas serem estatisticamente independentes, tal como admitido no modelo de Riberholt e Madsen (1979). Da análise, os autores concluíram que essa suposição era admissível na obtenção da distribuição estatística da resistência das zonas fracas.

Isaksson (1999) apresentou um modelo estatístico para modelação da variabilidade da resistência à flexão de peças de madeira. O modelo tem por base a proposta de Riberholt e Madsen (1979), considerando que a peça de madeira é composta por zonas com defeitos ligadas por segmentos de madeira limpa.

No modelo, a resistência à flexão inter- e intra-elementos foi considerada independente da distância entre secções, sendo obtida por meio de relações lag-K. A correlação lag-K é uma correlação entre uma observação e uma outra a K intervalos. Por exemplo, se existir correlação lag-2 significa que existe uma correlação significativa entre o primeiro e o terceiro troço e entre o segundo e o quarto troço. O modelo desenvolvido tem como variáveis aleatórias:

- distância entre secções com defeitos, seguindo uma distribuição Gamma ( $\eta, \lambda$ );
- comprimento das secções com defeitos. Este parâmetro foi considerado de 3 formas:
  - i) igual a 150mm, ii) seguindo uma distribuição Beta ( $\gamma, \eta$ ) ou iii) como sendo igual à soma de metade da distância entre duas secções com defeitos adjacentes. Neste último caso deixam de existir secções de madeira limpa;
- resistência à flexão de secções com defeitos, obtida por meio de distribuições normais;
- resistência à flexão entre as secções com defeitos. Esta foi obtida de duas formas: usando o valor da resistência da secção com defeitos mais resistente ou usando correlações com a secção mais fraca.

Da aplicação do modelo obtém-se o perfil de resistência ao longo da viga, sendo a resistência à flexão obtida pelo carregamento máximo que a viga pode suportar, ou seja, até ser igualada

a resistência à flexão de uma zona com defeitos. O autor concluiu que o comprimento das secções com defeitos não era relevante.

Pellicane (1984) estudou a possibilidade de estimar a distribuição de probabilidade da resistência à flexão com base na distribuição de probabilidade do módulo de elasticidade. A distribuição estatística de base foi a Johnson's  $S_b$ . Estudos em madeira serrada revelam que esta distribuição de probabilidade é a que melhor se ajusta à distribuição estatística do módulo de elasticidade e da resistência à flexão (Pellicane, 1985).

O procedimento seguido pelo autor encontra-se representado na Figura 5.13. Assim, é efectuada a amostragem aleatória dos módulos de elasticidade ( $B_1, B_2, B_3$  e  $B_4$ ), considerando para o efeito a sua função distribuição de probabilidade, e obtidas as correspondentes distribuições de probabilidade ( $C_1, C_2, C_3$  e  $C_4$ ) para a resistência à flexão, por meio de um modelo estatístico que correlaciona as duas propriedades mecânicas. A função densidade de probabilidade da resistência à flexão é determinada com base na soma ou integração das funções densidade de probabilidade obtidas para cada valor do parâmetro não destrutivo. Actualmente, existem vários métodos de amostragem implementados em simulações estatísticas. Grande parte desses métodos é baseada em geradores de números aleatórios. No entanto, nesses métodos, a amostragem de valores nem sempre é proporcional à probabilidade de ocorrência. Assim, o autor optou por implementar no modelo um sistema de amostragem estratificada (Pellicane, 1983). Este sistema representa uma melhoria face aos métodos baseados em geradores de números aleatórios ao permitir gerar valores exactamente segundo a sua probabilidade de ocorrência.

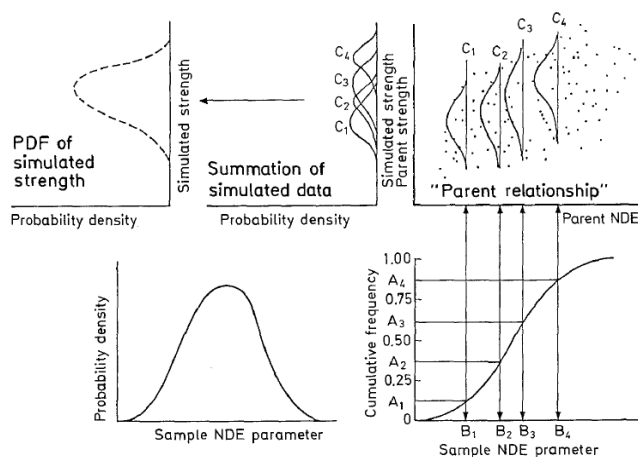


Figura 5.13 – Esquema do processo de simulação (Pellicane, 1984)

Para verificação do modelo, Pellicane (1984) efectuou a simulação da função densidade de probabilidade da resistência à flexão, com base na distribuição do módulo de elasticidade, de 418 peças de 50,8x101,6mm de Pseudotsuga. A distribuição obtida apresentou um excelente ajuste relativamente à distribuição da resistência à flexão experimental.

Em termos de simulação do módulo de elasticidade, Kline *et al.* (1986) desenvolveram um modelo para gerar a variabilidade desta propriedade ao longo do comprimento de madeira serrada de Western hemlock. Para obtenção da distribuição estatística do módulo de elasticidade, os autores efectuaram a medição desta propriedade em troços de 762mm de vigas de madeira. Foi considerada a correlação entre os módulos de elasticidade dos troços através de correlações Lag-K. As melhores correlações foram obtidas para relações Lag-1 e Lag-2. Os valores do módulo de elasticidade, correlacionados em troços de 762mm, foram gerados segundo o seguinte procedimento:

- uso de um modelo de segunda ordem de Markov, equação (5.9), para geração de módulos de elasticidade em troços de 762mm, preservando as relações Lag-1 e Lag-2;
- cálculo da média dos módulos de elasticidade da peça;
- obtenção do rácio entre os módulos de elasticidade gerados e a média obtida no ponto anterior;
- geração de um módulo de elasticidade segundo a sua distribuição estatística.
- o módulo de elasticidade final de cada um dos troços de 762 mm é obtido multiplicando os rácios pelo valor aleatório do módulo de elasticidade obtido no ponto anterior.

$$X_{i+1} = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_{i-1} + \dots + \beta_m X_{i-m+1} + \varepsilon_{i+1} \quad (5.9)$$

Onde:

$X_i$  -Módulo de elasticidade do troço  $i$

$\beta_i$  -Coeficientes das correlações Lag-K

$\varepsilon_{i+1}$  -Valor aleatório gerado em função do desvio padrão da distribuição do módulo de elasticidade

## 5.3 Modelo desenvolvido

### 5.3.1 SIMPOLE

No ponto anterior foram encontrados, essencialmente, três tipos de modelos: modelos que permitem a simulação das propriedades mecânicas, modelos que permitem a simulação da variabilidade longitudinal das propriedades mecânicas e, finalmente, modelos que permitem a geração de características visuais de toros. O modelo aqui proposto combina estes três tipos de modelos, permitindo, assim, a geração de toros virtuais e a determinação das suas propriedades mecânicas.

O modelo criado, SIMPOLE (SIMulation of POLEs), foi desenvolvido em Microsoft® Excel, fundamentalmente em VBA (*Visual Basic for Applications*). Trata-se de um modelo matemático e probabilístico assente em simulações de Monte Carlo que permite obter o módulo de elasticidade e a resistência à flexão de toros de Pinheiro bravo. Na sua estruturação foram considerados dois módulos, um módulo de geração de toros e um módulo respeitante à modelação desses mesmos toros.

No módulo de geração de toros são geradas a geometria do toro, as características físicas e a distribuição de nós. Em termos de geometria são gerados o diâmetro, o adelgaçamento e o

comprimento. Nas características físicas é gerada a massa volúmica do toro e efectuada a sua distribuição ao longo do comprimento. Relativamente aos nós, são gerados o seu número, diâmetro e posição na secção transversal de cada secção com nós, e o espaçamento longitudinal entre secções com nós. Estas características também podem ser inseridas pelo utilizador, de modo a ser possível trabalhar com características de toros concretos. Posteriormente os toros são discretizados em troços de madeira limpa e em troços de madeira com nós, e atribuídos a cada um desses troços valores de resistência à flexão e módulo de elasticidade, através de relações estatísticas com a massa volúmica desses troços. No caso de troços com nós é efectuada a aplicação de penalizações tendo em conta a configuração de nós existente.

No módulo de ensaio de toros procede-se à determinação do módulo de elasticidade e resistência à flexão dos toros gerados/inseridos no módulo anterior. Neste módulo procede-se à modelação do toro como sendo um elemento constituído por secções justapostas com determinadas propriedades mecânicas. Desta modelação obtêm-se o módulo de elasticidade e a resistência à flexão do toro, bem como a localização e causa da rotura. Desta forma, as propriedades mecânicas de uma amostra de toros de uma floresta podem ser estimadas usando a técnica de Monte Carlo (Fisherman, 1996).

A técnica de Monte Carlo permite obter soluções aproximadas para uma determinada variável aleatória através de amostragens efectuadas num computador. O procedimento consiste em obter amostras, neste caso os toros gerados, a partir das quais o valor da variável aleatória é determinado (Figura 5.14), neste caso trata-se das propriedades mecânicas dos toros gerados. O erro  $\varepsilon$  cometido a estimar as propriedades mecânicas com desvio padrão  $\sigma$  e após  $N$  toros gerados é dado pela equação (5.10). O erro é tanto menor quanto maior o número de toros gerados.

$$\varepsilon = \frac{3\sigma}{\sqrt{N}} \quad (5.10)$$

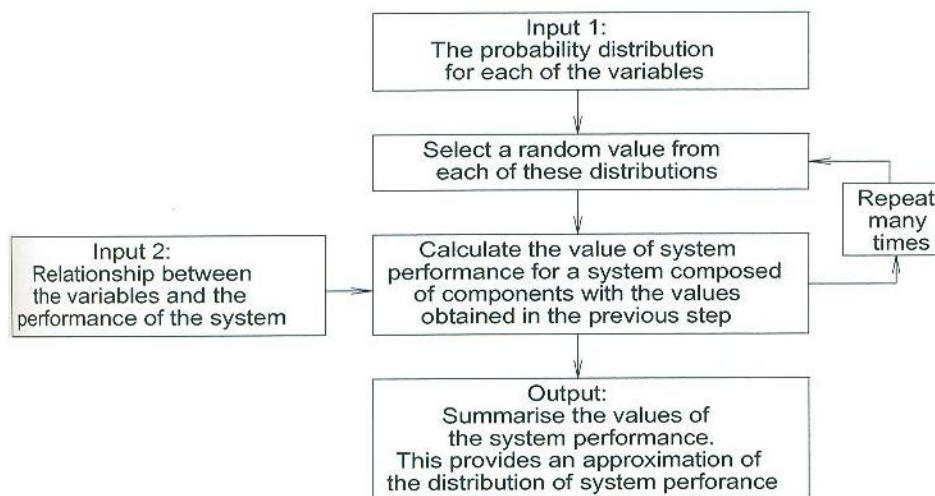


Figura 5.14 – Esquema da técnica de Monte Carlo (Hahn e Shapiro, 1967)

No desenvolvimento do modelo foi necessário admitir algumas simplificações, que a seguir se expõem:

- a forma dos nós foi aproximada por um cone com o vértice no eixo do toro;
- o eixo dos nós é perpendicular ao eixo do toro;
- os eixos dos nós da mesma secção pertencem ao mesmo plano perpendicular ao eixo do toro, Figura 5.15;
- os nós apenas resistem em compressão, não sendo feita distinção entre os diversos tipos de nós;
- a madeira possui comportamento elástico perfeitamente plástico em compressão;
- o módulo de elasticidade e a resistência decrescem uniformemente da base para o topo do toro, em função da massa volúmica, salvo quando ocorrem nós, Figura 5.15;
- as características geométricas, nomeadamente a ovalidade, adelgaçamento e curvatura, não foram consideradas por possuírem fraca correlação com as propriedades mecânicas;
- o efeito das fendas, do lenho de reacção e do lenho juvenil não foi tido em conta, por ser de difícil contabilização;
- os efeitos do desvio do fio e do lenho juvenil encontram-se incluídos nos valores das propriedades mecânicas das peças de madeira limpa;
- a excentricidade provocada na secção por assimetria das propriedades mecânicas, em consequência da presença de nós, não foi considerada;
- a concentração de tensões que se verifica na periferia dos nós não foi considerada no cálculo das tensões actuantes.

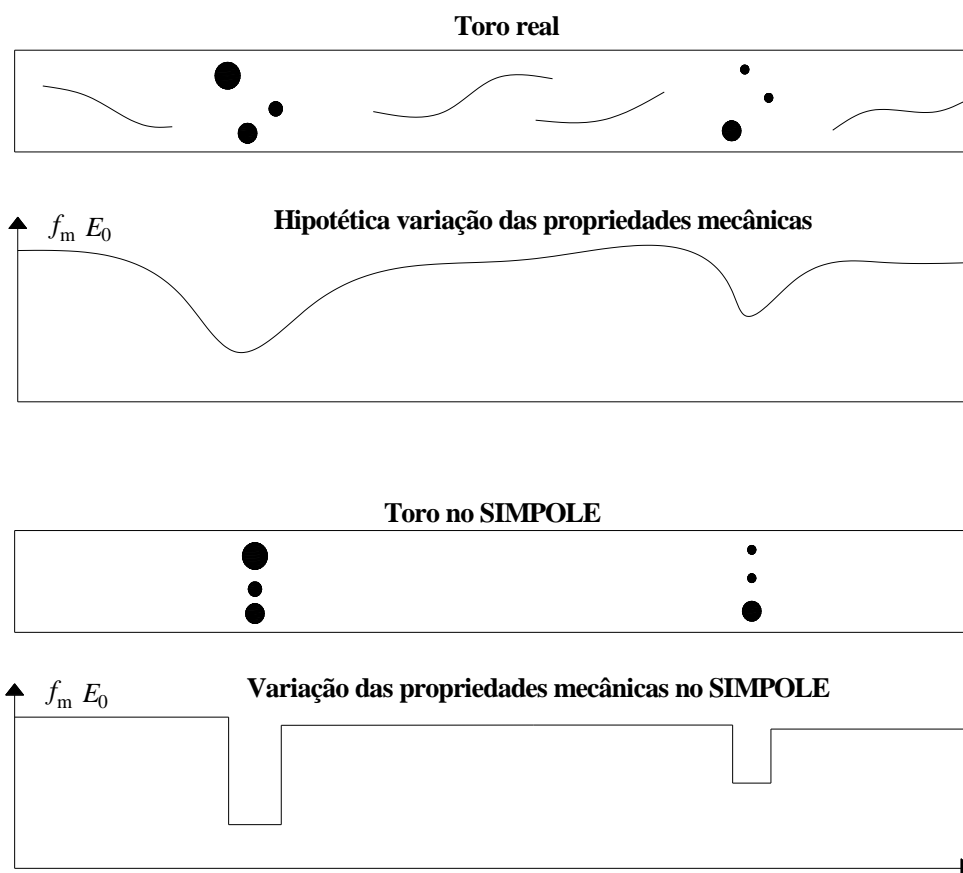


Figura 5.15 – Simplificações admitidas no SIMPOLE

### 5.3.2 Módulo de geração de toros

Geralmente, os computadores apenas geram valores aleatórios segundo distribuições uniformes no intervalo  $[0,1]$ . Para a geração de valores segundo distribuições normais ou lognormais é necessário usar um algoritmo auxiliar. No modelo, para esse efeito, foi usado o algoritmo polar (Ripley, 1987) por ser de resolução rápida. Segundo esse algoritmo é possível gerar uma variável respeitando uma determinada média e desvio padrão através de duas variáveis independentes geradas segundo uma distribuição uniforme no intervalo  $[-1,1]$ . Para assegurar que as duas variáveis são independentes é gerada uma “seed” (sequência aleatória de números gerados por computador) para cada variável, os valores obtidos foram multiplicados por 2 e subtraídos de 1, de modo a converter o intervalo  $[0,1]$  no intervalo  $[-1,1]$ . Na Figura 5.16 são apresentados os passos para a obtenção da variável  $V_n$ , que segue uma lei normal, a partir das variáveis aleatórias independentes  $V_1$  e  $V_2$ . Um histograma de valores gerados segundo a distribuição normal da Figura 5.17, usando este processo, é apresentado na Figura 5.18. Verificando-se, claramente, que o intervalo que contém a média da distribuição normal é o valor com maior frequência.

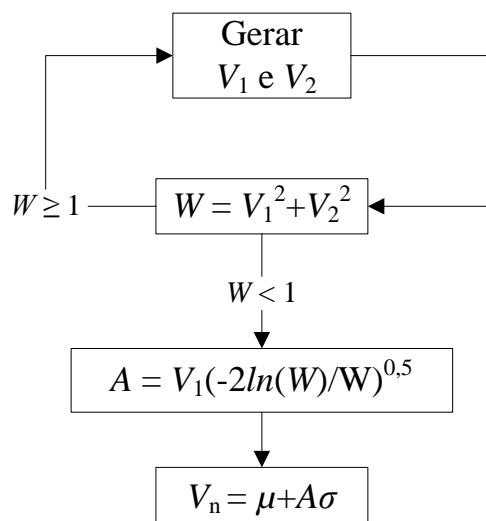


Figura 5.16 – Esquema de geração da variável  $V_n$  seguindo uma lei normal

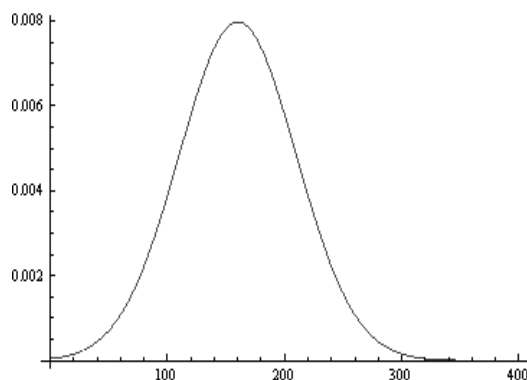


Figura 5.17 – Distribuição normal

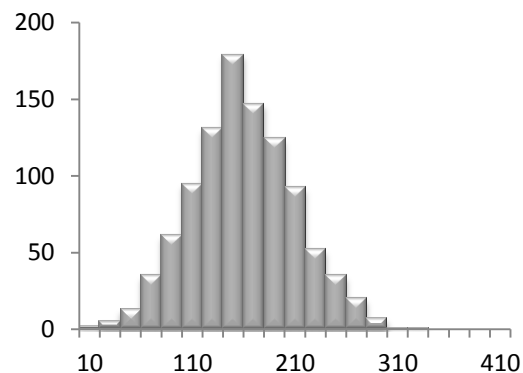


Figura 5.18 – Histograma de valores gerados segundo uma lei normal

No caso de uma variável  $V_{LN}$  seguir uma lei lognormal, o procedimento é semelhante ao anteriormente exposto. A média ( $\mu_{LN}$ ) e o desvio padrão ( $\sigma_{LN}$ ) da distribuição lognormal são obtidos com base nos respectivos valores da amostra segundo as expressões abaixo (Guimarães e Cabral, 1997), sendo a variável  $V_{LN}$  dada pela equação (5.13). Um histograma de valores gerados segundo a distribuição lognormal da Figura 5.19 com este processo é apresentado na Figura 5.20. Verificando-se, mais uma vez, que os intervalos de valores em torno da média da distribuição lognormal são os que apresenta maior frequência.

$$\mu_{LN} = \ln(\mu) - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right) \quad (5.11)$$

$$\sigma_{LN} = \ln\left(\frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1\right) \quad (5.12)$$

$$V_{LN} = e^{(\mu_{LN} + A\sigma_{LN})} \quad (5.13)$$

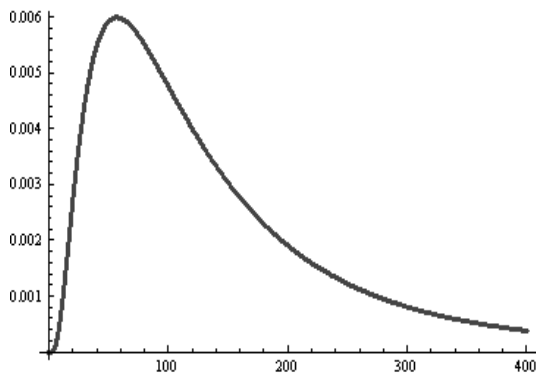


Figura 5.19 – Distribuição lognormal

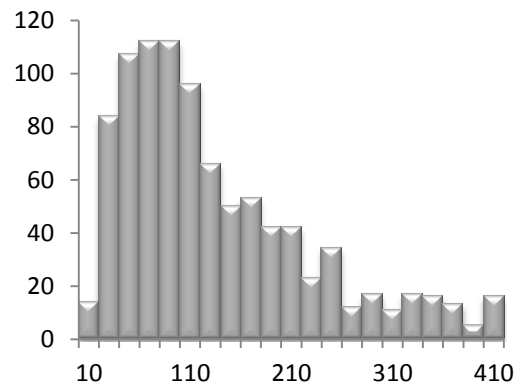


Figura 5.20 – Histograma de valores gerados segundo uma lei lognormal

Com base no processo referido de gerar variáveis aleatórias é gerado, numa fase inicial, o adelgaçamento, o diâmetro e a massa volúmica da base do toro, considerando que seguem uma distribuição normal (JCSS, 2006). O comprimento do toro é definido pelo utilizador, sendo que por defeito, tal como estipulado na norma EN 14251, este é igual a 18 vezes o maior diâmetro do toro. Após esta fase, é gerada a distância longitudinal entre secções com nós, seguindo uma distribuição normal, em função da qual o toro é dividido em troços de madeira limpa e em troços com nós. Mediante a taxa de variação longitudinal da massa volúmica com o comprimento do toro é atribuído o valor de massa volúmica a cada um dos troços, com base na distância do seu ponto médio à base do toro. Nos troços com nós são gerados o número de nós, segundo uma distribuição normal, o diâmetro de cada um, segundo uma distribuição lognormal, e a respectiva posição na secção. Estas distribuições foram escolhidas por serem aquelas se apresentaram melhor ajuste aos resultados destas características nos toros das amostras estudadas no Capítulo 3.



O comprimento dos troços de madeira limpa é determinado pela distância entre nós subtraída de metade do comprimento das secções com nós adjacentes. O comprimento de cada troço com nós é definido pelo diâmetro correspondente à área de influência do maior nó. Em termos transversais, considera-se que o diâmetro da área de influência é descrito ao longo do perímetro da secção, sendo o ângulo da área de influência na secção transversal dado pela equação(5.14). A área de influência de um nó, Figura 5.21, é determinada pela equação (5.15), retirada do estudo de Franco e Pellicane (1993). No processo de geração dos nós, o número de nós e o seu diâmetro respeitam a condição de não intercepção da projecção, no plano da secção, da área de influência dos nós.

$$\theta_{\text{Área influência}} = \sqrt{\frac{4A_{\text{influência}}}{\pi}} \times \frac{1}{r_{\text{secção}}} \quad (5.14)$$

$$A_{\text{influência}} = 2,742d_{\text{nó}}^2 + 1,753d_{\text{nó}} \quad (5.15)$$

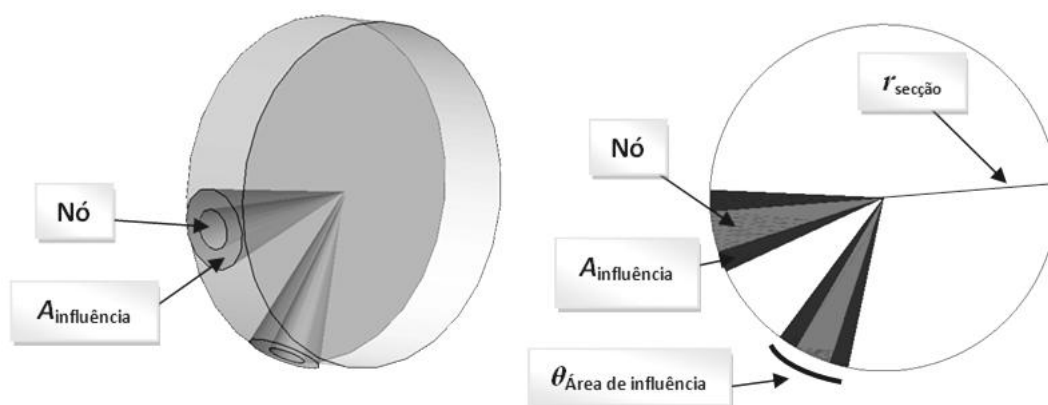


Figura 5.21 – Representação esquemática de nós e respectivas áreas de influência

A geração da resistência à flexão da madeira da base do toro que não é afectada pela presença de nós ( $f_{m,limpa}$ ) é gerada tendo em conta a correlação entre a massa volúmica e esta propriedade mecânica em peças de madeira limpa. Como a correlação não apresenta um coeficiente de correlação unitário, a obtenção da resistência à flexão deve ter em conta esta variabilidade. Tal foi conseguido usando o procedimento descrito anteriormente para a obtenção de variáveis aleatórias, considerando que a resistência à flexão segue uma distribuição lognormal (JCSS, 2006). A média a usar ( $\mu$ ) é obtida pela equação da recta de regressão  $f_m-\rho$ , para massa volúmica igual à da base do toro, e o desvio padrão ( $\sigma$ ) pelo erro padrão da amostra, equação (5.16). Apresenta-se na Figura 5.22 uma comparação entre a nuvem de pontos real e a gerada segundo este processo, onde se pode constatar que este processo permite conservar, de forma aceitável, a correlação entre as propriedades.

A resistência à flexão da madeira de cada troço que não é afectada pela presença de nós é dada pela equação (5.17), onde  $x_{\text{troço}}$  representa distância do centro desse troço à base do toro e  $\Delta(f_m;\rho)$  é o declive da recta de regressão  $f_m-\rho$ . O módulo de elasticidade da madeira de cada

troço que não é afectada pela presença de nós é gerado da mesma forma, mas usando a resistência à flexão no lugar da massa volúmica e, conseqüentemente, o valor  $f_{m,limpa}$  no lugar da massa volúmica da base do toro, equação (5.18).

$$\sigma = \left[ \frac{1}{N-2} \left[ \sum_{i=1}^N f_{m,i} - f_{m,mean} - \sum_{i=1}^N \left[ \rho_i - \rho_{mean} \quad f_{m,i} - f_{m,mean} \right]^2 \left[ \sum_{i=1}^N \rho_i - \rho_{mean} \right]^{-1} \right] \right]^{0,5} \quad (5.16)$$

$$f_{m,limpa,troço} = f_{m,limpa} - \Delta(f_m; \rho) x_{troço} \quad (5.17)$$

$$E_{0,limpa,troço} = E_{0,limpa} - \Delta(E_0; f_m) x_{troço} \quad (5.18)$$

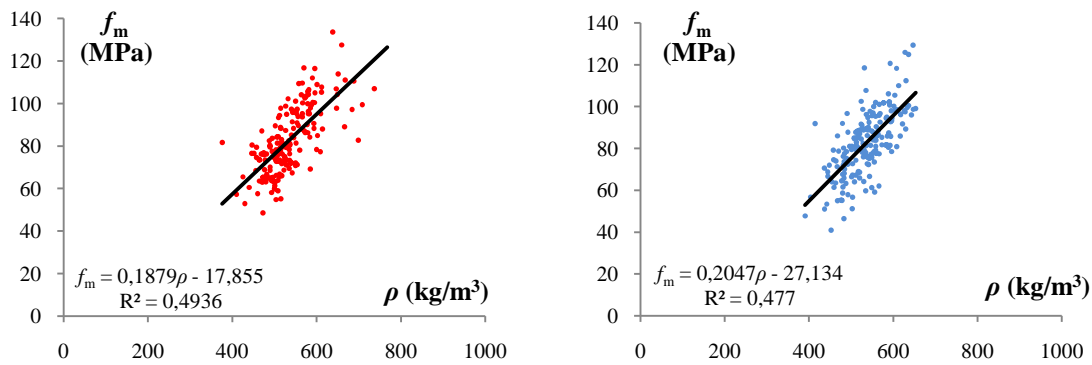


Figura 5.22 – Comparação entre os pares de pontos ( $f_m ; \rho$ ) reais (esquerda) e os gerados em computador (direita)

Nos troços com nós a secção é discretizada num número de faixas de altura a definir pelo utilizador, a altura é posteriormente ajustada por defeito de modo a assegurar um número par de faixas, o valor predefinido é de 5mm. Este valor foi definido tendo em conta as secções com nós dos toros expostos no Capítulo 3, onde a variação nos resultados obtida para alturas inferiores foi inferior a 0,1%. Tendo em conta os erros dos equipamentos de medição e a variação das propriedades mecânicas do material, a variação de 0,1% foi tida como aceitável.

Em cada uma das faixas são determinadas as porções de madeira não afectada pela presença dos nós ( $A_{limpa}$ ), de área de influência do nó ( $A_{influência}$ ) e de nó ( $A_{nós}$ ). A resistência ( $f_{faixa}$ ), quer à compressão quer à tracção, é considerada constante em toda a faixa e dada pela equação (5.19), caso a faixa se situe em zona de tracção, ou pela equação (5.20), caso a faixa se situe em compressão. A diferença incide sobre o facto de não se considerar que o nó em tracção contribua em termos de resistência.

$$f_{faixa,t} = \frac{\left[ f_{m,limpa,troço} \times A_{limpa} + \sum_{i=1}^{N.^{\circ} \text{ de nós}} f_{m,nó,i} \times (A_{influência,nó,i}) \right]}{A_{faixa}} \quad (5.19)$$

$$f_{\text{faixa,c}} = \left[ f_{m,\text{limpa,troço}} \times A_{\text{limpa}} + \sum_{i=1}^{\text{N.º de nós}} f_{m,\text{nó},i} \times (A_{\text{influência,nó},i} + A_{\text{nó},i}) \right] / A_{\text{faixa}} \quad (5.20)$$

$$E_{\text{faixa,t}} = \left[ E_{0,\text{limpa,troço}} \times A_{\text{limpa}} + \sum_{i=1}^{\text{N.º de nós}} E_{0,\text{nó},i} \times (A_{\text{influência,nó},i}) \right] / A_{\text{faixa}} \quad (5.21)$$

$$E_{\text{faixa,c}} = \left[ E_{0,\text{limpa,troço}} \times A_{\text{limpa}} + \sum_{i=1}^{\text{N.º de nós}} E_{0,\text{nó},i} \times (A_{\text{influência,nó},i} + A_{\text{nó},i}) \right] / A_{\text{faixa}} \quad (5.22)$$

Analogamente, as equações (5.21) e (5.22) devem ser usadas para a determinação do módulo de elasticidade da faixa. A rigidez da secção é dada pela equação (5.23). As propriedades mecânicas da madeira afectada pelo nó são dadas pela fórmula de Hankinson, equação (5.25) e (5.26), para o ângulo máximo do desvio das fibras ( $\theta$ ). Para a determinação deste último foi adoptada a equação (5.27), proposta por Franco e Pellicane (1993).

$$EI_{\text{secção}} = \sum_{i=1}^{\text{N.º de faixas}} E_{\text{faixa},i} \times (I_{\text{faixa},i} + A_{\text{faixa},i} \times (y_{g,\text{faixa},i} - y_{g,\text{secção}})^2) \quad (5.23)$$

$$y_{g,\text{secção}} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{N.º de faixas}} A_{\text{faixa},i} E_{\text{faixa},i} y_{g,\text{faixa},i}}{\sum_{i=1}^{\text{N.º de faixas}} A_{\text{faixa},i} E_{\text{faixa},i}} \quad (5.24)$$

$$f_{m,\text{nó}} = \frac{f_{m,\text{limpa,troço}}}{\sin^n(\theta) \times \frac{f_{m,0}}{f_{m,90}} + \cos^n(\theta)} \quad (5.25)$$

$$E_{0,\text{nó}} = \frac{E_{0,\text{limpa,troço}}}{\sin^2(\theta) \times \frac{E_0}{E_{90}} + \cos^2(\theta)} \quad (5.26)$$

$$\theta = \frac{A_{\text{influência}}}{95,51} \times 54,5^\circ \quad (5.27)$$

A área de influência do nó e a área de nó em cada faixa foram obtidas com base no método de Gauss (Xerez, 1959). Aplicando este método é possível obter a área de uma figura poligonal fechada, se forem conhecidas as coordenadas dos seus vértices. Para tal é aplicada a equação (5.28) no sentido horário (Figura 5.23), sendo o ponto inicial e final o mesmo.

$$A_{\text{poligono}} = \frac{1}{2} \times \sum_{i=1}^{\text{N.º de vertices}+1} (y_{i+1} + y_i)(x_{i+1} - x_i) \quad (5.28)$$

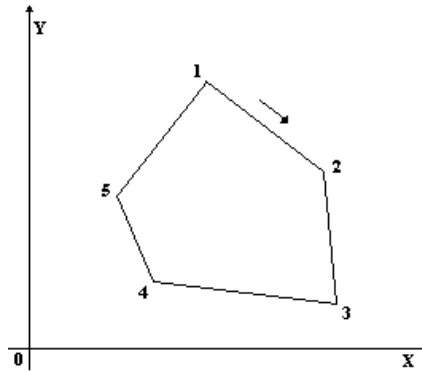
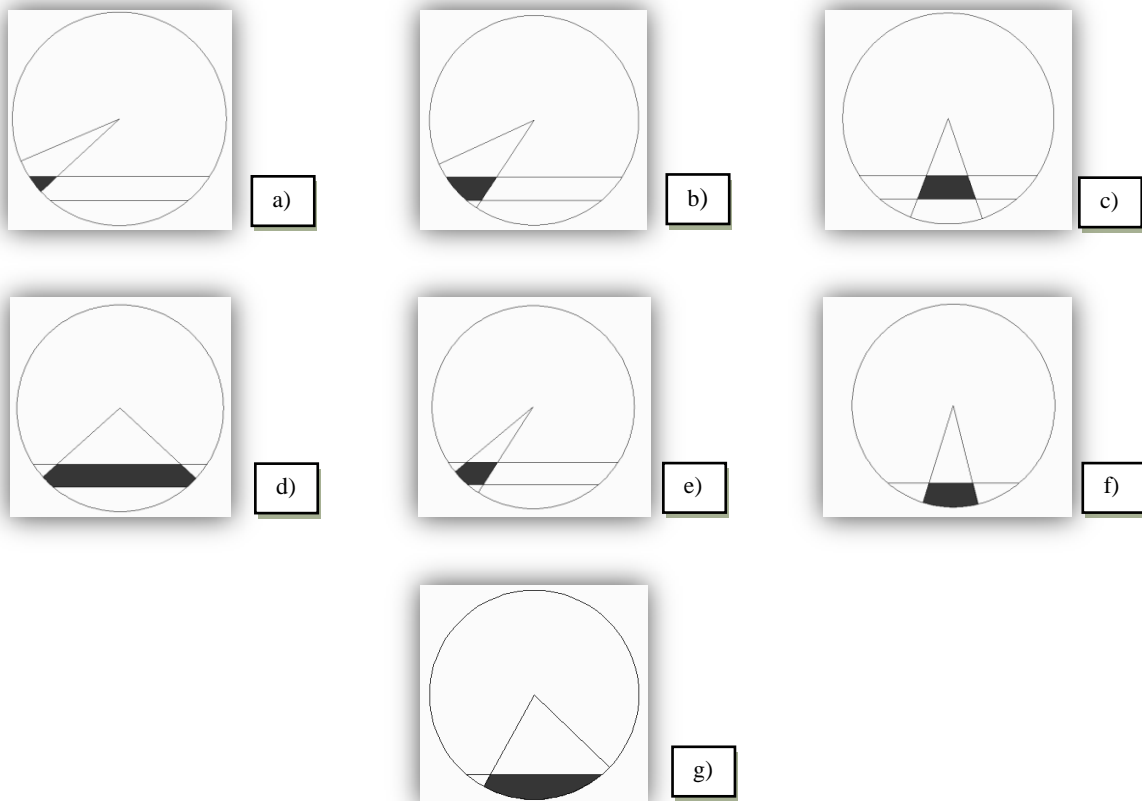


Figura 5.23 – Exemplificação do método de Gauss

Para a aplicação da equação (5.28) torna-se imperativo conhecer todas as figuras poligonais possíveis de definir pela intercepção entre os limites da área de influência do nó e os limites da faixa, de modo a obter as coordenadas dos vértices. Os sete polígonos possíveis são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Polígonos resultantes da intercepção entre os limites do nó e das faixas



No casos *b)*, *d)* e *e)* pode acontecer a quase coincidência de vértices, mas a aplicabilidade do método mantém-se. Na situação *g)* grande parte área é limitada pela circunferência pelo que usando este método seriam de esperar grandes erros na aproximação da área a negro, assim, neste caso, optou-se por determinar a área de madeira limpa e subtraí-la à área da faixa. No caso *f)* é determinada a área do triângulo, definido pelo limite superior da faixa e pelos limites da área de influência do nó, à área do sector circular. Determinadas a área de influência dos nós e a área de nós na faixa, a área de madeira limpa é, com excepção do caso *g)*, dada pela área da faixa deduzida das duas primeiras. A área da faixa é dada pela expressão da equação (5.29), cujos símbolos são definidos na Figura 5.24.

Como resumo do referido neste ponto do trabalho, é apresentado na Figura 5.25 um esquema resumo dos *outputs* do módulo de geração de toros.

$$A_{\text{faixa}} = r^2 \left( \frac{\theta_{\text{max}}}{2} - \frac{\sin \theta_{\text{max}}}{2} \right) - r^2 \left( \frac{\theta_{\text{min}}}{2} - \frac{\sin \theta_{\text{min}}}{2} \right) \quad (5.29)$$

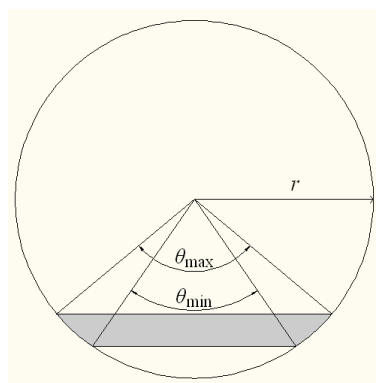


Figura 5.24 – Parâmetros necessários à determinação da área de uma faixa

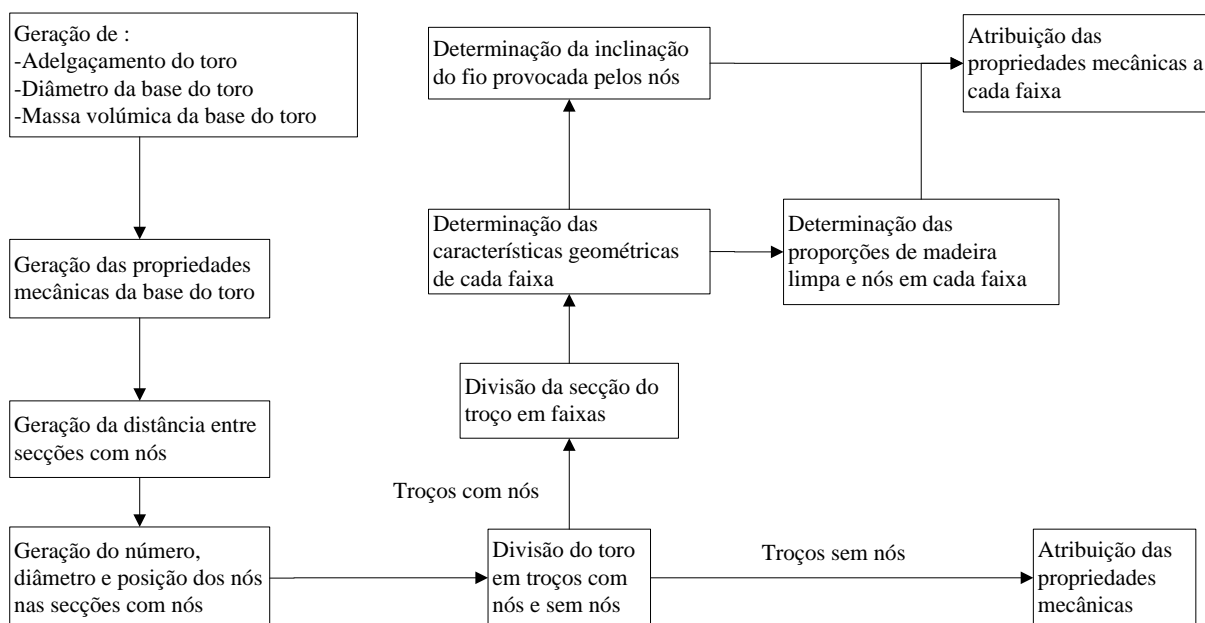


Figura 5.25 – Esquema do algoritmo de geração de toros

### 5.3.3 Módulo de ensaio de toros

Neste módulo procede-se à determinação das propriedades mecânicas dos toros gerados/inseridos no módulo anterior segundo a norma EN 14251, para o caso de um esquema de ensaio de viga simplesmente apoiada, ou segundo a EN 14229, para um esquema de ensaio como viga encastrada.

#### 5.3.3.1 Ensaio segundo a norma EN 14251

A determinação das propriedades mecânicas dos toros provenientes do módulo anterior, segundo a norma EN 14251 (CEN, 2003b), é efectuada para o esquema de carregamento estático da Figura 5.26. O toro é modelado como um elemento rectilíneo, com 3 deslocamentos fronteira desconhecidos, cuja secção varia uniformemente com o comprimento, segundo um adelgaçamento uniforme.

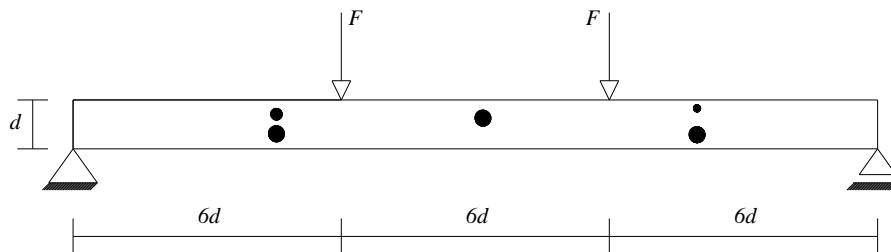


Figura 5.26 – Esquema de carregamento para a determinação das propriedades mecânicas segundo a norma EN 14251

A determinação do módulo de elasticidade global ( $E_{\text{global}}$ ), apresentada no ponto 3.7 do presente trabalho, requer a determinação do rácio  $\Delta F/\Delta W_G$ . No caso do módulo de elasticidade local ( $E_{\text{local}}$ ) é necessário o rácio  $\Delta M/\Delta W_L$ . Para a determinação dos deslocamentos necessários os toros foram modelados como vigas, sendo aplicado o método da integração da linha elástica para a determinação dos deslocamentos. Segundo este método, a rotação e o deslocamento, em qualquer ponto, podem ser determinadas pelas equações (5.30) e (5.31), respectivamente.

$$\varphi = \varphi_0 + \int \frac{M}{EI} dx \quad (5.30)$$

$$y = y_0 + \int \varphi dx = y_0 + \varphi_0 x + \iint \frac{M}{EI} dx \quad (5.31)$$

Neste caso particular, como os toros são adelgaçados, ou seja, a secção transversal e a inércia não são constantes, o mesmo se passando com o módulo de elasticidade, a aplicação das fórmulas não é imediata. Para contornar estes impedimentos, o toro foi discretizado em elementos de comprimento finito no qual se considera inércia e módulo de elasticidade constantes. Para os toros do Capítulo 3, a divisão em elementos de 10mm de comprimento, valor posteriormente ajustado por defeito de modo a resultar num número de elementos múltiplo de 3, fornece valores que se podem considerar exactos. Quando desta discretização

resulta um elemento com vários módulos de elasticidade, o módulo de elasticidade desse elemento é o resultado da ponderação de cada um dos módulos de elasticidade em função da porção de comprimento respeitante a cada um. Desta forma, as equações (5.30) e (5.31) devem ser aplicadas a cada um desses elementos discretos, sendo a equação do momento ( $M$ ) em função do tramo em que se encontrem (Figura 5.27).

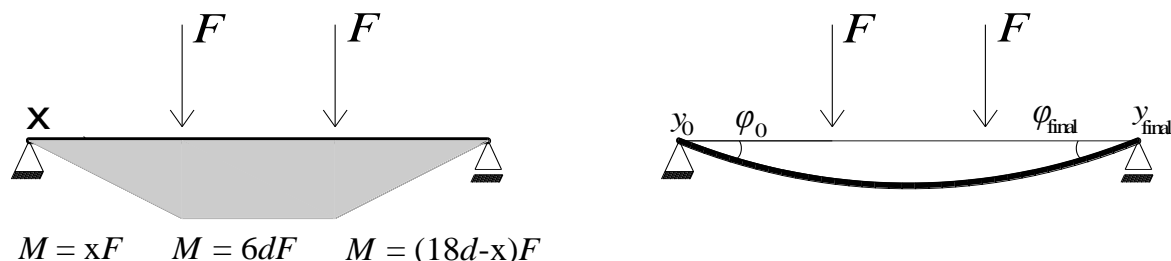


Figura 5.27 – Diagrama de momentos flectores e deformada para o carregamento aplicado segundo a norma EN 14251

Da análise da equação (5.31) constata-se que a única incógnita é  $\varphi_0$ . No caso de uma viga simplesmente apoiada com carregamento simétrico, a determinação de  $\varphi_0$  pode ser obtida pela condição fronteira  $\varphi_0 = \varphi_{\text{final}}$  (Figura 5.27). Neste caso, como existe variação das propriedades geométricas e mecânicas ao longo do comprimento do elemento, esta relação deixa de se verificar.

As condições de fronteira em termos de deslocamentos continuam válidas, isto é,  $y_0 = y_{\text{final}} = 0$ . Desta forma, para a obtenção de  $\varphi_0$  adoptou-se uma abordagem numérica, uma vez que existe um único valor possível para  $\varphi_0$  tal que  $y_{\text{final}} = 0$ , aplicado o método de Newton - Raphson (Devries, 1993). Optou-se por este método numérico por possuir convergência rápida, apesar de existir o risco de não convergir quando ocorrem pontos de inflexão. Assim, foi adoptado o valor inicial  $\varphi_0 = 0,5$  e aplicada a equação (5.32), que neste caso concreto toma a forma da equação (5.33), sendo a condição de paragem a precisão ( $\varepsilon$ ) pretendida pelo utilizador, equação (5.34). Por defeito, uma vez que a velocidade de convergência é elevada, a precisão admitida é até à décima casa decimal ( $10^{-10}$ ).

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{f(\varphi_0)}{f'(\varphi_0)} \quad (5.32)$$

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{y_{\text{final}}}{1} \quad (5.33)$$

$$\varphi - \varphi_0 \leq \varepsilon \quad (5.34)$$

Após obtidos os valores das condições de fronteira externas é possível obter todas as condições de fronteira internas e obter os deslocamentos pretendidos para o cálculo do

módulo de elasticidade, quer local quer global. O seu cálculo é efectuado segundo o descrito no ponto 3.7 do presente trabalho.

Para a determinação da resistência à flexão o toro é sujeito sucessivamente a incrementos de carga, que asseguram erros inferiores a 0,1% na determinação da carga de rotura. Em cada incremento de carga é efectuada a verificação das tensões ao longo do comprimento do toro, assegurando um erro na determinação da localização da rotura inferior a 10mm, erro que se considerou razoável para o parâmetro em causa, podendo este ser alterado pelo utilizador. No caso de troços de madeira limpa, a rotura acontece quando a tensão actuante na fibra de extremidade ultrapassar a resistente. No caso de troços com nós a verificação é efectuada por faixa. A tensão actuante em cada faixa, enquanto a secção se mantiver em regime elástico, é dada pela equação (5.35).

$$\sigma_{\text{faixa}} = \frac{M \times E_{\text{faixa}}}{EI_{\text{secção}}} (y_{g,\text{secção}} - y_{g,\text{faixa}}) \quad (5.35)$$

O processo de verificação das tensões nas secções com nós consiste em verificar que a tensão actuante em cada faixa da secção é inferior à sua resistência. Quando tal não se verificar, significa que a faixa rompeu, no caso de se encontrar em tracção, ou que plastificou, caso se encontre em compressão. No entanto, tal pode não significar que a secção atinge a capacidade resistente máxima, uma vez que, após redistribuição de esforços, as faixas restantes podem suportar a tensão actuante.

Quando uma faixa rompe, e a secção ainda se encontra em regime elástico, o algoritmo procede à caracterização geométrica da nova secção, Figura 5.28, que corresponde à secção antiga excluída da faixa que rompeu, em termos de centro de gravidade e rigidez à flexão. O centro de gravidade é obtido através da geometria de massas, ou seja, resolvendo a equação (5.36) em ordem a  $y_{g,\text{secção actual}}$ . A rigidez à flexão da secção é obtida através da equação (5.38).

$$\frac{EA_{\text{secção actual}} \times y_{g,\text{secção actual}} + EA_{\text{faixa}} \times y_{g,\text{faixa}}}{EA_{\text{secção anterior}}} = y_{g,\text{secção anterior}} \quad (5.36)$$

$$EA_{\text{secção actual}} = EA_{\text{secção anterior}} - EA_{\text{faixa}} \quad (5.37)$$

$$EI_{\text{secção actual}} = EI_{\text{secção anterior, ao } y_{g,\text{secção actual}}} - EI_{\text{faixa, ao } y_{g,\text{secção actual}}} \quad (5.38)$$

$$EI_{\text{faixa, ao } y_{g,\text{secção actual}}} = E_{\text{faixa}} \left[ I_{\text{faixa}} + A_{\text{faixa}} \times (y_{g,\text{secção actual}} - y_{g,\text{faixa}})^2 \right] \quad (5.39)$$



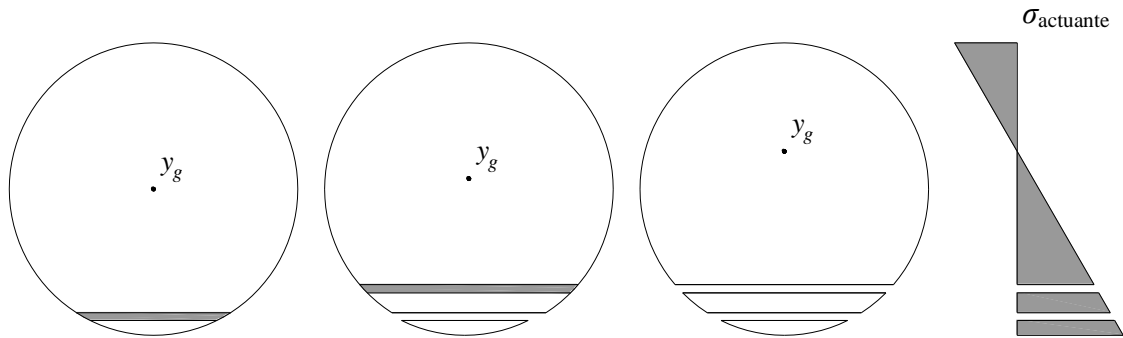


Figura 5.28 – Diagrama de tensão actuante após a rotura de faixas

A rigidez à flexão relativamente ao centro de gravidade da secção actual é dada pelo Teorema de Steiner (Silva, 2005), apresentando-se a sua aplicação, para o caso de uma faixa, na equação (5.39). O centro de gravidade da faixa obtém-se da resolução da equação (5.40) em ordem a  $y_{g,faixa}$ , sendo a calote maior a que corresponde ao  $\theta_{max}$  da Figura 5.29 e a menor a que corresponde ao  $\theta_{min}$ . O segundo momento de área da faixa é determinado pela equação (5.43). No caso de se tratar da primeira faixa, o segundo termo da equação toma valor nulo.

$$y_{g,calote\ maior} = \frac{A_{calote\ menor} \times y_{g,calote\ menor} + A_{faixa} \times y_{g,faixa}}{A_{calote\ maior}} \quad (5.40)$$

$$A_{calote} = r^2 \times \left( \frac{\theta}{2} - \frac{\sin(\theta)}{2} \right) \quad (5.41)$$

$$y_{g,calote} = r - \frac{\frac{4}{3} \times r \times \left( \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^3}{\theta - \sin(\theta)} \quad (5.42)$$

$$I_{faixa} = I_{calote\ maior, ao\ y_{g,faixa}} - I_{calote\ menor, ao\ y_{g,faixa}} \quad (5.43)$$

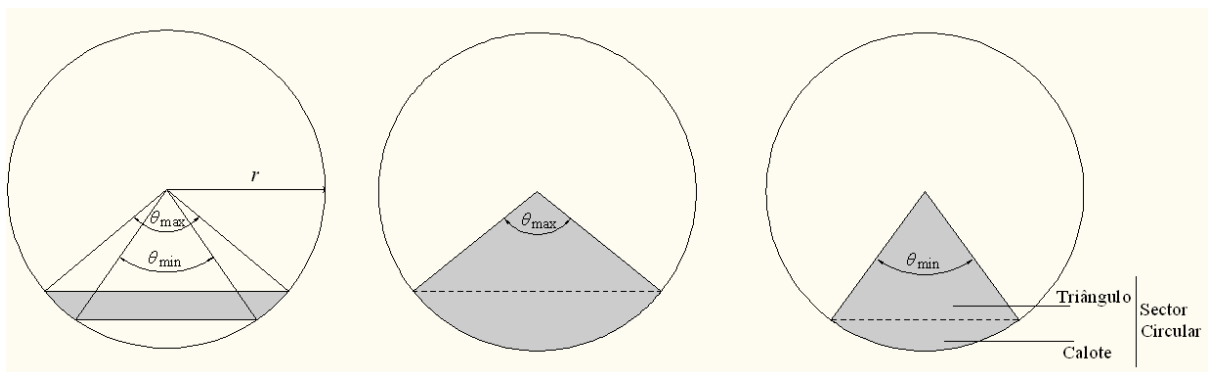


Figura 5.29 – Representação dos sectores circulares que compreendem uma faixa

$$I_{\text{calote, ao } y_{g,\text{faixa}}} = I_{\text{calote}} + A_{\text{calote}} \times y_{g,\text{calote}} - y_{g,\text{faixa}}^2 = A + B - C - D \quad (5.44)$$

Onde:

$$\left. \begin{array}{l} I \text{ do sector} \\ \text{circular} \\ \text{relativamente ao} \\ y_{g,\text{faixa}} \end{array} \right\} \begin{cases} A = \frac{r^4}{8} \times (\theta + \sin(\theta)) - \frac{2}{\theta} \times 4 \times \frac{r^4}{9} \times \left( \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^2 \\ B = \frac{\theta}{2} \times r^2 \times (r - y_{g,\text{faixa}} - \frac{2}{3} \times \frac{2}{\theta} \times r \times \left( \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^2 \end{cases} \quad (5.45)$$

$$\left. \begin{array}{l} I \text{ do triângulo} \\ \text{relativamente ao} \\ y_{g,\text{faixa}} \end{array} \right\} \begin{cases} C = 2 \times r \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \times \frac{\left( r \times \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^3}{36} \\ D = 2 \times r \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \times r \times \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \times \left( r - y_{g,\text{faixa}} - \frac{2}{3} \times r \times \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^2 \end{cases} \quad (5.46)$$

O processo anterior, como já foi referido, apenas pode ser efectuado enquanto a peça se mantiver em regime elástico, uma vez que o eixo neutro ( $e_n$ ) passa pelo centro de gravidade da secção. Assim que uma faixa em compressão plastificar, a tensão é mantida constante reproduzindo assim comportamento plástico perfeito (Figura 5.30). Neste caso a determinação da posição do eixo neutro e do valor da curvatura  $1/\rho = M/EI$  apenas pode ser determinada por equilíbrio de forças na secção, ou seja, resolvendo em ordem a  $e_n$  e  $M/EI$  o sistema da equação (5.47), onde  $e$  é o número de faixas em regime elástico e  $p$  o número de faixas plastificadas. Este processo é complexo por não se tratar de uma secção com largura constante a toda a altura. Assim, considerou-se que a altura das faixas, anteriormente definida, é suficientemente pequena para ser admitido que a tensão é constante em toda a sua altura e igual à actuante ao nível do seu centro de gravidade (Figura 5.30), onde é aplicada a sua resultante. A rotura de uma secção com nós acontece quando todas as faixas em tracção tiverem rompido.

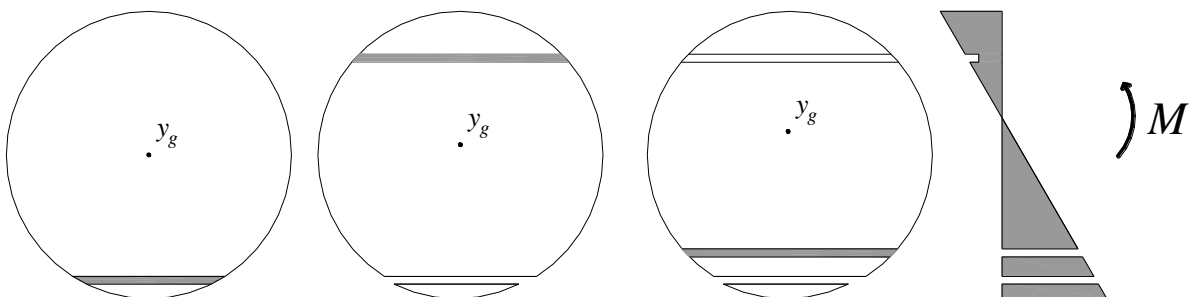


Figura 5.30 – Diagrama de tensão actuante após rotura e plastificação de faixas

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum A \sigma_{\text{faixa},i} = 0 \Leftrightarrow \frac{M}{EI} \sum_{i=1}^e (y_{g,\text{faixa},i} - e_n) \times A E_{\text{faixa},i} + \sum_{i=1}^p f_{\text{faixa},i} \times A_{\text{faixa},i} = 0 \\ \sum A \sigma_{\text{faixa},i} \times y_{g,\text{faixa},i} = M \end{array} \right. \quad (5.47)$$

Quando é atingida a rotura de uma secção do toro, o modelo tem como *output* final a resistência à flexão, calculada de acordo com o descrito no ponto 3.7 do presente trabalho, a localização da rotura e a informação sobre se a rotura se situou numa secção de um troço de madeira limpa ou com nós.

### 5.3.3.2 Ensaio segundo a norma EN 14229

No caso de as propriedades mecânicas serem determinadas segundo a norma EN 14229 (CEN, 2007), o esquema de carregamento estático consiste num ensaio em consola com carga de extremidade, o qual é apresentado na Figura 5.31. O toro é modelado como um elemento rectilíneo, com 3 deslocamentos fronteira desconhecidos, cuja secção varia uniformemente com o comprimento, segundo um adelgaçamento uniforme.

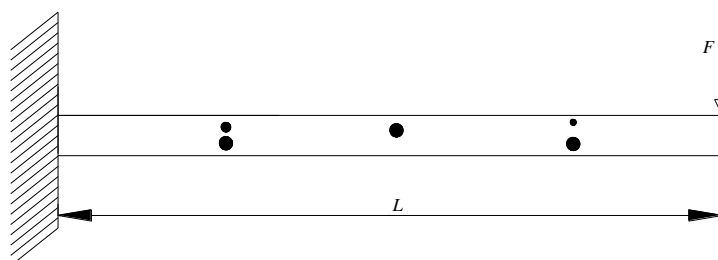


Figura 5.31 – Esquema de ensaio segundo a norma EN 14229

O módulo de elasticidade é determinado com base na equação (5.48), sendo o primeiro rácio definido pelo declive da recta que melhor se ajusta a, pelo menos, 30 pares de valores  $(F(L - \delta_x)^3; \delta_y)$ . Os valores são obtidos para um carregamento até 30% da carga de rotura estimada.

$$E_0 = \frac{F(L - \delta_x)^3}{\delta_y} \times \frac{d_q^3}{3I_q d_g^3} \quad (5.48)$$

Onde:

- $F$  -Força actuante (N)
- $L$  -Comprimento do toro (mm)
- $\delta_x$  -Deslocamento na direcção do eixo do toro (mm)
- $\delta_y$  -Deslocamento na direcção da força actuante (mm)
- $d_q$  -Diâmetro da secção onde é aplicada a força (mm)
- $d_g$  -Diâmetro da secção de encastramento (mm)
- $I_q$  -Segundo momento de área da secção onde é aplicada a força (mm<sup>4</sup>)

Como neste caso são expectáveis elevadas deformações, uma análise no domínio das pequenas deformações poderia conduzir a erros significativos, pelo que os deslocamentos não podem ser determinados recorrendo a essa abordagem, sendo necessário efectuar uma análise não linear geométrica. Considerando o elemento da Figura 5.32, a hipótese de Euler-Bernoulli para grandes deformações devidas a momento flector pode ser descrita pela equação (5.49), a qual pode ser reescrita na equação (5.50) (Fertis, 2006).

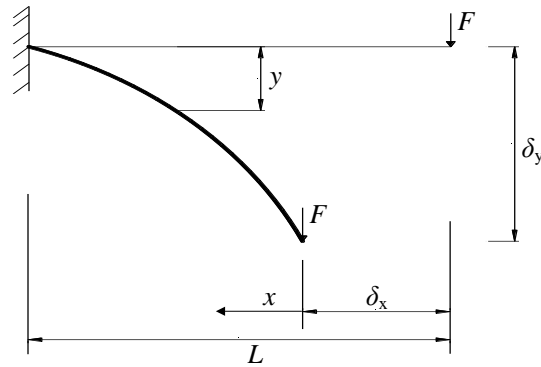


Figura 5.32 – Deformada de uma viga em consola com carregamento vertical pontual na extremidade livre

$$\frac{y''}{[1 + y'^2]^{\frac{3}{2}}} = -\frac{M(x)}{E_0(x)I(x)} \quad (5.49)$$

$$\frac{y'}{[1 + y'^2]^{\frac{1}{2}}} = \varphi(x) + C \quad (5.50)$$

$$\varphi(x) = \int \frac{M(x)}{E(x)I(x)} dx \quad (5.51)$$

Considerando  $L_0 = L - \delta_x$ ,  $M = Fx$  para  $0 \leq x \leq L_0$ , o módulo de elasticidade constante nos troços e o  $I$ , para um adelgaçamento  $t$ , dado pela equação (5.52), a equação (5.51) resulta na equação (5.53). Desta forma, o adelgaçamento deve ser expresso em termos de  $L_0$ , equação (5.54). A constante de integração  $C$  pode ser determinada aplicando a condição de fronteira  $y' = 0$  para  $x = L_0$ , resultando na equação (5.55). Assim, resolvendo a equação (5.50) em ordem a  $y'$  obtém-se a equação (5.56).

$$I(x) = \frac{\pi(d_q + tx)^4}{64} \quad (5.52)$$

$$\varphi(x) = \frac{-32F(d_q + tx)}{3E_0 t^2 \pi (d_q + tx)^3} \quad (5.53)$$

$$t = \frac{d_g - d_q}{L_0} \quad (5.54)$$

$$C = \frac{32P(d_q + tL_0)}{3E_0 t^2 \pi (d_q + tL_0)^3} \quad (5.55)$$

$$y' = \frac{G(x)}{\left[1 - G(x)^2\right]^{1/2}} \quad (5.56)$$

$$G(x) = \frac{32F}{3E_0 t^2 \pi} \left[ \frac{(d_q + tx)}{(d_q + tx)^3} - \frac{(d_q + tL_0)}{(d_q + tL_0)^3} \right] \quad (5.57)$$

$$\delta_y = \int_0^{L_0} \frac{G(x)}{\left[1 - G(x)^2\right]^{1/2}} dx \quad (5.58)$$

$$L = \int_0^{L_0} \left[1 + y'^2\right]^{1/2} dx \quad (5.59)$$

O deslocamento na extremidade livre, segundo a direcção da força, é dado pela equação (5.58). No entanto, não é de cálculo directo, sendo dependente do deslocamento horizontal  $\delta_x$ . Este pode ser obtido pela condição de a peça ser inextensível, pelo que o valor do integral da equação (5.59) deve ser igual ao comprimento  $L$  da consola. Assim, para a determinação de  $\delta_x$  optou-se por uma abordagem numérica aplicando o método de Newton-Raphson (Devries, 1993). Desta forma, é arbitrado o valor inicial  $\delta_{x,0} = 0$  e aplicada a equação (5.60), que neste caso concreto toma a forma da equação (5.61), sendo a condição de paragem a precisão ( $\varepsilon$ ) pretendida pelo utilizador, equação (5.62). Tal como em situação semelhante para o ensaio como viga simplesmente apoiada, por defeito, a precisão admitida é até à décima casa decimal ( $10^{-10}$ ). Para a resolução do integral, uma vez que a abordagem analítica é de elevada dificuldade, optou-se por uma abordagem numérica usando a Regra de Simpson (Fertis, 2006). Usando esta regra é possível estimar o integral de uma função  $f(x)$  entre  $x=a$  e  $x=b$  pela equação (5.63), sendo  $n$  um número par. O valor de  $n$  condiciona a precisão da aproximação, podendo este ser introduzido pelo utilizador, sendo o valor predefinido o número par mais próximo que divide o comprimento do toro em elementos de cerca de 5mm de comprimento. Valor que permitiu obter, usando os toros estudados no Capítulo 3, variações nos resultados inferiores a 0,1%, erro aceitável pelas razões já enunciadas em situação semelhante.

$$\delta_x = \delta_{x,0} + \frac{f(\delta_{x,0})}{f'(\delta_{x,0})} \quad (5.60)$$

$$\delta_x = \delta_{x,0} + \left[ \int_0^{L_0} \left[1 + y'^2\right]^{1/2} dx - L \right] \quad (5.61)$$

$$\delta_x - \delta_{x,0} \leq \varepsilon \quad (5.62)$$

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{3n} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + \dots + 2f(x_{n-2}) + 4f(x_{n-1}) + f(x_n)] \quad (5.63)$$

Tendo em conta o referido anteriormente, é apresentado na Figura 5.33 um esquema resumo sobre o procedimento seguido para a determinação do deslocamento na extremidade livre da consola. Este procedimento é repetido com cargas de 1 a 30%, em incrementos de 1%, da carga estimada de rotura. Deste modo é possível obter os pares de valores necessários para obter o declive da recta para a determinação do módulo de elasticidade segundo a equação (5.48).

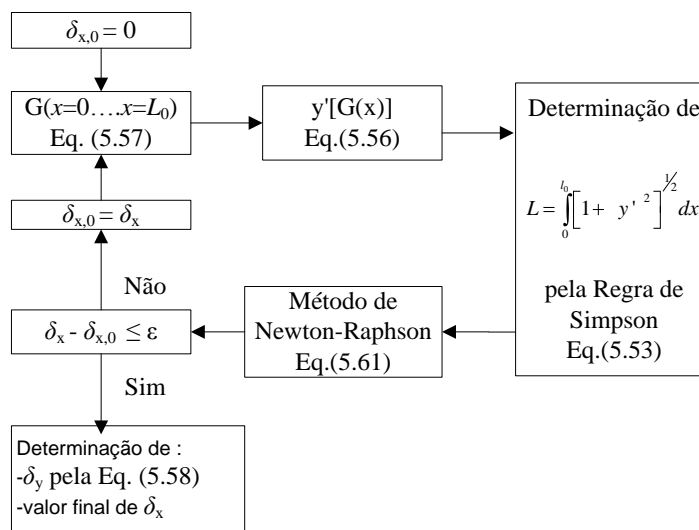


Figura 5.33 – Esquema do procedimento usado para a determinação do deslocamento na extremidade livre da consola

Para a determinação da resistência à flexão o toro é sujeito sucessivamente a incrementos de carga, que asseguram erros inferiores a 0,1% na determinação da força de rotura. Em cada incremento é efectuada a verificação das tensões ao longo do comprimento do toro, assegurando um erro na determinação da localização da rotura inferior a 10mm. Tal como no caso do ensaio como viga simplesmente apoiada, a rotura, no caso das secções de madeira limpa, acontece quando a tensão actuante na fibra de extremidade ultrapassar a resistente. No caso de secções com nós é seguido o procedimento apresentado no ponto anterior deste trabalho, acontecendo a rotura quando todas as faixas em tracção tiverem rompido.

O cálculo do momento flector aplicado é efectuada sobre a projecção da deformada (Figura 5.34), a qual é obtida em cada incremento de carga, sendo a verificação das tensões actuantes, como já foi referido, efectuada ao longo do comprimento do toro. Como o comprimento do toro não é igual à projecção da deformada, é necessário encontrar uma correspondência entre as coordenadas na situação deformada e na situação indeformada.

Fertis (2006) sugere que a relação entre a coordenada  $x$  de um ponto na situação deformada e a coordenada  $x_{\text{indeformada}}$  desse ponto na situação indeformada pode ser obtida pela equação (5.64). O termo  $\Delta(x)$  pode ser determinado pelas equações (5.65)-(5.68), as quais se

encontram representadas na Figura 5.35. Segundo o autor, o uso da equação (5.65), a qual é a aproximação mais grosseira, permite obter resultados com erro inferior a 3%. Neste estudo optou-se pelo uso da equação (5.68).

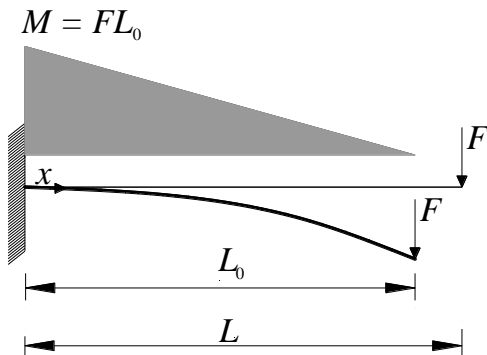


Figura 5.34 – Diagrama do momento fletor aplicado numa viga em consola

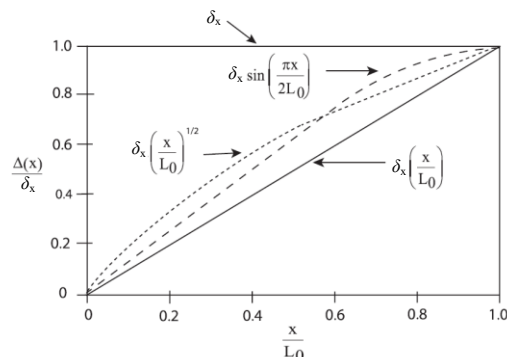


Figura 5.35 – Representação gráfica das equações de  $\Delta(x)$  (Fertis, 2006)

$$x_{\text{indeformada}} = x_{\text{deformada}} + \Delta(x) \quad (5.64)$$

$$\Delta(x) = \delta_x \quad (5.65)$$

$$\Delta(x) = \delta_x \frac{x_{\text{deformada}}}{L_0} \quad (5.66)$$

$$\Delta(x) = \delta_x \sqrt{\frac{x_{\text{deformada}}}{L_0}} \quad (5.67)$$

$$\Delta(x) = \delta_x \sin\left(\frac{\pi x_{\text{deformada}}}{2L_0}\right) \quad (5.68)$$

O modelo tem como *output* final a resistência à flexão, calculada pela equação (5.69) segundo a norma EN 14229 (CEN, 2007), a localização da rotura e a identificação dessa posição como de madeira limpa ou nós. Para melhor percepção dos procedimentos envolvidos na simulação da rotura do toro, estes encontram-se apresentados na Figura 5.36.

$$f_m = \frac{32F_{\text{max}}(L - \delta_x)}{\pi d_g^3} \quad (5.69)$$

Onde:

$F_{\text{max}}$  -Força de rotura (N)

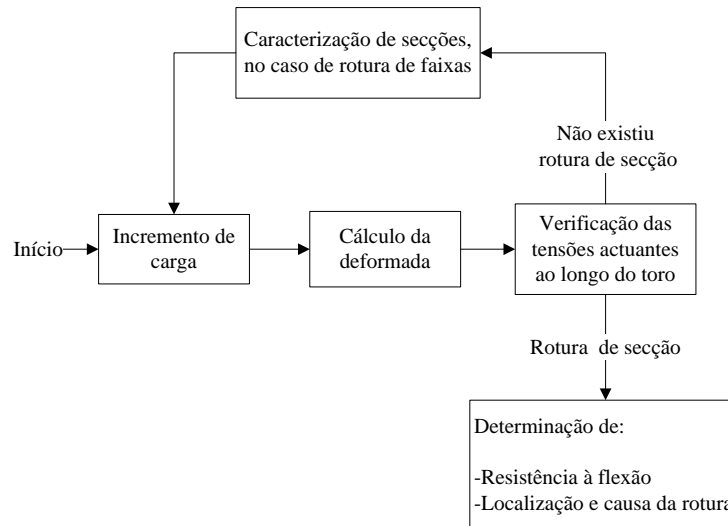


Figura 5.36 – Esquema de procedimentos para a determinação da resistência à flexão segundo a norma EN 14229

### 5.3.3.3 Avaliação da influência dos parâmetros da fórmula de Hankinson

A contabilização da penalização dos nós é um passo com bastante influência no modelo. A sua influência é determinada através da aplicação da fórmula de Hankinson, equação (5.70). Esta fórmula tem como parâmetros:

- o valor da propriedade mecânica segundo a direcção do fio,  $P_0$ , conhecida;
- o valor do rácio entre o valor dessa propriedade mecânica e o seu valor na direcção perpendicular ao fio,  $P_{90}$ , obtido apenas com base em bibliografia;
- o expoente  $n$  obtido apenas com base em bibliografia;
- ângulo  $\theta$  do desvio do fio provocado pelo nó, obtido com base na equação (5.27).

$$P_{\theta} = \frac{P_0}{\sin^n \theta \times \frac{P}{P_{90}} + \cos^n \theta} \quad (5.70)$$

Os valores encontrados em bibliografia não são, no entanto, para a madeira de secção circular de Pinheiro bravo. De modo a avaliar o impacto da consideração dos valores propostos, foi feito um estudo sobre a influência de cada um desses parâmetros no módulo de elasticidade e resistência à flexão da secção com nós representada na Figura 5.37. A secção possui um diâmetro de 203,1 mm, com um nó em zona de compressão e dois na zona de tracção, todos de 20mm de diâmetro. Os valores admitidos para o módulo de elasticidade e resistência à flexão da madeira limpa foram de 18,3MPa e de 112,7MPa, respectivamente. A influência dos diversos parâmetros da fórmula de Hankinson, nas propriedades mecânicas da secção, é apresentada nos gráficos da Figura 5.38 à Figura 5.40. Como o desvio do fio está relacionado com o diâmetro do nó, é igualmente estudada a influência deste último.



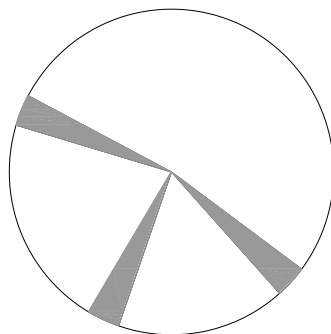


Figura 5.37 – Secção com nós em estudo

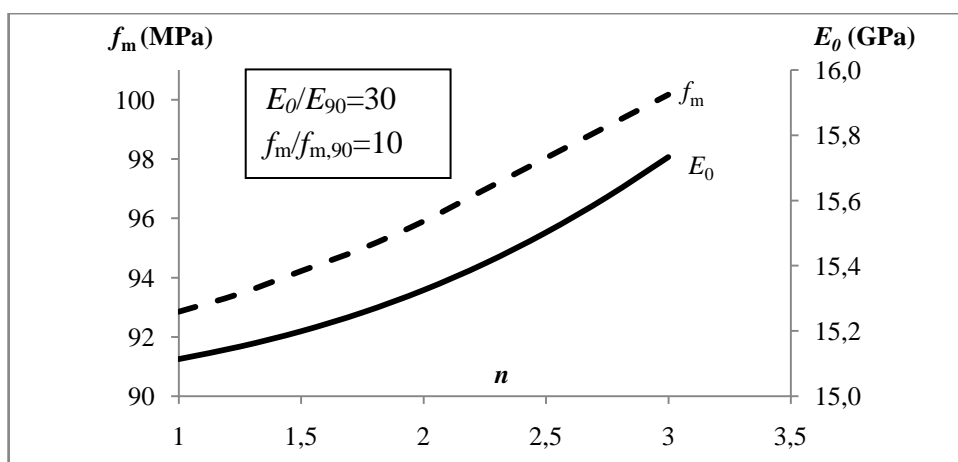


Figura 5.38 – Influência do expoente  $n$  no módulo de elasticidade e resistência à flexão da secção

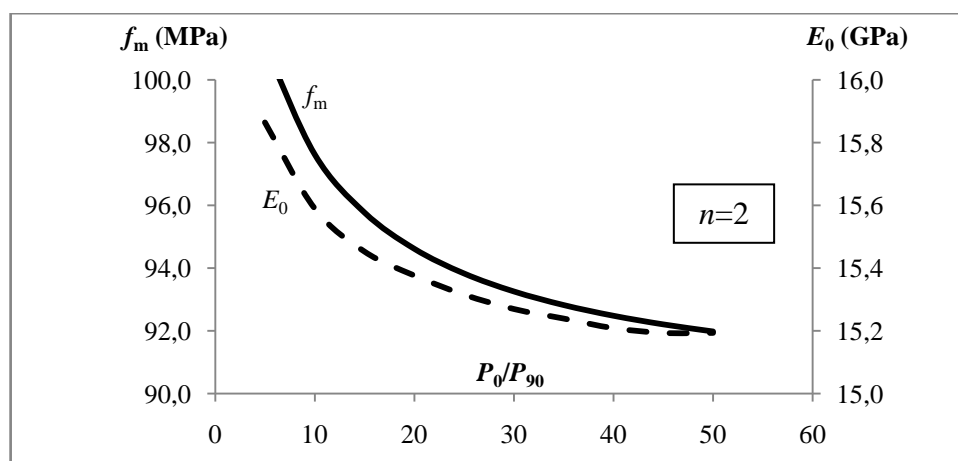


Figura 5.39 – Influência do rácio  $P_0/P_{90}$  no módulo de elasticidade e resistência à flexão da secção

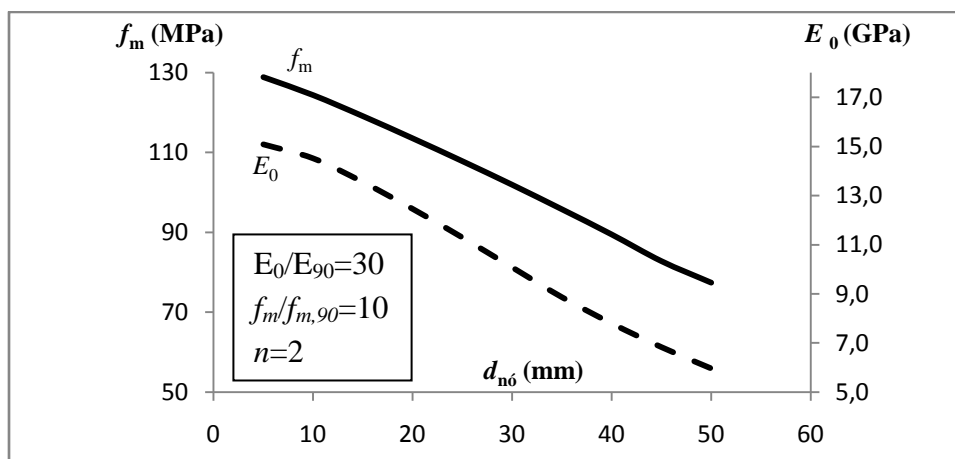


Figura 5.40 – Influência do diâmetro dos nós no módulo de elasticidade e resistência à flexão da secção

O valor de  $n$  indicado pelo Wood Handbook (USDA, 1999) para o módulo de elasticidade é de 2. Para o caso da resistência à flexão é referido um valor de 1,5 a 2. Segundo o gráfico da Figura 5.38 constata-se que a diferença na resistência à flexão ao usar  $n=1,5$  e  $n=2$  é inferior a 2%.

O valor de  $P_0/P_{90}$  indicado pelo Wood Handbook (USDA, 1999) para o módulo de elasticidade é de 8 a 25, obtendo-se o valor de 30 da norma EN 338 (CEN, 2003c). Do gráfico da Figura 5.39 a diferença obtida ao nível do módulo de elasticidade para estas gamas de valores é inferior a 3%. Para o caso da resistência à flexão é referido o valor de 10 a 25, a diferença nos resultados para esta gama de valores é inferior a 3%.

O ângulo do desvio do fio provocado pelo nó revelou-se o parâmetro com maior influência no módulo de elasticidade e na resistência à flexão. Nós com diâmetros de 5mm provocaram um decréscimo no módulo de elasticidade de 2,3% e de 0,6% na resistência à flexão. Para o caso de nós com diâmetro de 50mm é verificada um decréscimo no módulo de elasticidade da secção de 48% e de 50% para o caso da resistência à flexão.

## 5.4 Calibração e validação do SIMPOLE

### 5.4.1 Calibração

O modelo foi calibrado com uma amostra de 64 postes oriunda da zona litoral centro de Portugal, mais precisamente do distrito de Leiria (Figura 5.41). As características desta amostra foram analisadas de forma mais aprofundada por Martins (2010), pelo que para informações adicionais, para além das relevantes para o presente trabalho, se aconselha a consulta do seu estudo. Os postes foram seleccionados seguindo as recomendações da norma EN 14229 (CEN, 2007), tendo os postes obedecido às seguintes características:

- diâmetros a 1,5m da base a variar entre 180 e 220mm;
- comprimento a variar entre 7,92 e 8,16m;

- curvatura simples inferior a 1,23cm/m ou, quando apresentando curvatura dupla, a linha que une os centros dos topos mantêm-se no interior do poste;
- ausência de degradação biológica ou fendas profundas.

Refira-se que os postes foram apenas descascados, não tendo sofrido qualquer outro tipo de processamento.



Figura 5.41 – Zona de recolha da amostra de postes

No período anterior ao ensaio dos postes determinaram-se várias características visuais, nomeadamente: fio torcido, adelgaçamento, taxa de crescimento, distância entre secções com nós, número de nós por secção, diâmetro de cada nó e a posição do nó da secção. A determinação destas características seguiu a norma EN 1310 (CEN, 1995) e os procedimentos já apresentados no ponto 3.4 do presente trabalho. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Características visuais dos postes

	Fio torcido (cm/m)	Adelgaçamento (mm/m)	Taxa de crescimento (mm)	Diâmetro ( $d_g$ ) (mm)
Média	5,0	6,9	13,0	197,1
Máximo	12,0	10,3	21,5	226,5
Mínimo	1,0	3,4	6,1	180,0
Desvio Padrão	2,6	1,7	3,6	10,2

Características das secções com nós				
	N.º de nós	$d_{nó}$ (mm)	$d_{nó}^{(1)}$ (%)	Distância longitudinal (mm)
Média	3,2	23,9	12,3	377,4
Máximo	8,0	70,0	42,8	1360,0
Mínimo	1,0	4,0	1,1	40,0
Desvio Padrão	1,3	10,3	6,5	183,2

1) Diâmetro do nó expresso em percentagem do diâmetro da secção onde surge

Os ensaios experimentais seguiram as indicações da norma EN 14229 (CEN, 2007) para a determinação das propriedades mecânicas dos postes, nomeadamente da resistência à flexão ( $f_m$ ) e do módulo de elasticidade ( $E_0$ ). O esquema de ensaio preconizado é apresentado na Figura 5.42.

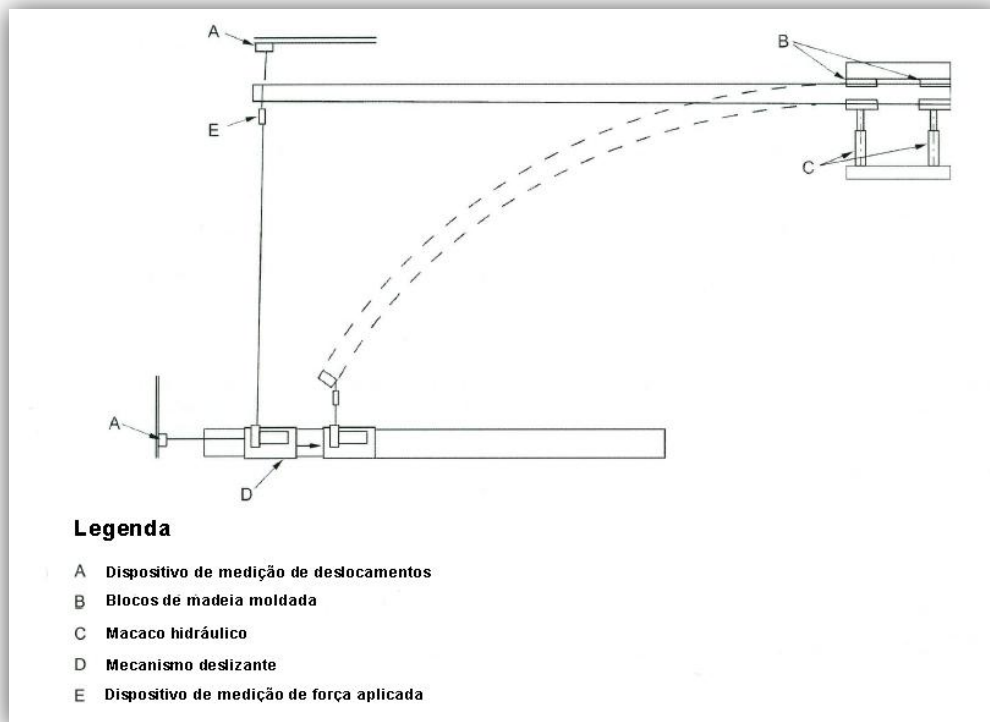


Figura 5.42 – Esquema do ensaio de flexão dos postes

O esquema de ensaio foi concretizado no dispositivo de ensaio da Figura 5.43. O encastramento é assegurado pela pressão exercida por macacos hidráulicos (C na Figura 5.42) encabeçados com peças de madeira moldadas (B na Figura 5.42) para o diâmetro do poste. A medição da força actuante é efectuada por uma célula de carga (E na Figura 5.42) e a medição dos deslocamentos ao longo da deformação do poste é assegurada por dois deflectómetros (A na Figura 5.42). A verticalidade da carga é assegurada pela constante translação do mecanismo deslizante (D na Figura 5.42), evitando assim a existência de componente horizontal na força aplicada na extremidade do poste.



Figura 5.43 – Dispositivo de ensaio de flexão dos postes

As roturas verificadas aconteceram geralmente próximo da zona de encastramento (Figura 5.44), sendo que apenas 19% das roturas aconteceram em secções que não possuíam nós



Figura 5.44 – Exemplos de roturas dos postes

Após o ensaio do poste, cortou-se uma rodela próxima da zona de rotura para determinação do teor de água e a massa volúmica do poste. Foram também cortadas rodelas nas extremidades do poste de modo a aferir a evolução da massa volúmica, a qual é apresentada no gráfico da Figura 5.45. Constata-se um notório decréscimo de cerca de 2% da massa volúmica por metro, da base para o topo do poste.

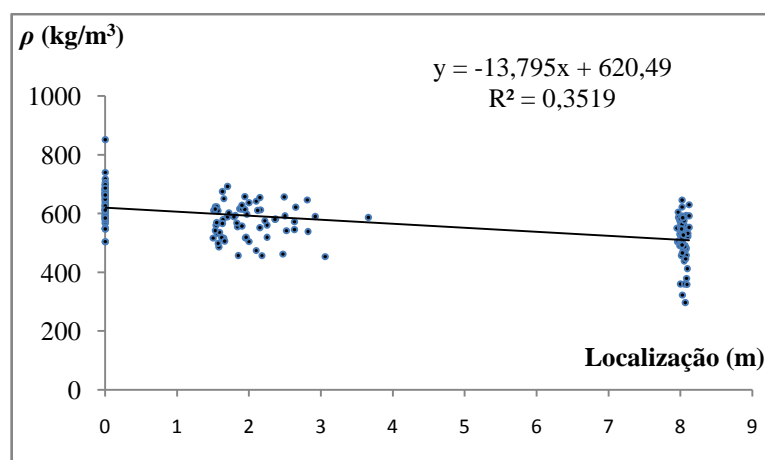


Figura 5.45 – Evolução da massa volúmica ao longo do comprimento dos postes

Na Tabela 5.3 apresentam-se os valores obtidos para a resistência à flexão ( $f_m$ ), módulo de elasticidade ( $E_0$ ), para o teor de água de ensaio e massa volúmica, para o teor de água de referência (12%), ajustada segundo a equação (3.14). O teor de água dos postes, segundo a norma EN 14229 (CEN, 2007), deve ser superior ao ponto de saturação das fibras. Para o Pinheiro bravo este valor este corresponde geralmente a um teor de água de 24% (LNEC, 1997). Da análise da Tabela 5.3 verifica-se que esta condição foi cumprida.

Tabela 5.3 – Propriedades mecânicas dos postes

Valor	$f_m$ (MPa)	$E_0$ (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)
Médio	50,2	10,9	573,4	65,4
Característico	37,0	-	478,9	-
Máximo	68,4	15,8	692,5	117,8
Mínimo	39,8	8,1	453,6	27,7
Desvio padrão	6,6	1,5	57,3	23,5
$N$	64	64	64	64

Para determinação das propriedades mecânicas da madeira limpa dos postes, após o ensaio, foram cortados dois troços com 450 mm de comprimento, um a montante e outro a jusante da zona de rotura. Os troços resultantes foram processados, de modo a obter, sempre que possível, duas peças com 20x20x380mm da parte mais exterior do toro (Figura 5.46). No entanto, houve casos em que não foi possível obter peças isentas de nós, tendo sido apenas obtidas peças de madeira limpa de 56 postes. As peças foram posteriormente imersas em água até ser atingido um teor de água superior ao ponto de saturação das fibras, situação em que se encontravam os postes no momento de ensaio. A determinação das propriedades mecânicas seguiu o procedimento anteriormente apresentado nos pontos 3.6 e 3.7.2 do presente trabalho. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5.4.



Figura 5.46 – Amostras recolhidas dos postes para posterior imersão em água



Figura 5.47 – Ensaio das peças de madeira limpa dos postes

Tabela 5.4 – Propriedades mecânicas da amostra de madeira limpa saturada dos postes (média das duas peças)

Valor	$f_m$ (MPa)	$E_0$ (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Médio	61,6	11,5	606,1
Máximo	80,9	17,5	739,8
Mínimo	42,3	8,4	422,9
Desvio padrão	7,9	2,0	67,0
$N$	56	56	56

Para a calibração do modelo, foram usados, como *input*, a resistência à flexão e o módulo de elasticidade das peças madeira limpa, obtidos com base na média dos valores das duas peças

por poste, as características geométricas do poste (diâmetro  $d_g$ , comprimento da parte em consola e respectivo adelgaçamento) e o mapa de nós recolhido. Após a introdução dos referidos parâmetros, procedeu-se à modelação dos postes para determinação das suas propriedades mecânicas. Verificou-se que os valores para os parâmetros da fórmula de Hankinson, dentro do intervalo de valores referido no ponto 5.3.3.3, que apresentaram melhor ajuste aos valores experimentais foram os que minimizam a penalização dos nós nas propriedades mecânicas, Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Coeficientes da fórmula de Hankinson com melhor ajuste aos resultados experimentais

	$P_0/P_{90}$	$n$
$E_0$	8	2
$f_m$	10	2

A comparação entre as propriedades mecânicas da amostra real de postes e a simulada é apresentada na Tabela 5.6 e a comparação das características das roturas na Tabela 5.7. O coeficiente de correlação entre a resistência à flexão simulada e real foi de 0,77 e o erro médio entre o valor real e simulado de 16,6%. O valor característico estimado foi 20,9% inferior ao real. Em termos de módulo de elasticidade, este foi estimado com um erro médio de 10,4%. A percentagem de roturas em secções com nós foi de 71,4%, ligeiramente inferior às registadas experimentalmente (76,8%), sendo que em 30% dos postes o tipo de rotura não foi o mesmo. A localização da rotura de cada poste foi estimada com um erro médio assinalável de 46,9%. Este valor elevado pode ser justificado pela existência de secções com nós inclusos e que portanto não puderam ser identificadas e caracterizadas.

Tabela 5.6 – Propriedades mecânicas dos postes simulados

Valor	$f_m$ (MPa)			$E_0$ (GPa)		
	Real	Estimada	Erro (%)	Real	Estimado	Erro (%)
Médio	50,5	54,6	16,6	11,0	10,9	10,4
Característico	37,6	29,8	-	-	-	-
Máximo	68,4	81,3	39,5	15,8	17,2	27,2
Mínimo	39,7	30,6	0,9	8,8	7,6	0,3
Desvio padrão	6,5	13,3	9,9	1,5	2,1	7,1
$N$	56	56	56	56	56	56

Tabela 5.7 – Características das roturas dos postes

Valor	Localização real (m)	Localização estimada (m)	Erro (%)
Médio	2,0	2,6	46,9
Máximo	3,7	5,7	184,2
Mínimo	1,5	1,5	0,0
Desvio padrão	0,4	1,2	45,9
$N$	56	56	56

### 5.4.2 Validação

A validação do SIMPOLE foi efectuada com os toros de pequeno diâmetro do presente estudo, nomeadamente os 57 toros dos quais foram obtidas peças de madeira limpa. Assim, tal como na calibração, foram introduzidos no modelo os valores de resistência à flexão e módulo de elasticidade das peças de madeira limpa e as características geométricas dos toros. Os parâmetros da fórmula de Hankinson considerados foram os obtidos da calibração do modelo (Tabela 5.5) A comparação entre os resultados simulados e os experimentais é apresentada na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Comparação entre as propriedades mecânicas das amostras de toros e as estimadas

Valor	$f_m$ (MPa)			$E_{local}$ (MPa)			$E_{global}$ (MPa)		
	Real	Estimada	Erro (%)	Real	Estimado	Erro (%)	Real	Estimado	Erro (%)
Médio	66,9	63,2	16,9	12,1	10,4	17,2	12,3	10,5	17,7
Característico	46,6	38,0	-	-	-	-	-	-	-
Máximo	106,1	103,6	39,5	15,3	16,3	46,4	15,2	16,3	48,4
Mínimo	34,0	34,4	0,3	7,8	6,7	0,1	8,0	6,6	0,0
Desvio padrão	13,4	17,7	10,9	1,9	2,2	10,8	1,8	2,3	11,4
<i>N</i>	57	57	57	57	57	57	57	57	57

Da análise da Tabela 5.8 verifica-se que o modelo estimou a resistência à flexão dos toros com um erro médio de 16,9%, semelhante ao obtido na calibração, obtendo-se um coeficiente de correlação de 0,7 entre os dados simulados e reais. Em termos de valor característico, este foi inferior em 18,5% ao real. O erro na estimativa no módulo de elasticidade, quer local quer global, é superior ao obtido na amostra de calibração, mas pode ser justificado pelo facto de o valor deste parâmetro na madeira limpa terem sido inferiores aos dos toros, como foi referido anteriormente no ponto 3.8.1 do presente estudo. De um modo geral é possível afirmar que a calibração do programa permitiu obter resultados ligeiramente inferiores aos reais, sendo portanto conservadora.

## 5.5 Conclusões

Neste capítulo procedeu-se ao desenvolvimento do modelo SIMPOLE (SIMulator of POLEs), um algoritmo construído em VBA (Visual Basic for Applications) do Microsoft Excel<sup>®</sup>, que permite a simulação das propriedades mecânicas de toros. O SIMPOLE é composto por dois módulos: um para a geração de toros e outro para a simulação das propriedades mecânicas dos toros gerados.

O primeiro módulo é responsável pela geração da geometria e massa volúmica, e pela distribuição dos nós ao longo do comprimento do toro. Estas características podem ser geradas com base em distribuições estatísticas ou inseridas pelo utilizador. No segundo módulo são simulados a resistência à flexão, o módulo de elasticidade e a localização e causa (presença ou não de nós) da rotura. As propriedades mecânicas são simuladas segundo a



norma EN 14251, para o caso de ensaio como viga simplesmente apoiada, ou segundo a norma EN 14229, para o caso de ensaio como viga encastrada.

O modelo foi calibrado com uma amostra de 56 postes de Pinheiro bravo do litoral centro de Portugal, ensaiados segundo a norma EN 14229. Posteriormente procedeu-se à validação do modelo em 57 toros de pequeno diâmetro de Pinheiro bravo, oriundos do Centro e Norte de Portugal, ensaiados segundo a norma EN 14251. O modelo foi capaz de estimar o valor médio das propriedades mecânicas das amostras com um erro aceitável, 1,3 a 14,7%, e as propriedades mecânicas dos toros ou postes com um erro médio superior, 10,4 a 17,7%. O valor característico estimado da resistência à flexão das amostras foi conservador, sendo inferior em cerca de 18,5 a 20,7% ao das amostras estudadas. Com base nestes resultados, pode-se concluir que o SIMPOLE apresenta potencial para estimar as propriedades mecânicas de uma amostra de toros oriunda de um povoamento florestal, sendo conhecidas as distribuições estatísticas dos nós e as propriedades mecânicas da madeira limpa.



# LIGAÇÕES

---

## 6.1 Introdução

O desempenho das aplicações estruturais da madeira de secção circular depende bastante do comportamento das ligações que as constituem. A madeira de secção circular de Pinheiro bravo, devido às suas excelentes propriedades mecânicas, possui um grande potencial para aplicação estrutural. O grande impedimento para o desenvolvimento de estruturas que tirem total partido das potencialidades deste material está relacionado com os sistemas de ligação (Stern, 2001).

Os sistemas de ligação existentes permitem a ligação de madeira de secção circular, mas nenhum consegue ser económico, de fácil uso, esteticamente agradável e universal, de modo a evitar o fabrico de sistema de ligação para cada caso particular e, assim, permitir a produção em massa (Yeates, 1999; Wolfe, 2000).

Neste capítulo do trabalho pretende-se estudar possíveis sistemas de ligação para a madeira de secção circular de Pinheiro bravo. Assim, numa fase inicial, foi efectuado o levantamento das soluções existentes em termos de ligações para a madeira de secção circular, de modo a adquirir conhecimentos para o desenvolvimento de novas soluções e configurações. Numa fase posterior, procede-se ao estudo do desempenho das soluções desenvolvidas.

A versão actual do Eurocódigo 5 apenas contempla a madeira serrada não apresentando qualquer directriz no que respeita a madeira de secção circular, assim, será analisada a aplicabilidade dos pressupostos e modelos deste regulamento a ligações com este material.

## 6.2 Tipologias de ligação

Neste ponto pretende-se apresentar as soluções existentes em termos de ligações para a madeira de secção circular, de modo a criar uma base que possa servir para o desenvolvimento de sistemas de ligação que permitam rentabilizar o potencial da madeira de secção circular de Pinheiro bravo.

### 6.2.1 Madeira-madeira

Este tipo de ligações são baseadas nos métodos tradicionais de construção e são soluções simples de baixo valor tecnológico (Figura 6.1). Os elementos de madeira de secção circular são geralmente entalhados ou as superfícies na zona da ligação são alisadas de modo assegurar o contacto entre os mesmos. Os ligadores são geralmente parafusos de porca ou cavilhas que atravessam os elementos. Podem ainda ser colocadas bandas, fios ou placas denteadas, de modo a fortalecer a ligação, particularmente onde são esperados deslocamentos devido a variações dimensionais dos elementos de madeira.

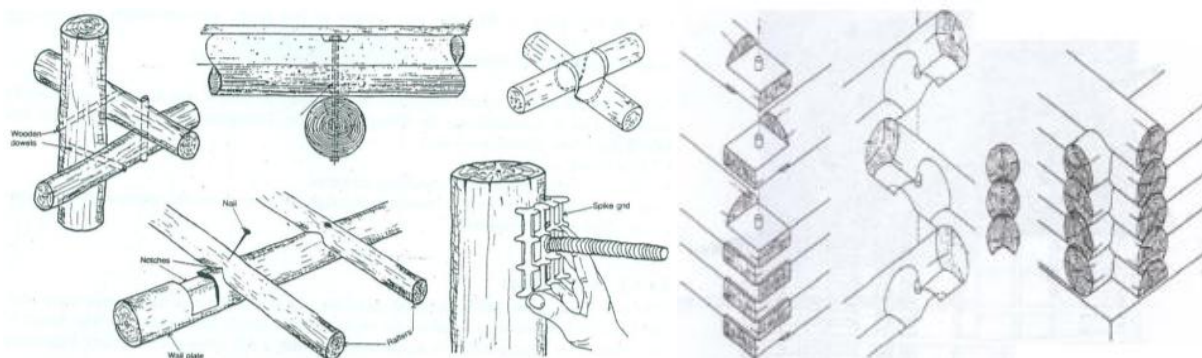


Figura 6.1 – Várias ligações madeira - madeira (Huybers, 1996; Yeates, 1999)

Este tipo de ligação tem a vantagem de ser simples e fácil de montar. A desvantagem está relacionada com o facto de essa simplicidade limitar também a sua versatilidade na construção. Os nós de ligação apenas podem ligar um número limitado de elementos, o que diminui o seu potencial. Existem também dificuldades em maximizar a capacidade resistente dos nós de ligação, porque o número de parafusos que podem ser usados é limitado pela superfície de contacto entre os elementos. Assim, usando este tipo de ligação é difícil explorar todo o potencial resistente dos elementos de madeira.

Um tipo de ligação madeira-madeira, adaptada da indústria do mobiliário, é o entalhe de encaixe de forma cilíndrica. Na indústria do mobiliário os entalhes são, geralmente, de forma rectangular. A forma cilíndrica permite uma maior facilidade de fabrico, uma vez que a zona de encaixe pode ser facilmente feita com recurso a furação e a torneadores acoplados a berbequins, por exemplo. A resistência ao arrancamento deste tipo de ligações é praticamente desprezável, caso não seja usado um sistema de travamento, geralmente uma cavilha que atravessa os elementos na zona de encaixe.

Akçay *et al.* (2005) estudaram o comportamento de ligações deste tipo, com madeira de Southern yellow pine, (*Pinus sp.*) e Yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera*), ao arrancamento, flexão e corte. Nas ligações estudadas o diâmetro das cavilhas de travamento variava entre 25,50 e 50,80mm, o diâmetro do encaixe variava entre 51,56mm, com 88,39mm de comprimento, e os 101,35mm, com 184,80mm de comprimento. As forças de arrancamento obtidas variaram entre 15,56 e 64,94kN, sendo que grande parte das ligações rompeu pela cavilha de travamento. O momento resistente variou entre 454,3Nm e 7061Nm. Os autores

concluíram que as cavilhas provocavam um decréscimo significativo no momento resistente, tendo este chegado a ultrapassar em algumas configurações os 40%. Nos ensaios de corte as resistências variaram entre 16,27 e 49,86kN. Os autores verificaram que a inexistência de contacto entre o elemento que tem a espiga e o que tem o furo provocou uma redução média na resistência ao corte de 45%. Este tipo de entalhe foi usado na construção de pequenos abrigos, com madeira serrada procedente de limpezas florestais. Detalhes sobre as construções experimentais, com este tipo de ligação, podem ser encontrados em Acuna *et al.* (2000); Eckelman *et al.* (2002); Eckelman *et al.* (2006).

Malo e Ellingsbo (2010) estudaram ligações madeira-madeira, a que designaram “T-joints” (Figura 6.2), para aplicação em treliças planas com linha dupla. No elemento central são efectuadas aberturas onde os elementos laterais encaixam, a ligação é efectuada por parafusos de rosca. A ligação foi testada com toros de Espruce com diâmetros entre 240 e 320mm, com teor de água de 12%, massa volúmica média de 455kg/m<sup>3</sup>, e parafusos de rosca com 12mm de diâmetro e 600mm de comprimento. A roturas foram por tracção do elemento central ou por arrancamento dos parafusos. Segundo os autores, foram obtidas cargas de rotura superiores a 200kN, não sendo especificado um valor concreto, apresentando a ligação comportamento elástico até 50% da carga de rotura.

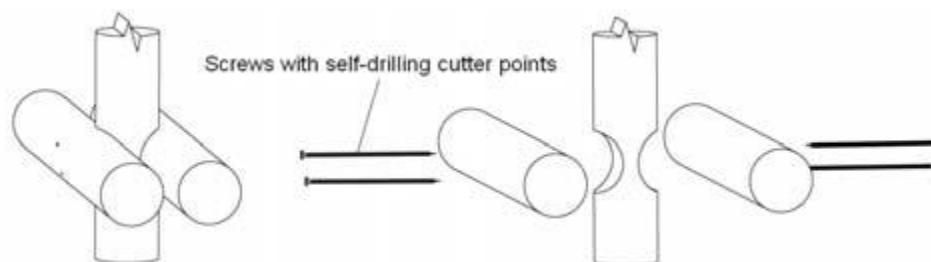


Figura 6.2 – Ligação T-joint (Malo e Ellingsbo, 2010)

### 6.2.2 Varões colados

Desde 1980 que foram efectuados diversos estudos com o objectivo de avaliar a resistência de ligações coladas, sobretudo em madeira lamelada colada, o que resultou em várias propostas empíricas de dimensionamento (Chans *et al.*, 2009). Existiu uma versão *draft* de um anexo informativo da parte 2 do Eurocódigo 5 que apresentava uma proposta de dimensionamento, mas acabou por ser abandonado. Como referido, grande parte dos estudos existentes estão limitados ao campo da madeira lamelada colada, não existindo número expressivo de estudos em madeira de secção circular.

Os adesivos usados são geralmente resinas epóxi por apresentarem boa adesão a diversos tipos de materiais, estabilidade dimensional após endurecimento, elevada resistência mecânica e alta resistência a produtos químicos e água (Custódio *et al.*, 2009). A adesão entre a cola e a madeira ocorre pelo preenchimento dos vazios existentes entre as fibras de madeira, sendo assim preferível o uso de uma resina com boas propriedades de fluidez.

A ligação consiste, geralmente, numa perfuração longitudinal efectuada nos topos dos elementos de madeira (Figura 6.3). No furo resultante é colocado um varão roscado embebido numa resina epóxi. A resistência axial deste tipo de ligação depende, entre outros factores, do comprimento de colagem e da espessura da camada de resina (Chans *et al.*, 2008).

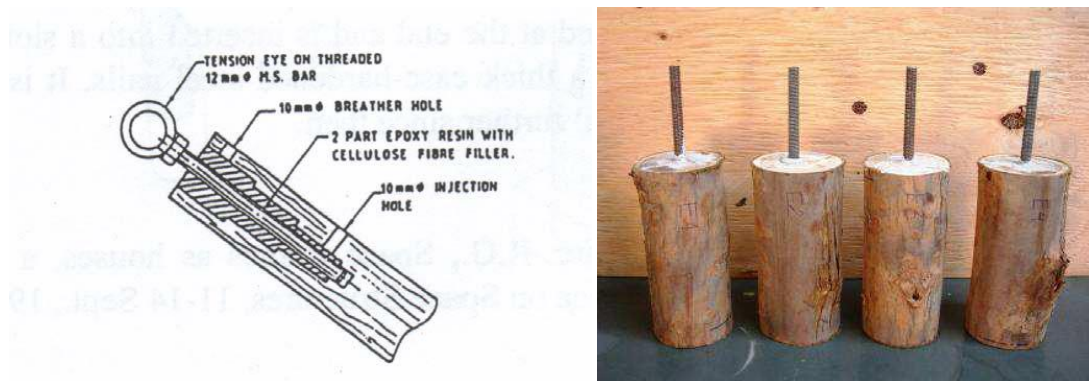


Figura 6.3 – Exemplos de ligações de varões colados (Yeates, 1999; Vale *et al.*, 2011)

Este tipo de ligação possui alguns inconvenientes. No caso de a rotura acontecer na cola, a ligação apresenta uma rotura frágil, pouco indicada para aplicação em estruturas. Furos longitudinais longos requerem aberturas para a saída de ar e processos complicados para um bom preenchimento dos espaços vazios. Em climas quentes ou muito húmidos a resina epóxi tem tendência para amolecer, comprometendo a integridade da ligação (Yeates, 1999). Wolfe e Hernandez (1999) referem problemas relacionados com a compatibilidade dos materiais. A madeira possui um coeficiente de expansão térmica diferente do aço ou plástico, e também possui maior variação dimensional sob variações de teor de água. Esta incompatibilidade leva a fendilhação e a eventual enfraquecimento da ligação, caso esta não tenha sido dimensionada tendo em conta estes factores. Outro problema referido está relacionado com os efeitos do teor de água da madeira na colagem. Quando este excede o valor de 15% a interacção química pode causar bolhas na camada de cola, reduzindo a área efectiva ao corte da linha de colagem.

Na Universidade de Bath (Burton *et al.*, 1998) foram realizados ensaios deste tipo de ligações usando resinas de baixa viscosidade e com aditivos de microfibras de celulose, de modo a melhorar as propriedades de fluidez. Nos seis ensaios realizados, com os diâmetros dos toros a variar entre os 65mm e os 70mm, foram obtidas cargas de rotura médias de 50kN (Huybers, 1996). As roturas deveram-se ao arrancamento do varão por cedência da superfície de colagem. O diâmetro e tipo de aço usado, bem como os comprimentos de colagem não são referidos.

Broughton e Hutchinson (2001) efectuaram ensaios de arrancamento, usando resina epóxi, em provetes de carvalho e freixo com teores de água a variar entre os 10 e os 38%, verificando-se uma redução linear da resistência com o aumento do teor de água, sendo que acima dos 30% a redução na resistência foi de 65%. Em ensaios piloto realizados por Schreyer *et al.* (2000) usando ciclos climáticos, que consistiram na variação da humidade relativa entre os 28 e os

90% e na variação temperatura entre os 3 e os 25°C, durante um período de 18 semanas, foi obtida uma redução de 15% na resistência à tracção da ligação.

Vale *et al.* (2011) estudaram este tipo de ligação em madeira de eucalipto (espécie híbrida de *Eucliptus grandis* e *Eucaliptus urophila*) com 4 anos, considerando toros com diferentes valores de teor de água. Consideraram três situações: provetes saturados, provetes com o teor de água de equilíbrio com o meio ambiente (14,2%) e provetes saturados nos quais foi induzida secagem localizada, através de uma barra quente, no furo de colagem do varão.

Os toros possuíam 180mm de comprimento, a resina epóxi utilizada foi a Sikadur 32 fluida e varão roscado de 12,7mm de diâmetro. O furo situava-se no centro do toro e possuía um comprimento de 80mm com um diâmetro que assegurava uma espessura de cola em torno do varão de 1,3mm. Foram realizados 12 ensaios no total, 4 em cada uma das situações de teor de água referidas anteriormente. O teor de água não apresentou influência significativa na resistência da ligação, sendo que as roturas aconteceram, em grande maioria, pelo varão roscado, com uma carga de rotura média de 41,6kN.

Os autores realizaram novos ensaios com um diâmetro de varão roscado superior, 19,05mm, mantendo todas as outras características da ligação, nomeadamente o comprimento e espessura de colagem. Nesse novo estudo o teor de água já apresentou influência no comportamento da ligação. Os provetes com teor de água de equilíbrio apresentaram roturas pela madeira com uma carga de rotura média de 70,4kN. Os provetes saturados apresentaram roturas na interface madeira/cola, com uma carga de rotura de apenas 38,7% da obtida nas ligações anteriores. No caso dos provetes saturados com secagem localizada ao nível do furo as roturas deveram-se a uma adesão parcial/incompleta entre a madeira e a cola, com uma carga de rotura de 56,6% da obtida nos provetes com teor de água de equilíbrio e 68,4% superior à dos provetes saturados.

Com o intuito de melhorar a secagem, os autores efectuaram novos ensaios onde verificaram que colocando no furo uma barra aquecida a 250° durante 90segundo era possível obter resistências similares às do arrancamento em madeira seca. No entanto, este estudo apenas foi efectuado com 3 provetes, 1 por cada incremento de 30 segundos de secagem, pelo que necessita de maior fundamentação.

### **6.2.3 Parafusos de rosca à tracção**

Este tipo de ligação é semelhante à ligação anterior, mas usando parafusos de rosca em lugar dos varões roscado. Assim, os parafusos rosca são aparafusados perpendicularmente aos topos dos elementos de madeira para fixação de chapas que posteriormente podem ligar a nós de ligação. O desempenho deste tipo de ligação depende bastante da massa volúmica e teor de água da madeira, bem como do comprimento de penetração do parafuso na madeira (Correia e Dias, 2006).

Hamm e Schnuriger (2002) testaram uma ligação deste tipo para a conexão dos topos de toros. Nos topos a ligar foi colocada uma chapa de encabeçamento que é aparafusada ao topo com parafusos na direcção do fio. A ligação dos topos é efectuada por rotação por um sistema de encaixe macho-fêmea existente nas chapas (Figura 6.4 e Figura 6.5), após encaixe, da cabeça dos parafusos no encaixe da outra placa.



Figura 6.4 – Placa de encabeçamento tipo macho (Hamm e Schnuriger, 2002)



Figura 6.5 – Placa de encabeçamento tipo fêmea (Hamm e Schnuriger, 2002)

Ensaio de flexão em 4 pontos foram efectuados em elementos com este tipo de ligação meio vão. As roturas deveram-se ao arrancamento dos parafusos situados na zona de tracção, sendo que a resistência à flexão obtida foi cerca de 95% da tabelada para a classe de madeira usada. Em termos de módulo de elasticidade, os valores obtidos foram de apenas 47% do valor do módulo de elasticidade da classe de madeira.

Correia e Dias (2006) efectuaram ensaios de arrancamento usando madeira serrada seca de *Pinus Taeda* (*Pinus Taeda L.*), *Eucalipto Grandis* (*Eucalyptus Grandis*) e *Cupiuba* (*Goupia Graba*). Os parafusos de rosca usados possuíam 7,5mm de diâmetro e 132mm de comprimento. Os autores avaliaram a influência da pré-furação e comprimento de penetração no arrancamento do parafuso.

Em termos de comprimento de penetração, os autores verificaram que até 80mm de perfuração a rotura era devida ao arrancamento do parafuso, a partir dos 80mm a rotura foi pela cabeça do parafuso. Em termos de pré-furação, foram testadas pré-furações de 5,5 e 6mm de diâmetro, com comprimentos de perfuração de 60 a 80mm. Os autores verificaram que a carga de rotura nas ligações com pré-furação de 5,5mm foi 13,5% superior à das ligações com pré-furação de 6mm.

Posteriormente os autores executaram ensaios de arrancamento em três configurações de ligações resultantes da variação do número de ligadores (4 a 16, com espaçamentos de 15mm entre ligadores), comprimento de perfuração (70 a 80mm) e diâmetro de pré-furação (5,5 a 6mm). As roturas deveram-se ao arrancamento dos parafusos com a carga de rotura a variar entre os 47,9kN, para 4 parafusos, e os 166kN, para 16 parafusos. Os autores constataram que



com o aumento do número de parafusos existe uma diminuição da carga máxima suportada por parafuso.

A influência do teor de água e do espaçamento dos parafusos foi igualmente estudada na configuração de 4 parafusos. Os autores verificaram que a consideração de espaçamentos entre 15 e 45mm não apresentava diferenças significativas em termos de cargas de rotura. Na avaliação da influência do teor de água foram consideradas as situações de provetes com teor de água de 12%, de 20% e provetes saturados. A carga de rotura das ligações com 20% de teor de água foi 26% inferior à das ligações a 12%, enquanto a carga de rotura das ligações saturadas foi 30% inferior.

#### 6.2.4 Chapas externas

Este tipo de união é baseado em ligações similares existentes para a madeira serrada. As chapas são moldadas de modo a se adequarem à face da madeira de secção circular, possuindo furos para o cravamento de pregos nos elementos de madeira (Figura 6.6). O tamanho das chapas e o número de ligadores a usar devem ser em função das forças a transmitir. As chapas também podem possuir ligadores soldados ou braçadeiras solidárias à própria chapa.

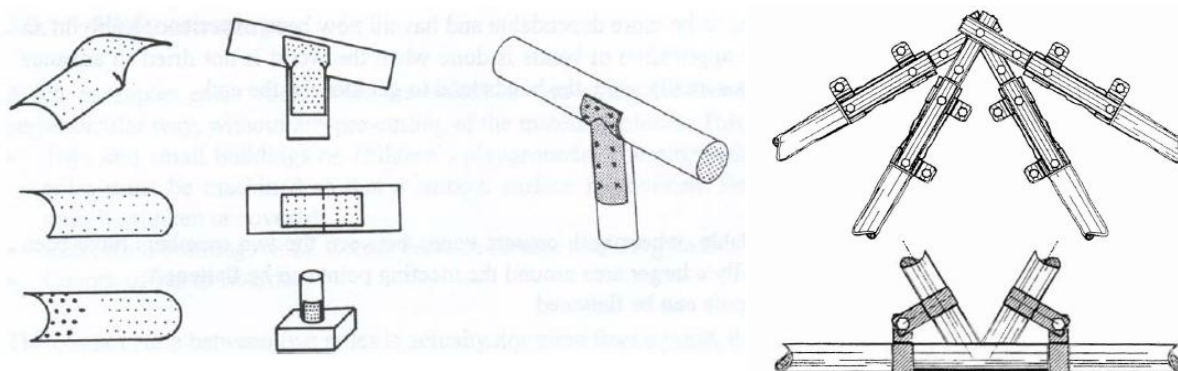


Figura 6.6 – Exemplos de chapas externas (Yeates, 1999; Lukindo *et al.*, 1997)

De modo a que a ligação seja viável, as chapas têm de ser pouco dispendiosas e adaptáveis às variações de diâmetro e forma entre os elementos. Isto pode ser conseguido se as chapas puderem ser adaptadas *in-situ*, de modo a ajustarem-se adequadamente à secção dos elementos de madeira, sem comprometer a integridade estrutural da chapa.

Existe ainda a possibilidade de as chapas possuíram nervuras que encaixam em sulcos maquinados nas extremidades dos toros (Figura 6.7). A ligação é usada, sobretudo, para a transmissão de esforços axiais. Os esforços de compressão são transmitidos por contacto entre os topos dos toros, enquanto que os esforços de tracção são assegurados pelo contacto entre a chapa metálica e os sulcos da madeira.



Figura 6.7 – Exemplo de chapa externa com nervuras (Morris *et al.*, 2008)

Morris *et al.* (2008) efectuaram estudos em ligações com chapas externas nervuradas. As ligações foram testadas em toros de Pinho radiata com 250mm de diâmetro e com 4 anéis de extremidade de 12mm de profundidade e espaçados entre si de 100mm. As chapas de aço possuíam 900mm de comprimento e 4mm de espessura.

Foram efectuados ensaios de compressão considerando a ligação composta por 1, 3 ou 4 anéis. As cargas de roturas variaram entre 240 e 820kN, o que se traduz numa carga de rotura de cerca de 200kN por Anel. Para o caso da ligação com 1 ou 3 anéis a resistir a rotura foi por escorregamentos dos sulcos de madeira na chapa, no caso de 4 anéis a rotura foi por compressão da madeira. Os autores verificaram que os nós podem ter uma influência benéfica na resistência da ligação, quando se situam na zona de contacto, por possuírem elevada massa volúmica.

As chapas externas também podem ser tubulares, envolvendo por completo os topos dos elementos a ligar (Figura 6.8). Neste caso é necessário que os topos dos toros sejam processados de modo a possuírem uma secção constante. Esta tipologia de chapa permite a transmissão de momentos flectores entre elementos. Este tipo de chapas externas permite transformar as estruturas em “kits” que podem ser facilmente montados.



Figura 6.8 – Ligações de chapas externas tubulares (Morris *et al.*, 2008; Al-Khattat, 2002)

### 6.2.5 Chapa central

Este tipo de ligação consiste num corte longitudinal no elemento de madeira, no qual uma chapa de aço é colocada. Cavilhas, parafusos de porca ou pregos são inseridos na direcção perpendicular à direcção longitudinal da chapa, trespassando o elemento de madeira. O uso da chapa de aço permite transferir esforços usando um número variado de ligadores, sendo assim possível maximizar a capacidade da ligação. Em casos de pequenos esforços existe a possibilidade de usar chapas de pequena espessura (1mm), podendo facilmente ser trespassadas por pregos, que podem constituir o nó de ligação (Figura 6.9).

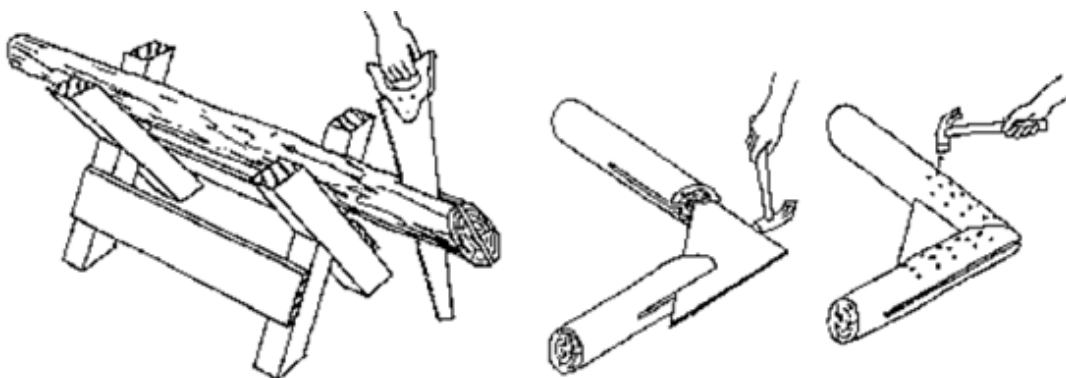


Figura 6.9 – Ligações com uso de chapas centrais finas (Stulz e Mukerji, 1993)

Nos casos em que são espectáveis maiores esforços a solução passa por usar ligadores de maior diâmetro, como cavilhas ou parafusos de porca e, conseqüentemente, pré-furações nos elementos de madeira, e chapas de maior espessura unidas a nós de ligação (Figura 6.10). Existe ainda a possibilidade do usar cintas em torno dos elementos de madeira, minimizando o movimento e a fissuração da ligação. Estas cintas devem ser aplicadas na madeira a um teor de água inferior ao previsto para a sua aplicação estrutural em serviço.

Para a execução de cintas os materiais mais adequados são o arame ou bandas metálicas. No caso de serem usadas cavilhas ocas como ligadores, existe a possibilidade de o arame passar pelo interior da cavilha e contornar a secção do toro (Figura 6.11).



Figura 6.10 – Ligações de chapa central (Jorissen, 2006)

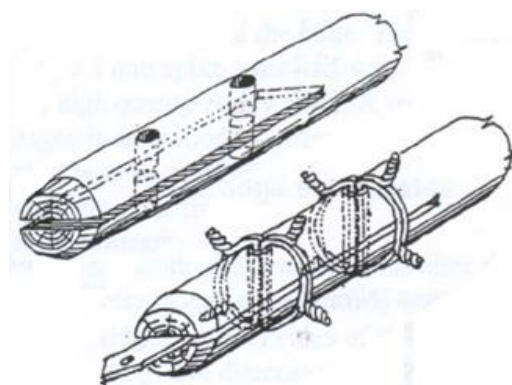


Figura 6.11 – Aplicação de cintas de arame (Yeates, 1999)

Apesar da aplicação de cintas melhorar o desempenho da ligação, a sua eficiência é reduzida em serviço. Isto deve-se à variação dimensional da madeira, que pode causar o abrandamento das cintas que, conseqüentemente, deixam de se tornar parte efectiva da ligação (Yeates, 1999). Um outro problema do uso de cintas está relacionado com a estética, tornando a ligação pouco apelativa em termos visuais.

Estudos sobre o comportamento destas ligações foram efectuados por Huybers (*apud* Lukindo *et al.*, 1997). O autor estudou diversas configurações de ligações, variando o diâmetro dos toros (100 ou 120mm), diâmetro das cavilhas ocas (17,2 ou 21,3mm), número de cintas de arame (2 ou 4) e espessura das chapas centrais (6 ou 8mm). As ligações possuíam duas cavilhas espaçadas de 5 vezes o seu diâmetro, a distância entre o topo do toro e a primeira cavilha era de 7 vezes o diâmetro desta. A carga de rotura variou entre 68,9 e 124,5kN. Os autores verificaram que nas ligações com toros de 120mm de diâmetro a carga de rotura obtida para as ligações com 4 cintas foi superior em 16% à das ligações com apenas 2 cintas.

A carga de rotura das ligações com toros de 100mm de diâmetro do toro foi estimada pelo autor, considerando que os ligadores eram parafusos de 17,2mm de diâmetro, no lugar de cavilhas ocas, e usando uma análise plástica limite. A espessura dos elementos de madeira foi considerada igual ao raio do toro deduzido de metade da espessura da chapa e usada a massa volúmica dos elementos de madeira. A carga de rotura estimada foi 12% superior à obtida experimentalmente. Procedimento semelhante foi usado para as ligações de 120mm de diâmetro. Para as ligações com 2 laços, a carga estimada foi similar à experimental, no caso de ligações com 4 laços, o valor experimental ficou 12,5% acima do valor previsto.

Houtman *et al.* (1998) efectuaram estudo similar usando dois tipos de ligadores e toros de 100, 120, 150 e 200mm de diâmetro. Uma tipologia de ligação era constituída por configurações de duas ou quatro cavilhas ocas, de 17 ou 21,3mm de diâmetro, pelo interior das quais passavam 1 ou 2 cintas de arame, com 4 a 5mm de espessura. A distância do topo do elemento de madeira até à primeira cavilha era de 4,4 a 4,7 vezes o diâmetro desta. O espaçamento entre cavilhas era de 4,7 a 5,8 vezes o diâmetro destas. A outra tipologia de ligação estudada era constituída por configurações de dois ou quatro parafusos de porca, de 16mm de diâmetro com anilhas, com 2 cintas de arame, de 4 a 5mm de espessura, aplicadas em cada parafuso. O espaçamento entre parafusos, e entre o parafuso mais próximo do topo do elemento e o topo, era de 7 vezes o diâmetro do parafuso.

Os autores efectuaram ensaios à tracção para determinação das cargas de rotura das ligações e posteriormente compararam-nas com as cargas de rotura estimadas usando uma análise plástica limite, considerando a largura da ligação igual ao diâmetro do elemento de madeira.

O modo de rotura evidenciado pela maioria das ligações passou pela formação de uma rótula plástica no ligador com esmagamento na madeira, este modo de rotura também foi o mais limitativo na análise plástica limite efectuada pelos autores. A carga de rotura das ligações de

cavilhas variou entre 68,9 e 281kN, enquanto a carga das ligações com parafusos variou entre 135,9 e 311,1kN. As cargas estimadas, no caso das ligações com cavilhas, foram 18% inferiores, em média, aos valores experimentais. No caso das ligações de parafusos, as cargas estimadas foram 38% inferiores às experimentais. A maior diferença entre os valores experimentais e estimados nesta última tipologia, segundo os autores, deveu-se à fricção introduzida pelas anilhas quando o parafuso plastifica.

De modo a aferir a influência das cintas, os autores testaram, em toros de 115mm de diâmetro, ligações constituídas por uma única cavilha de 16mm de diâmetro com e sem cintas aplicadas. As ligações sem cintas apresentaram uma carga de rotura média de 59,2kN, a qual foi 9,6% inferior à carga estimada usando uma análise plástica limite. As mesmas ligações, mas com uma cinta aplicada, apresentaram uma carga de rotura média de 66,3kN, apenas 1,2% inferior à estimada.

Lukindo (Lukindo *et al.*, 1998b) estudou ligações de chapa central usando um único ligador com o objectivo de aferir a aplicabilidade da análise plástica limite na previsão da carga de rotura deste tipo de ligações. O autor analisou 9 configurações desta ligação, resultantes da combinação de 3 diâmetros de toros de Red pine (63,5; 76,2 e 101,6mm) e 3 diâmetros de parafusos (8; 12,7 e 19,1mm). Os toros possuíam com massa volúmica média de 404,9kg/m<sup>3</sup> e um teor de água de 12%, distância do topo da peça de madeira ao ligador era de 3,5 vezes o diâmetro deste e a chapa possuía uma espessura de 6,4 mm. Não foram usadas porcas ou anilhas e foi mantida uma distância de 6,4mm entre a cabeça do parafuso e a superfície da madeira, de modo a que os parafusos se comportem como cavilhas.

Os ensaios de tracção foram realizados com medição do deslocamento da chapa central. As cargas de rotura variaram entre os 8,9kN para os toros com 63,5mm de diâmetro e parafuso com 7,9mm de diâmetro, e os 41,9kN para toros com 101,6mm de diâmetro e parafuso com 19,1mm de diâmetro. No cálculo da carga estimada, os autores consideraram a espessura dos elementos de madeira foi igual ao raio médio dos elementos de madeira deduzido de metade da espessura da chapa central. Os valores estimados foram, em média, 8% superiores aos experimentais. Valor similar ao obtido por Houtman *et al.* (1998), para configuração de ligação semelhante.

Os mesmos autores (Lukindo *et al.*, 1998a) investigaram a utilização de placas centrais com nervuras neste tipo de ligação (Figura 6.12). As chapas nervuradas tinham 6,4mm de espessura e 6 nervuras de 5mm de raio espaçadas de 38mm, 3 na parte superior e 3 na parte inferior. O estudo foi efectuado com toros de 76,2 mm de diâmetro e usando um parafuso de 12,7mm de diâmetro, com anilhas concavas com 50mm de diâmetro.

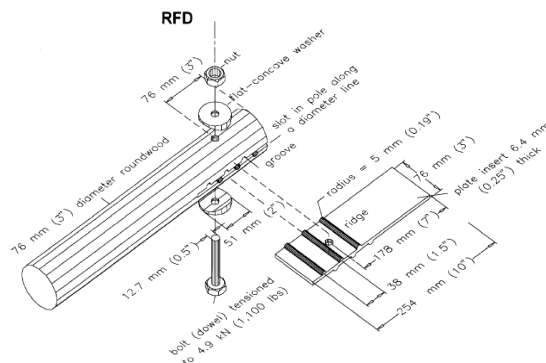


Figura 6.12 – Ligações com chapa central rugosa (Lukindo *et al.*, 1998a)

Os autores verificaram que usando apenas a placa rugosa sem qualquer ligador era possível obter cargas de rotura médias de 22,2kN, aumentando este valor para 37,0kN quando usado o parafuso. Assim a carga de rotura foi cerca de 40% superior a similar configuração com chapa lisa. Em termos de rigidez, a ligação com chapa nervurada apresentou o valor de 17,9 kN/mm, cerca do dobro da obtida para ligação similar com chapa lisa. As ligações com chapa nervurada apresentaram, no entanto, maior variabilidade de resultados que as similares com chapa lisa. O problema da transmissão de esforços por fricção, e consequentemente deste tipo de ligações, está no facto de esta poder diminuir sob carregamentos longos ou devido a variações dimensionais da madeira.

Yeh e Lin (2007) obtiveram a carga de rotura para duas configurações de ligações de placa central. Os elementos de madeira de Taiwan (*Taiwania cryptomerioides* Hay) possuíam diâmetros entre 120 e 150mm. As configurações eram constituídas por 1 ou dois parafusos de 15,88mm de diâmetro e uma placa central de 5mm de espessura. Os autores verificaram que as ligações com o mesmo número de parafusos mas com diâmetros de toros diferentes apresentaram cargas de rotura similares. Assim, nas ligações com um parafuso foi obtida uma carga de rotura média de 39,4kN, nas ligações com dois parafusos a carga de rotura média foi de 80,0kN.

Wolfe *et al.* (2003) estudaram ligações com duas chapas longitudinais, paralelas entre si, de 3,2mm de espessura, usando pregos como ligadores (Figura 6.13). As chapas foram colocadas longitudinalmente a uma distância da periferia da secção transversal de metade do comprimento do prego. Foram estudadas diversas configurações de ligações em função do número de pregos, 8 a 32, espaçados de 25mm entre si (Figura 6.13). A distância do topo do toro à primeira linha de pregos não é referida, estimando-se, pelos esquemas apresentados pelos autores, que seja próxima de 50mm. Os pregos usados possuíam 72mm de comprimento e 3,7mm de diâmetro. Os toros de Pinho de Ponderosa foram torneados para um diâmetro de 150mm e condicionados para um teor de água de 12%, possuindo uma massa volúmica média de 420kg/m<sup>3</sup>.

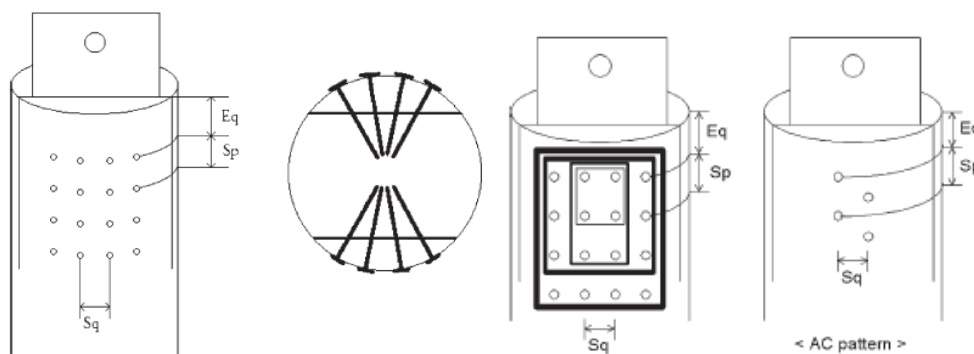


Figura 6.13 – Configurações da ligação com duas chapas longitudinais pregadas estudada por Shim *et al.* (2009)

As ligações foram ensaiadas à tracção com medição do deslocamento das chapas relativamente ao topo do toro. Os autores verificaram que ligações com a mesma configuração apresentaram cargas de rotura similares, mas modos de rotura e comportamentos diferentes, algumas roturas apresentaram comportamento dúctil enquanto outras apresentaram comportamento frágil.

Nas ligações onde foram usados 8 ou 12 pregos, a rotura deveu-se a plastificação dos pregos. Nas restantes ligações com 24 e 32 pregos ocorreu arrancamento de um bloco de madeira devido à resistência à tracção e ao corte da madeira terem sido excedidas. As cargas de rotura médias foram de 39kN para ligações com 8 pregos, de 56,7kN para ligações com 12 pregos, de 110,6kN para ligações com 24 pregos e de 126,6kN para ligações com 32 pregos.

Ligações similares foram estudadas por Shim (2004), mas usando apenas uma chapa central de 3,2mm de espessura. Os elementos de madeira da ligação consistiam em toros torneados de Larício do Japão de 60mm de diâmetro, com uma massa volúmica média de  $540 \text{ kg/m}^3$  e um teor de água de 12%. Foram efectuados 50 ensaios de tracção e testadas diversas variantes da ligação, sendo as variáveis o número de linhas de pregos, o número de pregos por linha e a aplicação ou não de cintas (Figura 6.14). Os pregos possuíam 61mm de comprimento e 3,7mm de diâmetro. A distância entre a primeira linha de pregos e o topo do elemento de madeira era de 75mm, e o espaçamento entre pregos de 25mm.

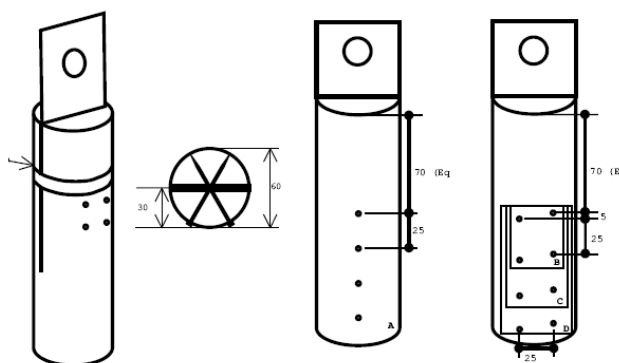


Figura 6.14 – Configurações da ligação de chapa central pregada estudada por Shim (2004)

O autor constatou que as ligações com cintas possuíam mais ductilidade que as congéneres sem bandas. Em termos de roturas, estas foram causadas pela plastificação dos ligadores ou pela rotura das fibras da madeira numa combinação de corte e tracção. A configuração de 4 pregos em linha teve uma carga de rotura inferior em 64% à configuração de 4 pregos em duas linhas paralelas (Figura 6.14). As cargas de rotura variaram entre os 18kN para a configuração com 4 pregos, 2 por linha, e os 20,9kN para 8 pregos, 4 por linha, verificando-se assim que não existiu um significativo aumento da carga de rotura com o aumento do número de pregos. A utilização de cintas permitiu aumentar a capacidade de carga das ligações entre 117 e 160%.

### 6.2.6 Sistema de ancoragem

Este tipo de ligações consiste, essencialmente, num varão roscado, que é inserido num furo longitudinal, o qual enrosca num bloco de ancoragem existente numa cavidade situada na extremidade do furo longitudinal (Figura 6.15). O bloco de ancoragem pode ser uma barra metálica prismática ou uma cavilha. No topo do toro é colocado um disco que enrosca no varão roscado até entrar em contacto com o topo do toro. Este disco permite uma distribuição uniforme da tensão no caso de esforços de compressão. O uso de cavilhas como bloco de ancoragem torna a execução da ligação mais fácil, podendo a cavidade que irá albergar a cavilha ser realizada através de um furo. Tal como no caso da tipologia de ligação anterior, podem ser aplicadas cintas para melhorar o desempenho da ligação.



Figura 6.15 – Ligação de sistema de ancoragem usando uma barra metálica prismática como bloco de ancoragem (Vries e Gard; 2006a)

Sluis *et al.* (1998) efectuaram estudos com duas configurações deste tipo de ligação, usando uma barra metálica prismática como bloco de ancoragem. Os elementos de madeira eram toros torneados de Larício do Japão com uma massa volúmica entre 450 e 650kg/m<sup>3</sup> e um teor de água entre 12 e 15%. A primeira configuração foi executada em toros torneados de 140mm de diâmetro, usando varão roscado de 20mm de diâmetro, e uma barra prismática de 85x40x40mm situada a 250mm do topo do toro. Na segunda configuração foram usados toros torneados de 100mm de diâmetro, varão roscado de 16mm de diâmetro, e uma barra prismática de 75x30x30mm situada a 180mm do topo do toro.



As forças máximas obtidas nos ensaios de tracção variaram entre 60 e 80kN, para as ligações em toros de 100mm de diâmetro, e entre 110 e 145kN, para as ligações em toros de 140mm de diâmetro. Os autores verificaram, em ensaios exploratórios, que a utilização de cintas neste tipo de ligação permitia obter cargas de rotura 20% superiores. Os autores realizaram igualmente ensaios de compressão neste tipo de ligação verificando que as roturas aconteceram por compressão na madeira.

Eckelman e Senft (1995) estudaram ligação semelhante, mas usando uma cavilha metálica em lugar do bloco de ancoragem (Figura 6.16). As ligações foram executadas em toros de Yellow poplar (*Liriodendron tulifera*) com 457,2mm de comprimento e diâmetros entre 158,8 e 190,5mm. A madeira foi seca de forma rápida de modo a provocar fissuras. As cavilhas possuíam 38,1mm de diâmetro e um furo a meio para aparafusamento de um varão roscado de 19,1 mm de diâmetro. Os furos na madeira, para colocação das cavilhas, foram abertos a 152,4mm de cada um dos topos. No estudo foram considerados 3 grupos de ligações de modo a avaliar diferentes aspectos.

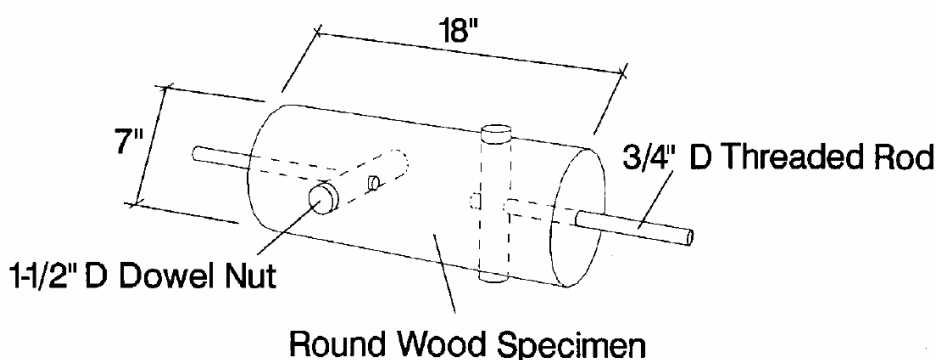


Figura 6.16 – Esquema da ligação com cavilha metálica como bloco de ancoragem estudada por Eckelman e Senft (1995)

Num grupo, as cavilhas foram colocadas com os eixos paralelos ou perpendiculares entre si e em zonas sem fendas. Desta forma os autores pretenderam obter a resistência em condições ideais e averiguar a influência da posição relativa das cavilhas. Nos ensaios com as cavilhas paralelas foi obtida uma carga média de 96,9kN, nos de cavilhas perpendiculares a carga de rotura média foi de 106,1kN. Desta forma, verifica-se que a orientação relativa das cavilhas não possui influência significativa no desempenho da ligação.

Um outro grupo era constituído por ligações cujas cavilhas estavam alinhadas com fendas, de modo a averiguar a influência deste aspecto no desempenho da ligação. A carga de rotura média das ligações nestas condições foi de apenas 63,1kN, cerca de 37% inferior a ligações similares onde se evitaram fendas, cuja carga de rotura média foi de 100,2kN.

O último grupo de ligações possuía as mesmas características que as ligações do grupo anterior, sendo que adicionalmente foi colocada uma cinta metálica na extremidade da

ligação. A carga de rotura média subiu para 96,0kN, apenas 8% inferior, em média, à de ligações semelhantes onde se evitaram fendas (112,7kN).

Wolfe *et al.* (2000a e 2000b) executaram este tipo de ligação em toros torneados de *Pseudotsuga* de 127 e 165mm de diâmetro, com uma massa volúmica média de 432,6kg/m<sup>3</sup> e um teor de água médio de 10%. O furo para a inserção da cavilha foi efectuado a 254mm do topo do toro, com um diâmetro superior em 6,25mm ao diâmetro das cavilhas. Estas possuíam um diâmetro de 44,5mm e o varão roscado um diâmetro 19mm.

Nas ligações com toros de 127mm de diâmetro foi colocada uma cinta na proximidade da cavilha, para fornecer resistência a esforços de corte e tracção na direcção perpendicular às fibras. Nas ligações com peças de diâmetro de 165mm foram aplicadas duas cintas, uma junto à cavilha e outra na extremidade do toro.

Nos ensaios de tracção das ligações de 127mm de diâmetro foi obtida uma carga de rotura média de 130kN e uma rigidez média de 150kN/mm. No caso das ligações de 165mm de diâmetro, a carga de rotura média foi de 175kN e a rigidez média de 175kN/mm. A rotura mais comum foi por corte, resultando na saída de um bloco de madeira. Segundo os autores, a qualidade da madeira, nomeadamente no que toca a fendas, excentricidade da medula, lenho de reacção e desvio do fio, influência de forma significativa o desempenho da ligação.

Eckelman (2004) estudou ligações em que a cavilha sólida é substituída por um tubo metálico (Figura 6.17), aparafusando o varão roscado numa porca situada no interior do tubo metálico. O autor afirma que deste modo é possível obter ligações mais económicas.

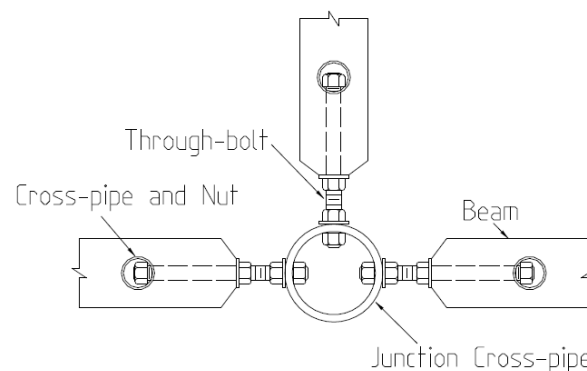


Figura 6.17 – Ligações com cavilhas ocas como bloco de ancoragem propostas por Eckelman (2004)

As ligações foram executadas em toros de Yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera*) com 457,2mm de comprimento e 152,4mm de diâmetro que foram sujeitos a secagem severa, o que gerou fendas. A ligação era formada por uma cavilha com 50,8mm de diâmetro situada a 152,4mm do topo do toro e por um varão roscado com 25,4mm de diâmetro. Foi estudada a hipótese de reforçar os topos dos elementos com uma cinta.

Nos ensaios de tracção realizados, grande parte das roturas deveu-se a fendas originadas por forças de tracção na direcção perpendicular às fibras. A carga de rotura média foi de 32,2kN nas ligações ensaiadas sem qualquer reforço. No caso das ligações com cinta, a carga de rotura média foi de 78,9kN. Segundo o autor, o uso do reforço permitiu um aumento da capacidade de carga das ligações na ordem dos 145%, bem como uma diminuição da variabilidade. Estudo sobre a aplicação deste tipo de ligação em treliças pode ser encontrado em Eckelman *et al.* (2007).

### **6.2.7 Avaliação qualitativa das tipologias de ligação**

As ligações são um elemento essencial para um bom desempenho estrutural da madeira de secção circular. Mediante a revisão bibliográfica realizada, constata-se que vários desenvolvimentos têm sido realizados nos últimos anos. No entanto, nenhuma solução actual consegue, ainda, ser económica, de fácil uso, esteticamente agradável e universal, de modo a evitar o fabrico de um sistema de ligação para cada caso particular e assim permitir a produção em massa. As soluções existentes podem ser, resumidamente, agrupadas nas seguintes tipologias de ligação:

- madeira-madeira;
- varões colados;
- parafusos de rosca à tracção;
- chapas externas;
- chapa central;
- sistema de ancoragem.

As ligações madeira-madeira, são baseadas nos métodos tradicionais de construção e são soluções simples de baixo valor tecnológico. Este tipo de ligação tem a vantagem de ser simples e fácil de montar. A desvantagem está relacionada com o facto de essa simplicidade limitar também a sua versatilidade na construção. Os nós de ligação apenas podem ligar um número limitado de elementos, restringindo assim o seu potencial. Existe a possibilidade de a ligação ser constituída apenas por entalhes, não possuindo ligadores, sendo nesse caso adequada apenas para a transmissão de esforços de compressão.

As ligações de varões colados permitem uma resistência à tracção bastante superior às oferecidas pelas ligações madeira-madeira. A capacidade de carga é elevada, sendo dependente da classe de varão usado e número de varões. Como os varões se encontram embutidos na madeira a ligação é bastante discreta, apresentando poucas peças metálicas visíveis. No entanto, este tipo de ligação possui alguns problemas. No caso de a rotura acontecer na cola, a ligação apresenta uma rotura frágil, pouco indicada para aplicação estrutural. Comprimentos de colagem longos podem requerer aberturas para a saída de ar e processos complicados para um bom preenchimento dos espaços vazios. As ligações coladas apresentam bastante potencial por explorar, resistem tanto a esforços axiais de tracção como de compressão, podendo ser facilmente ligadas a nós de ligação, sendo assim ideais para

sistemas treliçados. Não são adequadas para resistirem a momentos flectores, por provocarem esforços na direcção perpendicular às fibras, aos quais a madeira é bastante débil.

As ligações de parafusos de rosca à tracção são semelhantes às ligações de varões colados, mas usando parafusos para o mesmo fim. Possuem a vantagem de poderem ser executadas imediatamente, não sendo necessário esperar que a cola seque. No entanto, para se atingirem elevadas cargas de roturas são necessários vários parafusos de elevado diâmetro, requerendo pré-furação, tornando a execução da ligação mais complexa. Para além disso, contrariamente às ligações de varões roscados onde o próprio varão pode ligar a nós de ligação, as ligações de parafusos de rosca à tracção requerem uma chapa de encabeçamento que tenha, por exemplo, um varão soldado que liga a nós de ligação.

As ligações de chapas externas possuem a vantagem de, para além de esforços axiais, poderem transmitir momentos flectores entre elementos. No entanto, este tipo de ligação requer que os elementos de madeira sejam torneados, para além de possuir bastantes elementos metálicos visíveis penalizando, bastante a sua estética.

As ligações de chapa central permitem transferir esforços usando um número variado de ligadores, sendo assim possível obter uma elevada capacidade de carga, em bibliografia foram obtidas cargas de rotura até 311,1kN, podendo esta ser aumentada com o uso de cintas. Estas ligações resistem a esforços axiais de compressão e de tracção, podendo ser facilmente unidas a nós de ligação, mas não são ideais para transmitir momentos flectores, sendo assim adequadas para uso em sistemas treliçados. Este tipo de ligação possui algumas peças metálicas visíveis, embora em menor quantidade que a ligação anterior, o que a penaliza em termos estéticos.

As ligações de sistema de ancoragem que usam cavilhas como bloco de ancoragem, em detrimento de uma barra metálica prismática, possuem uma maior facilidade de execução uma vez que facilmente se efectua um furo para inserção da cavilha, contrariamente à caixa para abrigo da barra prismática. Ainda assim, o processo de fabrico destas ligações é mais complexo que as ligações anteriores, exigindo precisão na execução dos furos. Em termos estético, é uma ligação com poucas partes metálicas visíveis. A carga de rotura desta ligação é elevada, em bibliografia foram obtidas cargas de rotura até 175kN, podendo ainda ser melhorada caso sejam usadas cintas metálicas para confinamento da madeira, evitando-se assim roturas por tracção na direcção perpendicular às fibras.

A madeira de secção circular de pequeno diâmetro de Pinheiro bravo terá a sua principal aplicação em estruturas treliçadas, onde o seu pequeno diâmetro e peso reduzido são uma vantagem deste material. Nesse sentido, em termos estruturais, pretende-se uma ligação que resista a elevados esforços de compressão e tracção e que seja económica, fácil de executar e apelativa em termos estéticos. De modo a tomar decisões para o presente estudo, apresenta-se

na Tabela 4.9 uma comparação, em termos qualitativos, destas características das tipologias de ligação apresentadas anteriormente.

Tabela 6.1 – Comparação das tipologias de ligação existentes

Ligações	Capacidade de carga	Custo	Complexidade	Estética
Madeira-madeira	Média	Baixo	Baixa	Média
Varões colados	Elevada	Baixo	Baixa	Elevada
Chapas externas	Média	Médio	Média	Baixa
Chapa central	Elevada	Médio	Baixa	Média
Parafusos de rosca à tracção	Elevada	Baixo	Média	Elevada
Sistema de ancoragem	Elevada	Baixo	Elevada	Média

Da análise da Tabela 4.9, verifica-se que as ligações com melhor desempenho nas características definidas são as ligações coladas, seguidas pelas ligações de parafusos de rosca à tracção, ligações de chapa central e de sistema de ancoragem. Assim, estas tipologias serviram de base ao desenvolvimento de ligações para a madeira de secção circular de pequeno diâmetro de Pinheiro bravo, e que se apresenta no ponto seguinte. Como as ligações aparafusadas são similares às coladas, mas são mais onerosas que estas últimas, esta tipologia não irá ser tida em conta.

### 6.3 Ensaio de ligações

As ligações estudadas com madeira de secção circular de Pinheiro bravo são baseadas em chapas centrais, varões colados e sistemas de ancoragem, pelas razões enunciadas no ponto anterior. As configurações das ligações foram definidas com o objectivo de maximizar a carga de rotura, mas tendo como referência um comprimento de ligação de 250mm. Valor que se achou razoável de modo a evitar, por um lado, que a ligação se torne demasiado onerosa e, por outro, constitua grande parte do comprimento do toro.

Os elementos de madeira para a execução das ligações foram obtidos de toros de Pinheiro bravo não torneados segmentados de modo a obter troços rectos, sem degradação biológica ou fendas profundas. Estes foram posteriormente colocados numa sala climatizada onde foram sujeitos a uma temperatura de 20°C e a uma humidade relativa de 65% até ser atingido o teor de água de equilíbrio.

Os provetes são constituídos por duas ligações, uma em cada topo do elemento de madeira, e foram sujeitos a ensaios de tracção segundo o preconizado na norma EN 26891 (CEN, 1991) para determinação da rigidez e carga de rotura. Assim, em cada ensaio é obtida a rigidez de duas ligações mas apenas a carga de rotura de uma delas. As particularidades do ensaio de cada uma das tipologias de ligação estudadas são apresentadas nos pontos seguintes.

### 6.3.1 Ligações de chapa central

As ligações de chapa central, tal como já referido anteriormente, consistem em chapas metálicas inseridas em rasgos longitudinais nos topos dos toros. A ligação entre a madeira e a chapa é efectuada com ligadores que trespassam os elementos de madeira e a chapa.

Na definição da configuração da ligação a estudar procurou-se maximizar a carga de rotura tendo em conta os espaçamentos preconizados no EC5 (CEN, 2002) e o comprimento de ligação estabelecido de 250mm. Assim, considerando que o espaçamento do ligador ao topo deve ser de 7 vezes o diâmetro do ligador e que o espaçamento entre ligadores deve ser igual a 5 vezes o diâmetro do ligador, o comprimento de ligação é maximizado para 2 ligadores com 18mm de diâmetro.

A espessura da chapa metálica foi considerada igual a 8mm de modo a evitar esmagamento neste elemento da ligação. O comprimento considerado foi de 420mm com 120mm de largura, por ser o perfil comercial disponível. Na configuração dos furos da chapa foi considerada uma distância do ligador interior à extremidade mais próxima da chapa de 30mm, de modo a evitar roturas por corte na chapa.

Mediante as decisões tomadas é apresentada na Figura 6.18 um esquema da configuração da ligação de chapa central que foi estudada em toros de 600mm de comprimento com diâmetros entre 95,0 e 141,5mm. Optou-se por não aplicar cintas porque, apesar dos possíveis ganhos em termos de capacidade de carga, tornam a execução mais complexa, tendem a perder eficiência devido às variações dimensionais da madeira e causam um impacto visual na ligação pouco apelativo em termos estéticos.

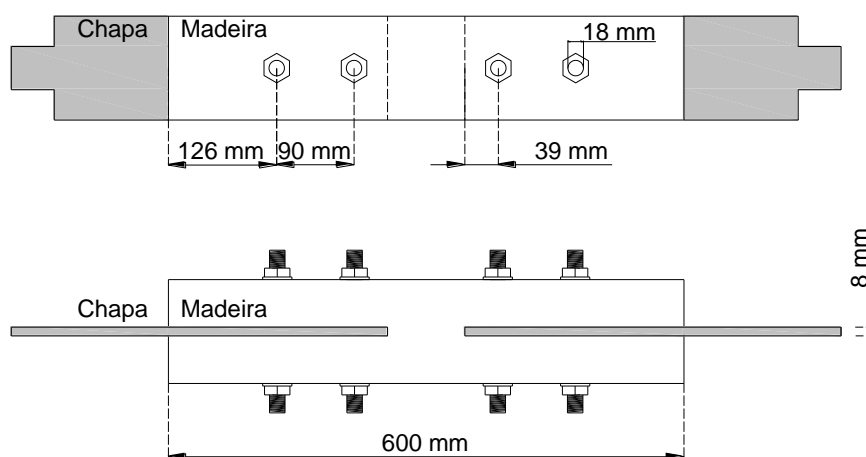


Figura 6.18 – Esquema da ligação de chapa central estudada

A execução das ligações passou, inicialmente, pela abertura de um rasgo longitudinal, nos elementos de madeira, com 260mm de comprimento e 10mm de abertura e, posteriormente, pela abertura de furos de 18mm de diâmetro para a passagem dos ligadores. Este procedimento foi efectuado em cada um dos topos dos elementos de madeira, procurando que

as chapas ficassem alinhadas. Igual configuração de furação foi aberta nas chapas metálicas. Adicionalmente, foi necessário efectuar um ajuste na extremidade livre das chapas metálicas para que estas pudessem ser colocadas nas garras da máquina de ensaio. As chapas foram solidarizadas aos elementos de madeira através do aperto de varão roscado de 18mm de diâmetro, classe 8.8, com 200mm de comprimento usando porcas e anilhas. Na Figura 6.19 é apresentada uma ligação de chapa central realizada de acordo com o referido.



Figura 6.19 – Ligação de chapa central estudada

O ensaio de tracção foi realizado numa prensa com capacidade para 200kN. Numa primeira fase as ligações foram colocadas na prensa, sendo as extremidades livres colocadas nas garras e apertadas. As cabeças de carga da prensa permitem a rotação em torno do eixo da peça de madeira, aspecto útil na possibilidade de as chapas não se encontrarem perfeitamente alinhadas (Figura 6.20). Na Figura 6.21 é apresentada uma ligação já colocada na máquina de ensaio.



Figura 6.20 – Pormenor da colocação de uma ligação de chapa central na prensa de ensaio



Figura 6.21 – Ligação de chapa central colocada na prensa de ensaio

A medição da força aplicada foi efectuada pela célula de carga da própria prensa, situada acima da cabeça de carga superior (Figura 6.20). Para a medição dos deslocamentos de cada ligação foi necessário material auxiliar. Assim, foram colocados deflectómetros de 25mm, com um erro de não linearidade de 0,1%, acoplados às chapas centrais para medição da deformação vertical da ligação relativamente a chapas perpendiculares às centrais, colocadas imediatamente depois do último ligador, de modo a contabilizar o mínimo possível a deformação elástica da madeira (Figura 6.22). Os deflectómetros e a célula de carga encontravam-se ligados a um equipamento de aquisição de dados que efectuava leituras segundo a segundo.

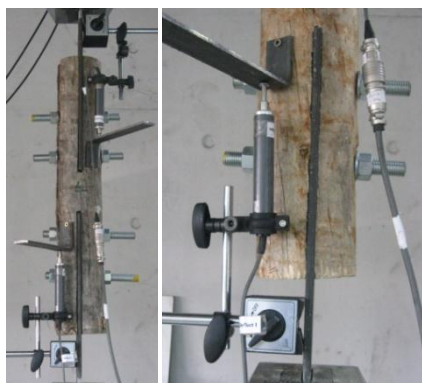


Figura 6.22 – Pormenor da medição de deslocamentos nas ligações de chapa central

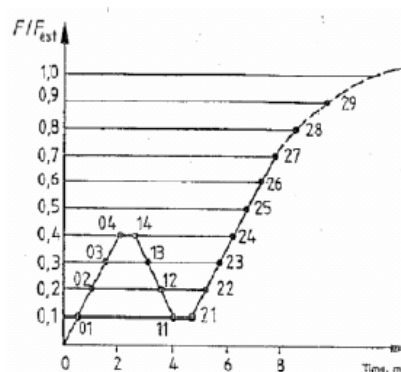


Figura 6.23 – Procedimento de carga (CEN, 1991)

As ligações foram sujeitas ao procedimento de carga preconizado na norma EN 26891 (CEN, 1991), apresentado na Figura 6.23, durante o qual foi feita a contínua monitorização da força e deslocamento das ligações para determinação da sua carga de rotura e rigidez. Como foi referido na nota introdutória, este esquema de ensaio permite a determinação da rigidez das duas ligações, mas a carga de rotura de apenas uma delas.

Para a aplicação do procedimento de ensaio foi necessário obter uma carga estimada de rotura para cada ligação ( $F_{est}$ ). Para tal, foram efectuados alguns ensaios preliminares e procurou-se ensaiar as ligações por ordem crescente de diâmetro dos elementos de madeira, de modo a ser possível ajustar a força estimada em função dos valores de força de rotura obtidos até então.

Tendo em conta a força de rotura estimada, a velocidade de ensaio foi definida de tal modo que 40% da carga estimada de rotura seja atingida em 120s. Definida a velocidade de ensaio, as ligações foram traccionadas até 40% da carga de rotura estimada, sendo mantida esta carga por 30 segundos. Após este patamar, a força aplicada foi reduzida para 10% da carga de rotura estimada e mantida durante 30s, carregando-se seguidamente a ligação até 70% da carga de rotura. A partir desse valor de carga o ensaio passou a ser efectuado em controlo de deslocamento, isto é, o deslocamento no ponto de aplicação de carga variou uniformemente até ao final do ensaio, assegurando que a rotura, ou a deformação máxima de 15mm, foram atingidas antes de 15 minutos de tempo total de ensaio. Ensaios preliminares permitiram chegar ao valor de 0,035mm/s para a velocidade de controlo em deslocamento.



Na Figura 6.24 é apresentado o gráfico força-tempo típico destes ensaios, verificando-se que o procedimento de ensaio foi devidamente seguido. Na Figura 6.25 é apresentado o gráfico força-deslocamento para uma ligação, a parte final longa deve-se à plastificação do ligador.

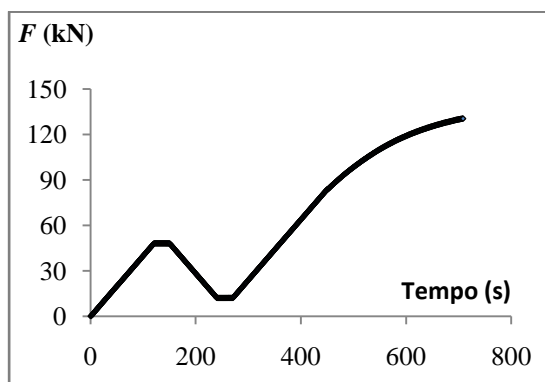


Figura 6.24 – Gráfico força-tempo típico deste tipo de ensaio

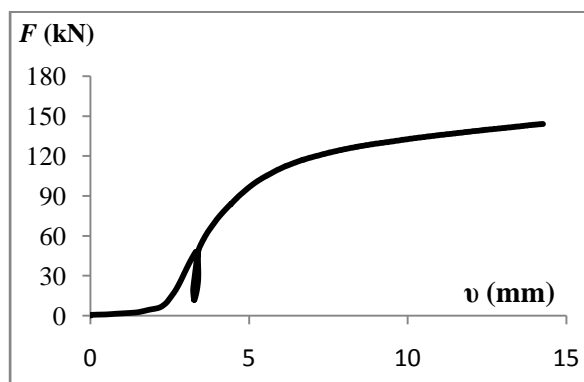


Figura 6.25 – Gráfico força-deslocamento de uma ligação

As roturas passaram pelo arrancamento de um bloco de madeira por tracção ou pela formação de fendas no alinhamento dos ligadores resultando numa rotura por corte (Figura 6.26). Nas ligações com menor diâmetro dos elementos de madeira, ou onde a madeira possuía menor massa volúmica, os ligadores não apresentavam qualquer rótula plástica. Neste caso o gráfico força-deslocamento da ligação não apresentava uma ponta final tão longa como no gráfico da Figura 6.25, por não existir plastificação do ligador. No caso das ligações com elementos de madeira de maiores diâmetros, ou com madeira mais densa, foi bem visível a rótula plástica dos ligadores (Figura 6.27).



Figura 6.26 – Rotura por tracção na madeira (esq.) e rotura devido a formação de fendas (dir.)

Figura 6.27 – Rotura com plastificação dos ligadores

Após a realização do ensaio foi retirada uma rodela isenta de nós do centro da ligação para determinação da massa volúmica e teor de água, seguindo o procedimento descrito anteriormente para o caso dos toros, pontos 3.5.3 e 3.7.1 do presente trabalho.

A carga de rotura é considerada igual à maior carga suportada pela ligação no decorrer do ensaio. A rigidez da ligação ( $k_s$ ) é dada pela equação (6.1), tal como preconizado na norma

seguida. A deformação da ligação é devida, sobretudo, a esmagamento provocado pelo ligador na madeira circundante e devido a deformação do ligador, caso exista plastificação deste (Figura 6.27). Poderá ocorrer esmagamento na chapa provocado pelo ligador mas, para as cargas de cálculo da rigidez, este é desprezável.

$$k_s = 0,4 \frac{F_{est}}{v_{i,mod}} \quad (6.1)$$

$$v_{i,mod} = \frac{4}{3}(v_{04} - v_{01}) \quad (6.2)$$

Onde:

$F_{est}$  – Força de rotura estimada

$v_{04}$  – Valor da deformação quando atingida pela primeira vez os 40% da carga estimada

$v_{01}$  – Valor da deformação quando atingida pela primeira vez os 10% da carga estimada

Os resultados obtidos são apresentados de forma resumida na Tabela 6.2, encontrando-se a listagem dos resultados em anexo. Verifica-se que, em termos de variabilidade, a rigidez das ligações apresentou um coeficiente de variação de 31,7%, cerca do dobro do registado para a força de rotura (16,3%). Uma análise mais aprofundada destes resultados será efectuada no ponto 6.4 do presente trabalho.

Tabela 6.2 – Resultados dos ensaios de ligações de chapa central

Valor	$d_{toro}$ (mm)	$F_{max}$ (kN)	$K_s$ (kN/mm)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)
Médio	115,8	112,0	31,6	549,8	13,6
Mínimo	95,0	70,8	15,6	430,3	12,3
Máximo	141,5	154,6	69,1	677,4	14,4
Desvio Padrão	14,1	18,3	10,0	54,3	0,5
$N$	47	47	94	47	47

### 6.3.2 Ligações de sistema de ancoragem

As ligações de sistema de ancoragem, tal como já referido anteriormente, consistem na inserção de um varão ao longo de um furo longitudinal. Este varão é posteriormente ancorado a um bloco metálico situado na sua extremidade.

Na definição da configuração da ligação a estudar foram tidos diversos aspectos em conta. Assim, na definição do sistema de ancoragem optou-se pelo uso de cavilhas em detrimento da barra prismática, por ser um sistema de mais fácil implementação, uma vez que apenas necessita de um furo transversal para a colocação da cavilha.

O diâmetro da cavilha foi definido com o objectivo de, tendo em conta os espaçamentos preconizados no EC5 (CEN, 2002) e o comprimento de ligação estabelecido de 250mm,

maximizar a carga de rotura da ligação. Assim, considerando que o espaçamento do ligador ao topo deve ser de 7 vezes o diâmetro do ligador, optou-se por uma cavilha de 30mm de diâmetro, por ser o diâmetro comercial disponível. O diâmetro de varão usado foi de 16mm da classe 8.8, cuja carga de rotura é de cerca de 150kN, de modo a assegurar que a rotura da ligação não seja determinada por este componente.

Mediante as decisões tomadas, é apresentada na Figura 6.18 o esquema da configuração da ligação de sistema de ancoragem que irá ser estudada em toros de 600mm de comprimento com diâmetros ente 91 e 140mm. Optou-se por não usar qualquer tipo de laço ou banda pelas mesmas razões apontadas para a ligação anterior.

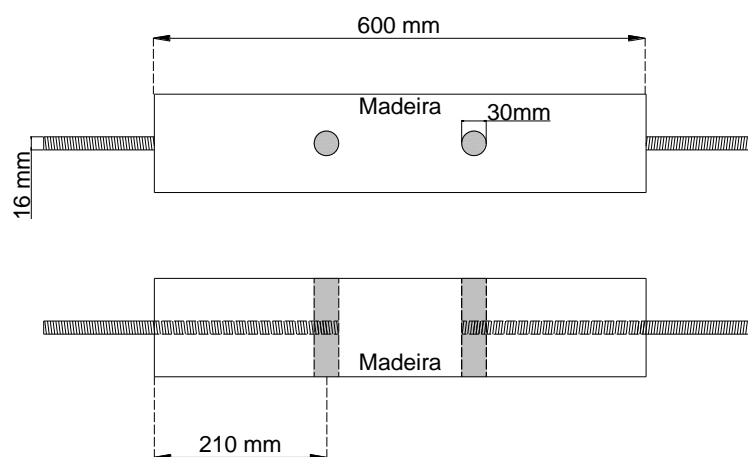


Figura 6.28 – Esquema da ligação de sistema de ancoragem estudada

A execução das ligações passou, inicialmente, pela abertura de um furo transversal com 30 mm de diâmetro, para a colocação da cavilha, a 210mm do topo dos toros. Procurou-se que as duas cavilhas ficassem alinhadas por uma questão de facilidade de execução uma vez que, tal como apresentado em bibliografia, a orientação relativa das cavilhas não apresenta influência significativa no desempenho da ligação. Por fim, foi efectuado um furo longitudinal com 18mm de diâmetro desde o centro da secção transversal do topo até ao centro do furo onde irá ser colocada a cavilha, para a passagem do varão roscado de 16mm de diâmetro e 330mm de comprimento. A cavilha de 150mm de comprimento foi cortada de varão liso de 30mm de diâmetro da classe 8.8, sendo efectuado um furo ao centro e aberta rosca para o varão de 16mm. Na Figura 6.19 é apresentada uma ligação de sistema de ancoragem realizada de acordo com o referido.



Figura 6.29 – Ligação de sistema de ancoragem estudada

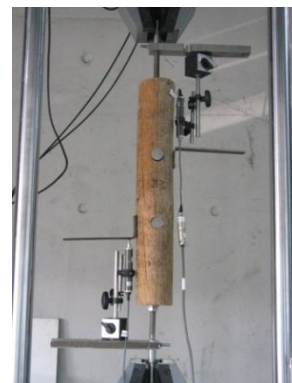
O ensaio de tracção foi realizado na prensa de ensaio das ligações anteriores, apresentando-se na Figura 6.30 uma ligação já colocada na máquina de ensaio. A medição da força aplicada é efectuada pela célula de carga da própria prensa, para a medição dos deslocamentos de cada ligação foi necessário material auxiliar. Assim, foram maquinadas buchas que encabeçam as extremidades dos varões roscados, e que entram nas garras da prensa, nas quais são colocadas barras metálicas com abraçadeiras maquinadas que amarram nessas buchas metálicas (Figura 6.31). Nestas barras metálicas são colocados deflectómetros de 25mm, com um erro de não linearidade de 0,1%, que medem a distância relativa a chapas colocadas imediatamente antes das cavilhas metálicas. Pretendeu-se com esta disposição minimizar a contribuição da deformação elástica da madeira (Figura 6.31). Este sistema de medição de deslocamentos foi validado aplicando as barras a um varão de aço liso, tendo sido obtido um módulo de elasticidade bastante próximo do módulo de elasticidade do aço. Os deflectómetros e a célula de carga foram ligados a um equipamento de aquisição de dados que efectuava leituras segundo a segundo.



Figura 6.30 – Ligação de sistema de ancoragem colocada na prensa de ensaio



Figura 6.31 – Sistema de medição de deslocamentos nas ligações de sistema de ancoragem



As ligações foram sujeitas ao procedimento de carga preconizado na norma EN 26891 (CEN, 1991), e já exposto no ponto anterior, durante o qual foi feita a contínua monitorização da força e do deslocamento das ligações para determinação da sua carga de rotura e rigidez. A carga estimada de rotura de cada ligação foi definida com base em ensaios preliminares. Tal como na ligação anterior, procurou-se ensaiar as ligações por ordem crescente de diâmetro dos elementos de madeira, de modo a ser possível ajustar a força estimada em função das cargas de rotura obtidas até então. A velocidade de ensaio em controlo de deslocamento foi de 0,035mm/s, definida com base em ensaios preliminares.

Tal como foi referido anteriormente, este esquema de ensaio permite a determinação da rigidez de duas ligações, mas a carga de rotura de apenas uma delas. Na Figura 6.32 é apresentado o gráfico força-deslocamento típico para este tipo de ligação. Verifica-se que apresenta um comportamento bastante linear até à rotura.

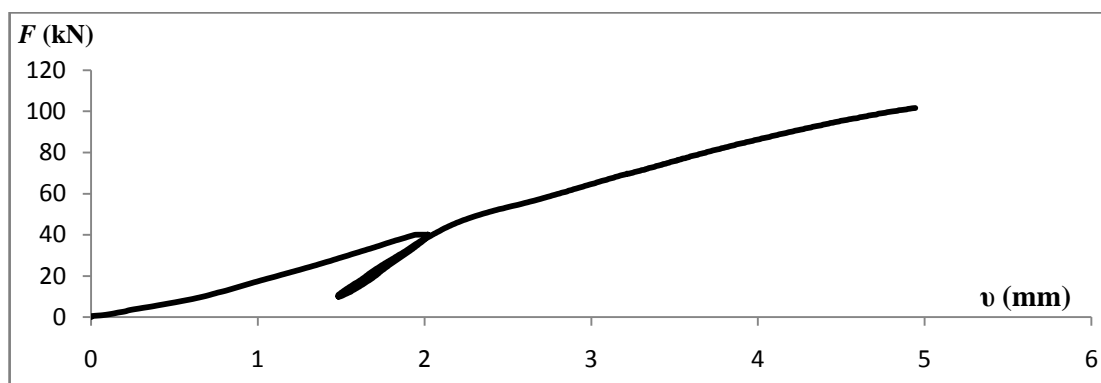


Figura 6.32 – Gráfico força-deslocamento típico da ligação de sistema de ancoragem

As roturas deveram-se, sobretudo, a tracção na direcção perpendicular às fibras, o que se traduziu em roturas abruptas com abertura dos elementos de madeira em torno da cavilha, existindo em alguns casos projecção de estilhaços dos elementos de madeira (Figura 6.33). Não existiu qualquer plastificação na cavilha ou varão roscado, sendo as roturas nos elementos de madeira.

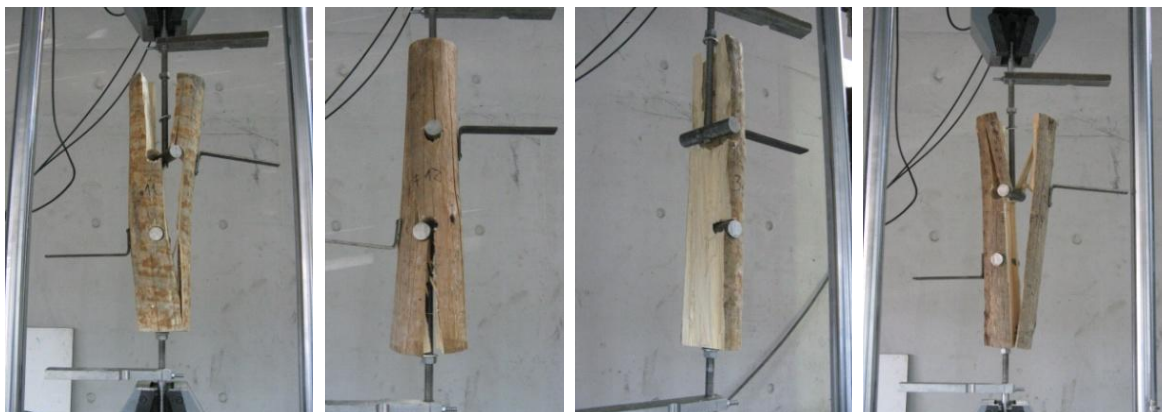


Figura 6.33 – Rotura por tracção na direcção perpendicular às fibras nas ligações de sistema de ancoragem estudadas

Após a realização do ensaio foi retirada uma rodela isenta de nós do centro da ligação para determinação da massa volúmica e teor de água, seguindo o procedimento apresentado no ponto anterior. A carga de rotura e a rigidez da ligação ( $k_s$ ) foram calculadas de forma análoga à da ligação de chapa central. Neste caso, a deformação da ligação é devida, sobretudo, a esmagamento provocado pela cavilha na madeira circundante (Figura 6.34) e a deformação do varão roscado.



Figura 6.34 – Ovalidade do furo devido a esmagamento provocado pela cavilha

Os resultados obtidos são apresentados de forma resumida na Tabela 6.2, encontrando-se a listagem dos resultados em anexo. De referir que três rigidezes foram rejeitadas devido a erros de medição associados a má colocação dos deflectómetros. Verifica-se, tal como no caso da ligação de chapa central, que em termos de variabilidade, a rigidez das ligações apresentou um coeficiente de variação de 40,7%, cerca do dobro do registado para a força de rotura (21,9%). Uma análise mais aprofundada destes resultados será efectuada no ponto 6.4 do presente trabalho.

Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios de ligações de sistema de ancoragem

Valor	$d_{\text{toro}}$ (mm)	$F_{\text{max}}$ (kN)	$K_s$ (kN/mm)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)
Médio	111,2	94,9	29,3	558,4	13,7
Mínimo	91,0	52,2	15,1	445,6	12,8
Máximo	140,0	147,4	70,5	709,3	14,4
Desvio padrão	12,3	20,8	11,9	63,4	0,4
$N$	58	58	113	58	58

### 6.3.3 Ligações de varões colados

Este tipo de ligações, tal como a sua própria designação o indica, consiste em varões que são inseridos, juntamente com cola, em furos longitudinais nos elementos de madeira. Antes da definição das configurações a estudar foi efectuada um estudo sobre a influência do comprimento de colagem na carga e tipo de rotura.

Para realização desse estudo preliminar, foram usados 17 elementos de madeira de grandes dimensões, com diâmetros entre os 186 e os 241,5mm, e massas volúmicas entre 496 e 697kg/m<sup>3</sup>, de modo a ser possível realizar vários arrancamentos em cada provete. Foi usado

varão roscado de 10mm de diâmetro da classe 4.8, com uma carga de rotura de cerca de 31kN. A escolha do varão roscado deve-se ao facto de a rosca, neste caso rosca métrica, permitir melhor aderência à cola comparativamente ao varão liso, apesar deste último possuir uma maior área transversal resistente.

Nos elementos de madeira foram efectuados furos com 50, 75, 100 e 125mm de profundidade e 12mm de diâmetro, de modo a assegurar uma espessura de cola em torno do varão de 1mm. Esta espessura foi definida de modo evitar deformações significativas devido à cola. Os furos foram limpos com ar comprimido e introduzida cola, os varões, previamente limpos com acetona, foram inseridos com movimento de aparafusamento, de modo a minimizar a entrada de ar na cola. A cola escolhida foi a Icosit K101 TW, fabricada pela Sika, por possuir boas propriedades de fluidez e portanto adequada a este tipo de ligações, minimizando assim a retenção de ar na colagem.

O esquema de ensaio, apresentado na Figura 6.35, consiste, essencialmente, na colocação de uma barra com um furo no qual é introduzido o varão a ser traccionado, o qual é fixo à garra superior da prensa, sendo a barra solidarizada à garra inferior através de varões. De referir que entre a barra e o elemento de madeira foi colocado um disco com 50mm de diâmetro interior para que não exista compressão na madeira da zona circundante ao varão colado (Figura 6.36), o que poderia influenciar no caso de existir rotura pela madeira. Os resultados, após 72h de colagem, para uma velocidade de arrancamento de 0,035mm/s, definida para uma rotura em cerca de 100 segundos, são apresentados na Tabela 6.4.



Figura 6.35 – Ensaio de arrancamento



Figura 6.36 – Pormenor do ensaio de arrancamento

Tabela 6.4 – Resultados do arrancamento de varão roscado de 10mm de diâmetro e classe 4.8

Profundidade	Força de rotura (kN)				N
	Média	Máxima	Mínima	Desvio padrão	
50 mm	23,82	30,65	19,21	3,33	22
75 mm	30,54	32,50	26,55	1,31	38
100 mm	31,37	33,85	28,63	1,16	36
125 mm	31,67	32,85	30,59	0,67	20

Com a profundidade de 50mm as roturas foram sobretudo pela madeira (Figura 6.37) sendo que em apenas 5 arrancamentos a rotura foi pela cola (Figura 6.38). Na profundidade de 75mm as roturas foram em grande parte pelo varão de aço (20 arrancamentos), existindo ainda algumas roturas pela madeira (10 arrancamentos) e pela cola (8 arrancamentos). Nas profundidades de 100 e de 125mm as roturas foram inteiramente pelo varão.



Figura 6.37 – Rotura pela madeira



Figura 6.38 – Rotura pela cola

Mediante estes resultados é possível afirmar que com profundidades de 10 vezes o diâmetro, para varões de classe 4.8, a rotura acontece pelo varão. Este comprimento de colagem também é referido num anexo informativo de uma versão *draft* da parte 2 do Eurocódigo 5 (CEN, 2002) para evitar que a rotura ocorra pela cola.

Adicionalmente, foram ainda efectuados ensaios com varão roscado de diâmetro 10mm, mas da classe 8.8, com cargas de rotura de cerca de 46kN. As profundidades consideradas foram de 100, 125 e 150mm, em 5 elementos de madeira com massas volúmicas entre 630 e 697kg/m<sup>3</sup> e teores de água entre 13,1 e 13,7%. Os resultados, após 72 horas de colagem, para uma velocidade de arrancamento de 0,055mm/s, são apresentados na Tabela 6.5.

Nos arrancamentos com 100mm de profundidade, apenas num ensaio a rotura foi pelo varão, sendo as restantes pela madeira. Nas restantes profundidades as roturas foram pelo varão. No entanto, para as três profundidades estudadas, não existem grandes diferenças em termos de cargas de rotura.

Tabela 6.5 – Resultados do arrancamento de varão roscado de 10mm de diâmetro e classe 8.8

Profundidade	Força de rotura (kN)				N
	Média	Máxima	Mínima	Desvio padrão	
100 mm	46,31	47,64	44,68	1,48	5
125 mm	46,34	47,24	45,47	0,72	5
150 mm	46,33	46,62	45,97	0,28	5



Neste tipo de ligações a rotura deve ocorrer preferencialmente pelo aço, por se tratar de uma rotura com características dúcteis, ao contrário da rotura pela madeira ou cola. Sendo a rotura preferencialmente pelo aço é de esperar uma menor variabilidade nas cargas de rotura, comparativamente às obtidas nas duas ligações anteriores, pelo que neste caso se optou por estudar uma configuração base, com maior número de ensaios, e duas outras com um menor número de ensaios, de modo a estudar de forma mais ampla o desempenho deste tipo de ligação.

Na definição das configurações da ligação a estudar foram tidos em conta os espaçamentos definidos numa proposta *draft* da parte 2 do Eurocódigo 5 (CEN, 2003a). Nessa parte, nomeadamente no Anexo informativo C, é definido que o espaçamento entre varões colados segundo a direcção das fibras deve ser de, pelo menos, 5 vezes o diâmetro do ligador e que o espaçamento do ligador à extremidade da secção não deve ser inferior a 2,5 vezes o diâmetro, tal como é ilustrado na Figura 6.39.

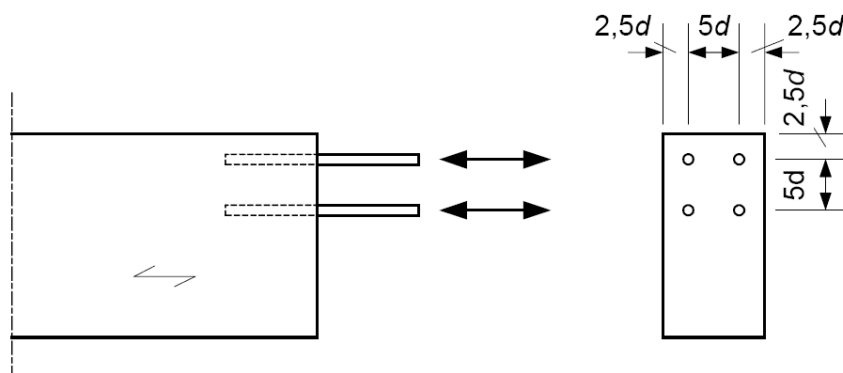


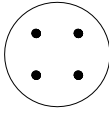
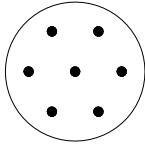
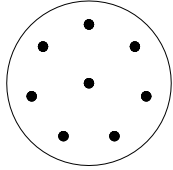

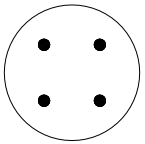
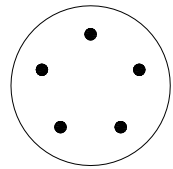
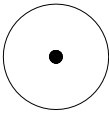
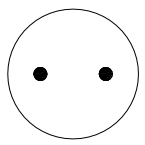
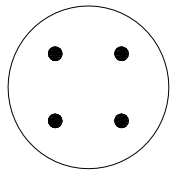
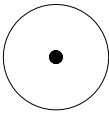
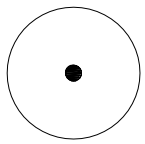
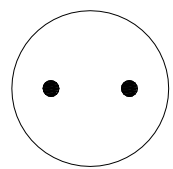
Figura 6.39 – Espaçamentos recomendados para varões colados (CEN, 2003a)

Tendo em conta os espaçamentos recomendados e os diâmetros dos elementos de madeira disponíveis, 96 a 174mm, foi feito um estudo de modo a averiguar o número e o diâmetro dos varões possíveis de colocar no elemento de madeira, de modo a mobilizar a maior percentagem da resistência à tracção da madeira. Admitindo que a madeira pertence à classe C18, com uma resistência à tracção de 11 MPa, e que os varões pertencem à classe 4.8, apresentam-se na Tabela 6.6 as configurações possíveis.

Mediante a disponibilidade em termos de diâmetros dos elementos de madeira, optou-se por dividir os provetes em três classes de diâmetros. A classe de 100-120mm, com 20 provetes, de 120-140mm, com 50 provetes, e de diâmetros maiores que 140mm, com 15 provetes. A configuração de varões a adoptar para cada classe de diâmetros é limitada pelo menor diâmetro dessa classe. Assim, da análise da Tabela 6.6 verifica-se que para a classe de 100-120mm a maior mobilização da resistência à tracção acontece para a configuração de 4 varões de 8mm. No caso da classe de 120-140mm a configuração que mais rentabiliza a resistência à tracção são 7 varões de 8mm. No entanto, como a diferença para a configuração de 4 varões de 10mm não é significativa, e esta é menos onerosa, optou-se por ela. Na classe de diâmetros

maiores que 140mm, a maior mobilização da resistência à tracção da madeira é feita com 4 varões de 12mm.

Tabela 6.6 – Configurações possíveis de varões colados na secção transversal

	Varão (mm)	Diâmetro do elemento de madeira (mm)		
		100	120	140
Configuração	$\Phi 8$			
$f_{t,0}$ mobilizada		75%	92%	77%
Configuração	$\Phi 10$			
$f_{t,0}$ mobilizada		59%	82%	75%
Configuração	$\Phi 12$			
$f_{t,0}$ mobilizada		42%	59%	87%
Configuração	$\Phi 14$			
$f_{t,0}$ mobilizada		58%	40%	59%

Mediante as decisões tomadas, é apresentado na Figura 6.18 um esquema das configurações adoptadas para as ligações de varões colados, para as diferentes classes de diâmetros consideradas. Foi adoptado um diâmetro do furo na madeira de 2 mm acima do valor do diâmetro do varão roscado, de modo a assegurar uma espessura de 1mm de cola em torno do varão roscado. Todos os varões possuíam rosca métrica e eram da classe 4.8, não foram considerados varões de classe superior porque, para algumas configurações, as cargas de rotura expectáveis excediam o limite da prensa de ensaio. Em termos de profundidade, foi adoptado o valor de 10 vezes o diâmetro do varão. Este valor foi adoptado, tendo por base os ensaios de arrancamento iniciais, com o objectivo de obter roturas pelo varão.

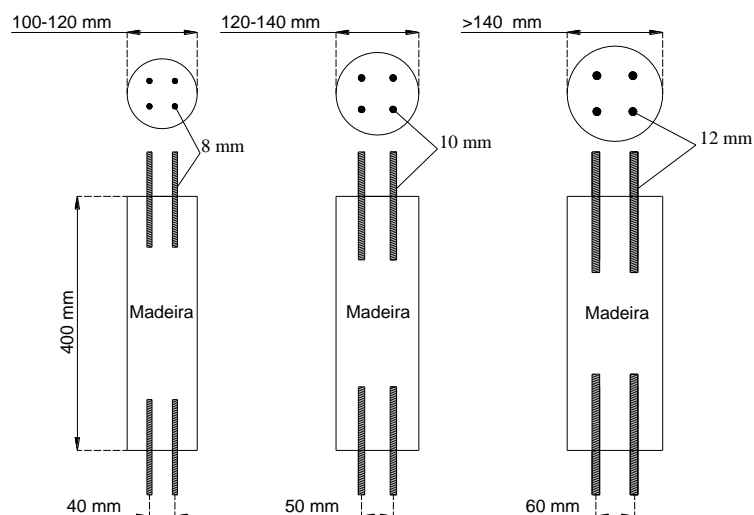


Figura 6.40 – Esquema das ligações de varões colados estudadas

A execução das ligações passou, inicialmente, pela abertura dos furos longitudinais com o diâmetro e profundidade pretendidas. Procurou-se que os furos fossem efectuados o mais afastado possível de fendas existentes na secção (Figura 6.41). Após a furação, os furos foram limpos com ar comprimido de modo a eliminar possíveis resíduos que iriam interferir na aderência entre a cola e a madeira. Os varões roscados foram cortados com comprimento de 200mm e limpos com acetona para remoção de resíduos. De seguida, efectuou-se a colagem dos varões com a introdução de cola nos furos e posterior introdução do varão com movimento de aparafusamento, de modo a introduzir o mínimo de ar possível na colagem (Figura 6.41). Após a introdução dos varões roscados foi colocada uma guia de modo a que os varões mantenham as suas posições relativas (Figura 6.41). Este processo é repetido no outro topo do elemento de madeira após a secagem da cola. Na Figura 6.42 é apresentada uma ligação de sistema de varões colados realizada de acordo com o procedimento acima referido.



Figura 6.41 – Elaboração da ligação de varões colados



Figura 6.42 – Ligações de varões colados estudada

Para aplicação da tracção nos varões foi elaborado um cabeçote com uma rótula de modo a proporcionar melhor distribuição de forças pelos quatro varões (Figura 6.43). O cabeçote é nivelado através de porcas na parte inferior e posteriormente colocadas na parte superior uma anilha e duas porcas em cada varão roscado. São usadas duas porcas porque em ensaios preliminares com apenas uma porca a rotura aconteceu por arranque desta.



Figura 6.43 – Cabeçote aplicado às ligações de varões colados

O ensaio de tracção foi realizado na prensa de ensaio utilizada no ensaio das ligações anteriores, na Figura 6.30 é apresentada uma ligação já colocada na máquina de ensaio. A medição da força aplicada é efectuada pela célula de carga da própria prensa, para a medição dos deslocamentos de cada ligação foram amarradas as abraçadeiras maquinadas, usadas nas ligações de sistema de ancoragem, no espigão do cabeçote que entra nas garras da prensa (Figura 6.44). Tal como nas ligações de sistema de ancoragem, nas abraçadeiras maquinadas são colocados deflectómetros de 25mm que medem a distância relativa a chapas colocadas

imediatamente após o comprimento de colagem, de modo a minimizar a componente da deformação relativa à deformação elástica da madeira (Figura 6.45). As leituras dos deflectómetros e da célula de carga foram registadas com um intervalo de tempo de um segundo.



Figura 6.44 – Ligação de varões colados colocada na prensa de ensaio



Figura 6.45 – Sistema de medição de deslocamentos nas ligações de varões colados

As ligações foram sujeitas ao procedimento de carga preconizado na norma EN-26891 (CEN, 1991), já exposto no ponto 6.3.1 do presente trabalho, durante o qual foi feita a contínua monitorização da força e deslocamento das ligações para determinação da sua carga de rotura e rigidez. A carga estimada de rotura de cada ligação, necessária para o cálculo da velocidade de ensaio em controlo de força, foi definida considerando a força de rotura conjunta dos quatro varões de aço. A velocidade de ensaio em controlo de deslocamento foi de 0,03mm/s, definida com base em ensaios preliminares.

Tal como foi referido anteriormente, este esquema de ensaio permite a determinação da rigidez de duas ligações, mas apenas a carga de rotura de uma delas. Na Figura 6.32 é apresentado o gráfico força-deslocamento típico para este tipo de ligação. Verifica-se uma parte final longa devido a plastificação dos varões roscados.

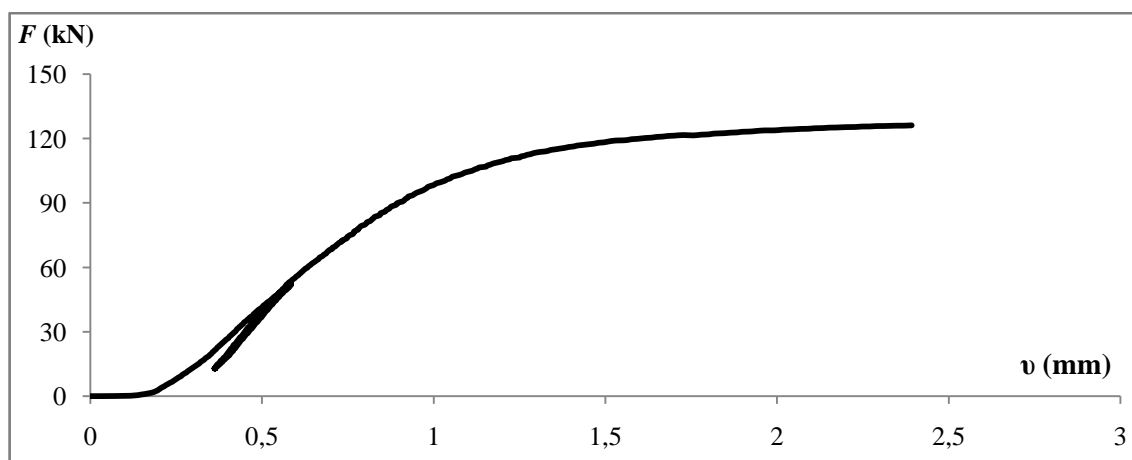


Figura 6.46 – Gráfico força-deslocamento típico da ligação de varões colados

As roturas deveram-se, sobretudo, à rotura de um dos varões roscados. Existiram ainda casos onde se verificou a rotura simultânea de dois varões (Figura 6.47). No entanto, em 10% das ligações com varões roscados de 10mm, devido a fendas existentes na madeira, a rotura aconteceu pela madeira (Figura 6.48). Após a realização do ensaio foi retirada uma rodela isenta de nós do centro da ligação para determinação da massa volúmica e teor de água, seguindo o descrito nos pontos 3.5.3 e 3.7.1 do presente trabalho.



Figura 6.47 – Rotura pelos varões, numa ligação de varões colados



Figura 6.48 – Rotura pela madeira, numa ligação de varões colados

A carga de rotura e a rigidez da ligação ( $k_s$ ) foram calculadas de forma análoga à da ligação de chapa central, sendo a deformação da ligação devida, sobretudo, a estrição nos varões roscados e a deformações na madeira circundante. Os resultados obtidos são apresentados de forma resumida na Tabela 6.2, encontrando-se a listagem dos resultados em anexo. Algumas medições de deformação foram rejeitadas devido a ajustes na rótula que aconteceram para lá dos 10% de carga de rotura estimada e portanto impossibilitando a determinação correcta da rigidez. Verifica-se um baixo valor de variabilidade da carga de rotura, tal como seria expectável, dado que a rotura foi maioritariamente nos varões roscados. No entanto, no que respeita à rigidez das ligações, a variabilidade registada foi bastante superior à obtida para a carga de rotura, situando-se o coeficiente de variação entre 32 e 43%. Uma análise mais aprofundada destes resultados será efectuada no ponto 6.4 do presente trabalho.

Tabela 6.7 – Resultados dos ensaios de ligações de varões colados

Diâmetro do varão (mm)	$F_{\max}$ (kN)			$K_s$ (kN/mm)			$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )			$w$ (%)		
	8	10	12	8	10	12	8	10	12	8	10	12
Média	74,1	126,5	155,3	109,2	128,2	171,6	554,6	573,0	571,5	13,2	13,3	13,2
Máximo	75,6	133,3	158,9	217,3	277,3	301,9	674,6	682,8	677,2	14,1	14,0	13,9
Mínimo	71,5	111,9	151,0	48,7	55,6	103,2	465,1	417,0	506,0	12,1	12,0	12,2
Desvio padrão	1,1	4,0	2,2	46,9	47,1	54,7	66,3	60,1	52,6	0,6	0,6	0,6
$N$	19	50	15	28	84	24	19	50	215	19	50	15

## 6.4 Análise de resultados

### 6.4.1 Comparação do desempenho das ligações

Neste trabalho foi feito um estudo sobre o comportamento de três tipos distintos de ligações aplicadas a madeira de secção circular de Pinheiro bravo Português. No ponto anterior foi apresentado o procedimento experimental e os resultados obtidos, para cada tipo de ligação. Neste ponto será feita uma análise comparativa dos resultados de modo a tirar conclusões sobre o desempenho das tipologias de ligação estudadas.

A comparação em termos de cargas de rotura é apresentada na Tabela 6.8. Constata-se que as ligações coladas apresentam muito menor variabilidade na carga de rotura do que as ligações de chapa central e de sistema de ancoragem. Esta menor variabilidade deve-se a que nas ligações coladas a rotura foi limitada pelo aço, material com pouca variabilidade, reflectindo-se num valor característico bastante próximo do valor médio da carga de rotura. Embora o valor médio da carga de rotura das ligações de chapa central e de sistema de ancoragem seja superior ao obtido para as ligações de varões colados de 8mm de diâmetro, os valores característicos são similares. A maior carga de rotura média foi atingida nas ligações de varões colados de 12mm de diâmetro.

Tabela 6.8 – Cargas de rotura das tipologias de ligação estudadas (kN)

	Chapa central	Sistema de ancoragem	Varões colados		
			$\Phi 8$	$\Phi 10$	$\Phi 12$
Média	112,0	94,9	74,1	126,5	155,3
Mínimo	70,8	52,2	71,5	111,9	151,0
Máximo	154,6	147,4	75,6	133,3	158,9
Percentil 5%	78,5	67,9	71,8	119,2	151,6
Desvio padrão	18,3	20,8	1,1	4,0	2,2
Coefficiente de variação (%)	16,3	21,9	1,5	3,2	1,4
<i>N</i>	47	58	19	50	15

No entanto, como o estudo das ligações foi feito com uma gama alargada de diâmetros dos elementos de madeira, de modo a ser possível uma melhor comparação entre as diferentes tipologias de ligação, apresentam-se na Tabela 6.9 as cargas de rotura expressas em tensão de tracção aplicada no elemento de madeira. Nas ligações coladas, o diâmetro do elemento de madeira usado no cálculo da tensão de tracção foi considerado igual ao menor diâmetro possível de aplicação dessa ligação, ou seja, 100mm no caso de varão roscado de 8mm, 120mm para varão roscado de 10mm e 140mm no caso de varão roscado de 12mm. Tal foi adoptado por a carga de rotura das ligações de varões coladas não ser afectada pelo diâmetro da peça de madeira.

Da análise da Tabela 6.9 verifica-se que não existe diferença significativa em termos de tensão de tracção média de rotura que a ligação suportou, apresentando as ligações de varões colados o valor médio mais alto. No entanto, em termos de valor característico, as ligações

coladas apresentam os valores mais elevados, consequência da referida baixa variabilidade das cargas de rotura. De notar que as ligações de chapa central foi a tipologia que registou a maior tensão de rotura à tracção, 16,3MPa. Assim, apesar de a diferença não ser significativa, as ligações de varões colados de 10mm de diâmetro apresentam-se como a tipologia que permitiu mobilizar, em média, mais resistência à tracção do elemento de madeira.

Tabela 6.9 – Tensões de rotura à tracção das tipologias de ligação estudadas (MPa)

	Chapa central	Sistema de ancoragem	Varões colados		
			Φ8	Φ10	Φ12
Média	10,9	9,81	9,43	11,19	10,09
Mínimo	5,6	6,12	9,10	9,89	9,81
Máximo	16,3	13,57	9,63	11,79	10,32
Percentil 5%	6,6	7,2	9,14	10,76	9,85
Desvio padrão	2,4	1,70	0,14	0,35	0,14
Coefficiente de variação (%)	22,0	17,3	1,5	3,1	1,4
<i>N</i>	47	58	19	50	15

Tabela 6.10 – Rigidez ( $K_s$ ) das tipologias de ligação estudadas (kN/mm)

	Chapa central	Sistema de ancoragem	Varões colados		
			Φ8	Φ10	Φ12
Média	31,6	29,3	109,2	128,2	171,6
Mínimo	15,6	15,1	48,7	55,6	103,2
Máximo	69,1	70,5	217,3	277,3	301,9
Desvio Padrão	10,0	11,9	46,9	47,1	54,7
Coefficiente de variação (%)	31,6	40,6	42,9	36,7	31,9
<i>N</i>	94	113	28	84	24

A comparação em termos de rigidez ( $K_s$ ) é apresentada na Tabela 6.10. Constata-se que as ligações de varões colados apresentam valores de rigidez bastante superiores aos obtidos para as restantes tipologias estudadas. As ligações de chapa central e as de sistema de ancoragem apresentam valores de rigidez bastante próximos. Nas ligações coladas verifica-se um aumento da rigidez com o aumento do diâmetro do ligador. Em termos de variabilidade, esta é elevada em todas as tipologias de ligação estudadas, variando entre 31,6 e 42,9%. Para além disso, em todas as tipologias estudadas a variabilidade da rigidez foi superior à obtida para a carga de rotura dessas mesmas ligações.

A elevada variabilidade obtida para as ligações de chapa central e de sistema de ancoragem poderia ser justificada pelas variações de diâmetros e massas volúmicas das peças, o que tem influência directa na rigidez da ligação, como se constata no ponto seguinte. No entanto, a diferença média, em percentagem do menor valor, entre a rigidez das ligações que foram testadas no mesmo elemento de madeira foi de 26,6% para as ligações de sistema de ancoragem e de 32,4% para as de chapa central. Nas ligações de varões colados, em virtude de ser uma ligação regida maioritariamente pelo comportamento do aço, seria de esperar uma



baixa variabilidade. Razões para a elevada variabilidade irão ser aprofundadas no ponto 6.4.2.3 deste trabalho.

A comparação entre os gráficos força-deslocamento típicos de cada tipo de ligação é apresentada na Figura 6.49, e as deformações para a carga máxima são apresentadas na Tabela 3.21. As deformações na rotura não foram obtidas por uma questão de protecção dos equipamentos de medição. Verifica-se que as ligações de chapa central são as ligações com maior deformação na carga máxima, enquanto que as ligações de sistema de varões colados foram as que apresentaram os menores valores de deformação.

Tabela 6.11 – Deformação para a carga máxima das tipologias de ligação estudadas (mm)

	Chapa central	Sistema de ancoragem	Varões colados		
			Φ8	Φ10	Φ12
Média	6,0	4,4	1,4	1,8	2,0
Mínimo	2,8	2,2	0,3	0,3	0,7
Máximo	16,7	8,3	3,7	5,3	3,9
Desvio padrão	2,3	1,3	0,8	0,8	0,8
Coefficiente de variação (%)	38,5	28,8	54,6	47,3	39,4
N	94	113	28	84	24

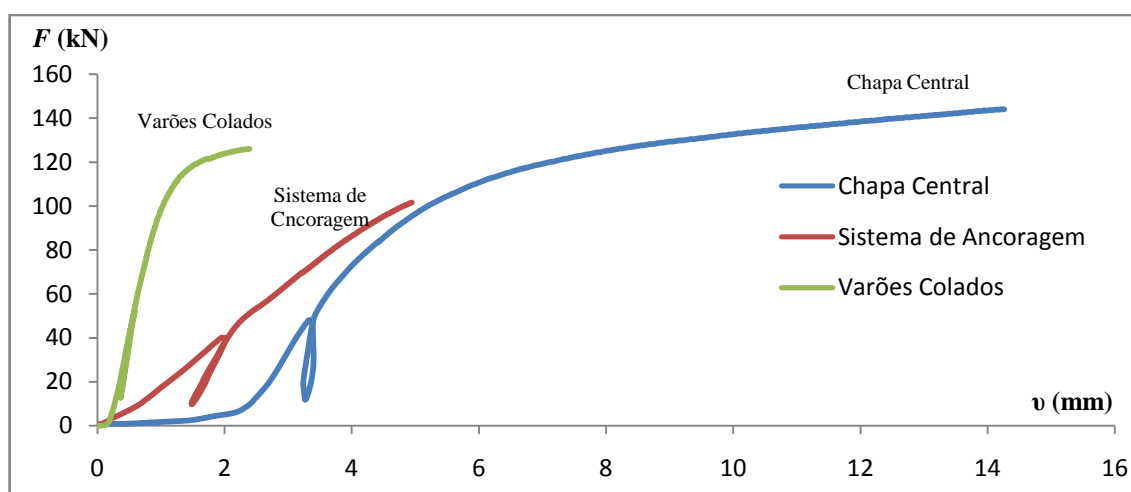


Figura 6.49 – Gráfico força-deslocamento típico das tipologias de ligação estudadas

Em resumo, da comparação das várias tipologias de ligação, verificou-se que a maior diferença entre o seu desempenho está na rigidez da ligação, possuindo as configurações de ligações de varões colados uma rigidez cerca de três a cinco vezes superior à obtida para as ligações de chapa central e sistema de ancoragem.

## 6.4.2 Estimativa da carga de rotura e rigidez das ligações

### 6.4.2.1 Ligações de chapa central

Neste ponto pretende-se estudar a possibilidade de estimar a carga de rotura e rigidez das ligações de chapa central estudadas. Recordar-se que as ligações de chapa central eram

constituídas por uma chapa de 8mm de espessura, inserida num corte longitudinal de 10mm de espessura no elemento de madeira, e por dois varões roscados de 18mm de diâmetro e com uma tensão de rotura de 800MPa.

Como primeira abordagem, são apresentados na Tabela 6.12 os coeficientes de correlação entre as propriedades mecânicas obtidas para as ligações e o diâmetro e massa volúmica do elemento de madeira. De referir que a rigidez considerada para correlação foi assumida como sendo a média da obtida para as duas ligações que foram testadas no mesmo elemento de madeira. Da análise da Tabela 6.12 verifica-se que a força de rotura das ligações apresenta boa correlação com a massa volúmica da madeira, o mesmo se passando com a rigidez da ligação, embora com um coeficiente de correlação mais baixo.

Tabela 6.12 – Coeficientes de correlação entre propriedades das ligações de chapa central

	$F_{\max}$	$K_s$	$\rho_{12}$	$d_{\text{toro}}$
$F_{\max}$	1	0,28	0,73	0,40
$K_s$		1	0,46	0,07
$\rho_{12}$			1	0,05
$d_{\text{toro}}$				1

A próxima abordagem passa pela aplicação dos pressupostos da secção 8 do EC5 (CEN, 2002) para ligações madeira-aço em corte duplo, de modo a avaliar a sua aplicabilidade a madeira de secção circular, uma vez que formulações foram estabelecidas para elementos de secção rectangular.

Assim, de acordo com a Figura 6.50 são considerados três tipos de rotura: rotura no elemento de madeira, sem plastificação do ligador (*I*); rotura na madeira com formação de uma rótula plástica no ligador (*II*); e rotura na madeira com formação de três rótulas plásticas no ligador (*III*). A carga de rotura por ligador e por plano de corte, seguindo o preconizado no ponto 8.5 do EC5 (CEN, 2002), para ligações aparafusadas, para cada um dos tipos de rotura, é dada pelas equações (6.3), baseadas nas do modelo de análise plástica de Johansen.

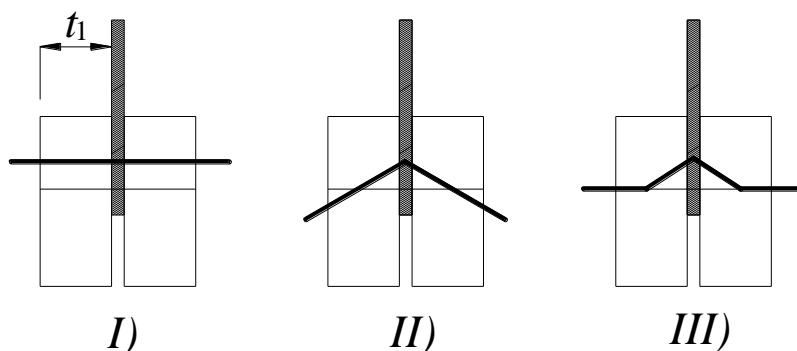


Figura 6.50 – Modos de rotura de uma ligação madeira-aço em corte duplo (CEN, 2002)

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} (I) & f_{h,1,k} t_1 d \\ (II) & f_{h,1,k} t_1 d \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ (III) & 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases} \quad (6.3)$$

$$f_{h,1,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho \quad (6.4)$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} \quad (6.5)$$

$$F_{ax,Rk} = A_{anilha} 3f_{c,90k} \quad (6.6)$$

Onde:

- $t_1$  -Espessura dos elementos de madeira (mm)
- $d$  -Diâmetro do ligador (mm)
- $\rho$  -Massa volúmica dos elementos de madeira ( $\text{kg/m}^3$ )
- $f_{u,k}$  -Tensão de rotura do ligador (MPa)
- $A_{anilha}$  -Área da anilha ( $\text{mm}^2$ )
- $f_{c,90k}$  -Resistência à compressão da madeira na direcção perpendicular às fibras (MPa)

A contribuição da resistência à tracção do ligador ( $F_{ax,Rk}$ ) é limitada, para o caso de ligações aparafusadas, a 25% do primeiro termo (parcela obtida com base na teoria de Johansen). Para a sua determinação foi admitido o valor de 6,9MPa, especificado na norma NP 4305 (IPQ, 1995) para a classe E da madeira de Pinheiro bravo, para o valor de  $f_{c,90,k}$ . Apesar de a área de contacto entre a anilha e a superfície da madeira, não sendo esta plana, não ser completamente igual à área da anilha, foi admitido que toda a anilha estava em contacto com a madeira, possuindo a anilha um diâmetro interno de 19,08mm e um diâmetro externo de 33,68mm. Desta forma, a carga de rotura das ligações de chapa central é dada pela equação (6.7)

$$F_{max} = F_{v,Rk} \times n_{ef} \times 2 \quad (6.7)$$

$$n_{ef} = \begin{cases} n \\ n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \end{cases} \quad (6.8)$$

Onde:

- $n_{ef}$  -Número efectivo de ligadores
- $n$  -Número de ligadores
- $a_1$  -Espaçamento entre ligadores na direcção do fio da madeira (mm)

O diâmetro do ligador foi considerado igual ao diâmetro do varão roscado, apesar de este não ser liso, e a espessura dos elementos de madeira ( $t_1$ ) igual a metade do diâmetro do elemento subtraída de metade da espessura do corte longitudinal. Usando a massa volúmica de cada ligação, apresenta-se na Tabela 6.13 a comparação entre as cargas de rotura experimentais e estimadas, para cada modo de rotura.

Tabela 6.13 – Cargas de rotura experimentais ( $F_{\max}$ ) e estimadas ( $F_{\max,est}$ ) das ligações de chapa central

	$F_{\max I)$ (kN)	$F_{\max II)$ (kN)	$F_{\max III)$ (kN)	$F_{\max,est}$ (kN)	$F_{\max}$ (kN)	$Erro_{relativo}$ (%)	$Erro_{absoluto}$ (%)
Média	103,6	83,7	124,8	83,6	112,0	-24,0	24,2
Máximo	138,7	96,2	137,7	96,2	154,6	4,7	38,4
Mínimo	67,8	72,3	111,6	67,8	70,8	-38,4	4,2
Desvio padrão	17,6	5,2	5,7	5,5	18,3	9,2	9,2
$N$	47	47	47	47	47	47	47

Da análise da Tabela 6.13 verifica-se que a previsão baseada nos modelos do EC5 é conservadora, dando uma carga de rotura, em média, 24% inferior à real, tendo fornecido uma carga de rotura superior à experimental, em 4,7%, em apenas um caso. Em termos de modos de rotura, o modo de rotura *II* revelou-se o mais limitativo, sendo que em apenas duas ligações o modo de rotura *I* foi condicionante. Como foi referido no procedimento experimental, no ponto 6.3.1 deste trabalho, o modo de rotura *II* foi o que realmente sucedeu em grande parte dos casos, apresentando o modo de rotura *I* também alguma expressão.

A rigidez de uma ligação, segundo a secção 7 do Eurocódigo 5 (CEN, 2002), para ligadores do tipo parafuso sem folga, por ligador e plano de corte, pode ser dada pela equação (6.9).

$$k_s = \rho^{1,5} d / 23 \quad (6.9)$$

A comparação entre os valores experimentais e estimados é apresentada na Tabela 6.14. É importante referir que o Eurocódigo 5 refere que em ligações madeira-aço a rigidez da ligação dada pela equação (6.9) pode ser multiplicada por 2. No entanto, tal não foi efectuado porque iria aumentar a discrepância entre os resultados experimentais e estimados. Da análise da Tabela 6.14 pode verificar-se que a estimativa pelo EC5 foi, em média, 33,9% superior à real, obtendo-se valores conservadores apenas em 5 ligações. Isto pode dever-se, provavelmente, ao facto de o varão ser roscado em todo o comprimento, o que leva a que a rosca provoque maior esmagamento na madeira que um varão completamente liso. No entanto estas deformações são de difícil contabilização, o que impede uma melhor comparação com os valores do EC5.

Tabela 6.14 – Rigidez experimental ( $K_s$ ) e estimada ( $K_{s,est.}$ ) das ligações de chapa central

	$K_s$ (kN/mm)	$K_{s,est.}$ (kN/mm)	$Erro_{relativo}$ (%)	$Erro_{absoluto}$ (%)
Média	31,6	40,5	33,9	38,7
Máximo	69,1	55,2	101,0	101,0
Mínimo	15,6	27,9	-63,4	1,3
Desvio padrão	10,0	6,0	32,1	26,0
$N$	94	94	94	94

#### 6.4.2.2 Ligações de sistema de ancoragem

Neste ponto pretende-se estudar a possibilidade de estimar a carga de rotura e rigidez das ligações de sistema de ancoragem estudadas. Esta eram constituídas por um varão roscado de 16mm de diâmetro, inserido num furo longitudinal de 18mm de diâmetro, e por uma cavilha de 30mm de diâmetro, possuindo os dois componentes uma tensão de rotura de 800MPa.

Tal como no ponto anterior, a primeira abordagem passou pelo estabelecimento de relações estatísticas entre as propriedades mecânicas obtidas para as ligações e diâmetro e massa volúmica dos elementos de madeira, apresentando-se os coeficientes de correlação obtidos na Tabela 6.15. De referir que a rigidez considerada para correlação foi assumida como sendo a média da obtida para as duas ligações que foram testadas no mesmo elemento de madeira. Da análise da Tabela 6.15 verifica-se que a força de rotura das ligações apresenta correlação aceitável com o diâmetro e com a massa volúmica do elemento de madeira, enquanto a rigidez da ligação apenas apresenta correlação aceitável com a massa volúmica.

Tabela 6.15 – Coeficientes de correlação entre propriedades das ligações de sistema de ancoragem

	$F_{max}$	$K_s$	$\rho_{12}$	$d_{toro}$
$F_{max}$	1	0,30	0,56	0,66
$K_s$		1	0,51	0,04
$\rho_{12}$			1	0,01
$d_{toro}$				1

A próxima abordagem passou pela aplicação dos pressupostos da secção 8 do Eurocódigo 5 (CEN, 2002) para ligações madeira-aço em corte duplo, de modo a avaliar a sua aplicabilidade a este tipo de ligação. Existindo a particularidade de a cavilha apresentar um furo e neste caso não existir uma chapa metálica mas sim um varão roscado, para além do facto de se tratar de madeira de secção circular.

Os modos de rotura já foram apresentados no ponto anterior, bem como as respectivas equações de determinação de carga de rotura. No entanto, neste caso a contribuição da resistência à tracção do ligador ( $F_{ax,Rk}$ ) não é considerada por se tratar de cavilhas, existindo apenas um ligador ( $n_{ef}=1$ ).

Considerando a espessura dos elementos de madeira ( $t_1$ ) igual a metade do diâmetro do elemento subtraída de metade do diâmetro do furo longitudinal e a massa volúmica de cada ligação, apresenta-se na Tabela 6.13 a comparação entre os valores experimentais e os estimados, para cada modo de rotura. Foi analisada a hipótese da não subtração de metade do diâmetro do furo longitudinal a  $t_1$ , o que resultou em erros e cargas de rotura estimada superiores.

Tabela 6.16 – Cargas de rotura experimentais ( $F_{\max}$ ) e estimadas ( $F_{\max,est}$ ) das ligações de sistema de ancoragem

	$F_{\max I}$ (kN)	$F_{\max II}$ (kN)	$F_{\max III}$ (kN)	$F_{\max,est}$ (kN)	$F_{\max}$ (kN)	$Erro_{relativo}$ (%)	$Erro_{absoluto}$ (%)
Média	89,6	114,7	142,2	89,4	94,9	4,3	9,9
Máximo	136,2	127,7	160,6	126,5	147,4	22,6	26,8
Mínimo	62,0	103,7	127,3	62,0	52,2	-26,8	0,0
Desvio padrão	15,8	6,1	8,0	15,2	20,8	11,1	6,5
$N$	58	58	58	58	58	58	58

Da análise da Tabela 6.16 verifica-se que usando o procedimento do EC5 as cargas de rotura estimadas são, em média, superiores em 4,3% às cargas de rotura experimentais. Em termos de modos de rotura, o modo de rotura *I* revelou-se o mais limitativo, sendo que em apenas duas ligações o modo de rotura *II* foi condicionante. Como foi referido no procedimento experimental, no ponto 6.3.2 deste trabalho, o modo de rotura *I* foi o que realmente sucedeu em todas as roturas.

A rigidez de uma ligação, segundo a secção 7 do EC5 (CEN, 2002), para ligadores do tipo cavilha, por ligador e plano de corte, é dada igualmente pela equação (6.9), apresentada no ponto anterior. No entanto, a rigidez obtida do EC5 apenas diz respeito ao esmagamento da cavilha na madeira. Assim, como a rigidez experimental inclui também a deformação do varão roscado de 330mm de comprimento, para uma correcta comparação foi adicionada a deformação do varão roscado à rigidez obtida do Eurocódigo 5.

Mediante o referido, a comparação entre os valores experimentais e estimados é apresentada na Tabela 6.14. É importante referir que o EC5 refere que em ligações madeira-aço a rigidez da ligação dada pela equação (6.9) pode ser multiplicada por 2, mas tal não foi efectuado, pelas mesmas razões que nas ligações de chapa central. Da análise da Tabela 6.14 pode-se verificar que a estimativa pelo EC5 foi, em média, 4,2% inferior aos valores experimentais, fornecendo valores conservadores em 46,9% das ligações.

Tabela 6.17 – Rigidez experimental ( $K_s$ ) e estimada ( $K_{s,est.}$ ) das ligações de sistema de ancoragem

	$K_s$ (kN/mm)	$K_{s,est.}$ (kN/mm)	$Erro_{relativo}$ (%)	$Erro_{absoluto}$ (%)
Média	29,3	25,5	-4,2	25,0
Máximo	70,5	33,0	60,4	75,5
Mínimo	15,1	19,7	-75,5	0,6
Desvio padrão	11,9	3,2	30,7	18,2
$N$	113	113	113	113

#### 6.4.2.3 Ligações de varões colados

Neste ponto pretende-se estimar a carga de rotura e rigidez das ligações de varões colados. Recorda-se que estas ligações eram constituídas por quatro varões roscados colados com uma profundidade de 10 vezes o seu diâmetro. A espessura de colada foi de 1mm em torno do varão roscado. Foram aplicados varões roscados de 8, 10 e 12mm de diâmetro, da classe 4.8 (400MPa de tensão nominal de rotura).

De modo a averiguar a influência de diversas características no desempenho das ligações, são apresentados na Tabela 6.18 os coeficientes de correlação entre as propriedades mecânicas obtidas para as ligações e o diâmetro e massa volúmica dos elementos de madeira. De referir que, tal como nas ligações anteriores, a rigidez considerada para correlação foi assumida como sendo a média da obtida para as duas ligações que foram testadas no mesmo elemento de madeira. Da análise da Tabela 6.18 verifica-se que não existem correlações relevantes entre estas características, sendo o maior coeficiente de correlação obtido entre a força de rotura e a massa volúmica. Este coeficiente de correlação, apesar de baixo, não se esperava tão elevado, uma vez que o comportamento da ligação foi condicionado pelos varões de aço, não apresentando a madeira grande influência, salvo casos onde esta possuía fendas.

Tabela 6.18 – Coeficientes de correlação entre propriedades das ligações de varões colados

	$F_{max}$	$K_s$	$\rho_{12}$	$d_{toro}$
$F_{max}$	1	0,06	0,38	0,18
$K_s$		1	0,02	0,18
$\rho_{12}$			1	0,09
$d_{toro}$				1

O comprimento de colagem foi definido de modo a que a rotura ocorra pelo varão roscado. No entanto, numa ligação constituída por vários varões roscados, para maximizar a capacidade da ligação é necessário que a força seja distribuída o mais uniformemente possível pelos varões. Para tal fim foi desenvolvido um cabeçote com uma rótula incorporada, apresentado no ponto 6.3.3 do presente trabalho.

A carga de rotura da ligação foi estimada considerando a rotura de um varão e a cedências dos restantes três. A comparação entre a carga de rotura estimada, considerando as características

dos varões da Tabela 6.19, e a carga de rotura experimental é apresentada na Tabela 6.20. Verifica-se que a carga estimada é 26,2 a 32,9% inferior à carga de rotura experimental. Caso sejam usadas as forças de rotura e de cedência obtidas experimentalmente, a carga de rotura estimada passa a ser cerca de 17% inferior à carga de rotura experimental.

Tabela 6.19 – Características dos varões roscados da classe 4.8

Diâmetro nominal do varão roscado (mm)	8	10	12
Área da secção transversal (mm <sup>2</sup> )	36,6	58,0	84,3
Tensão de rotura nominal (MPa)	400	400	400
Tensão de cedência nominal (MPa)	320	320	320
Força de rotura nominal (kN)	14,6	23,2	33,7
Força de cedência nominal (kN)	11,7	18,6	27,0
Força de rotura experimental (kN)	18,5	31,4	38,5
Força de cedência experimental (kN)	14,3	24,4	29,6
Módulo de elasticidade (GPa)	210	210	210

Tabela 6.20 – Cargas de rotura experimentais ( $F_{\max}$ ) e estimadas ( $F_{\max,est}$ ) das ligações de varões colados

	Varão $\Phi 8$		Varão $\Phi 10$		Varão $\Phi 12$	
	$F_{\max}$ (kN)	$F_{\max,est}$ (kN)	$F_{\max}$ (kN)	$F_{\max,est}$ (kN)	$F_{\max}$ (kN)	$F_{\max,est}$ (kN)
Média	74,1		126,5		155,3	
Máximo	75,6		133,3		158,9	
Mínimo	71,5	49,7	111,9	78,9	151,0	114,6
Desvio padrão	1,1		4,0		2,2	
$N$	19		50		15	

A rigidez de uma ligação, segundo o anexo C de uma versão *draft* da parte 2 do EC5 (CEN, 2003a), por varão, pode ser dada pela equação (6.10). A comparação entre os valores experimentais e estimados é apresentada na Tabela 6.21. Da sua análise pode verificar-se que a rigidez estimada segundo o procedimento do Eurocódigo 5 foi bastante inferior, em cerca de 85%, à registada experimentalmente. Desta forma a fórmula preconizada na referida versão *draft* não é adequada, pelo menos para as configurações de ligação estudadas. De referir, que o citado anexo C, “*Bonded-in steel rods*”, foi abandonado na versão mais recente da parte 2 do Eurocódigo 5 (CEN, 2004a).

$$k_s = 0,005d^{1,8}\rho^{1,5} \quad (6.10)$$

Onde:

- $\rho$  - Massa volúmica da madeira (kg/m<sup>3</sup>)  
 $d$  - Diâmetro do varão roscado (mm)



Tabela 6.21 – Rigidez experimental ( $K_s$ ) e estimada ( $K_{s,est}$ ) das ligações de varões colados

	Varão $\Phi 8$		Varão $\Phi 10$		Varão $\Phi 12$	
	$K_s$ (kN/mm)	$K_{s,est}$ (kN/mm)	$K_s$ (kN/mm)	$K_{s,est}$ (kN/mm)	$K_s$ (kN/mm)	$K_{s,est}$ (kN/mm)
Média	109,2	11,1	128,2	17,4	171,6	24,2
Máximo	217,3	14,8	277,3	22,5	301,9	30,9
Mínimo	48,7	8,5	55,6	10,7	103,2	19,9
Desvio padrão	46,9	2,0	47,1	2,7	54,7	3,4
N	28	28	84	84	24	24

A abordagem do EC5 não se revelou uma boa aproximação, pelo que foi feita uma estimativa da rigidez das ligações de varões colados usando uma abordagem simplificada. Desta forma, foi considerada a contribuição apenas das deformações devidas à tensão de tracção instalada, obtidas através da lei de Hook. Assim, admitiu-se que o filme de cola é suficientemente fino para que as deformações por corte nesta não sejam relevantes na contabilização da deformação total da ligação, sendo a deformação da ligação devida à deformação do varão e da madeira.

Considerando o esquema da ligação da Figura 6.51, a rigidez experimental é determinada para a deformação total ( $v_1+v_2$ ). Onde a deformação  $v_1$  engloba a deformação do elemento de madeira, de comprimento igual ao comprimento de colagem, e a deformação dos varões roscados, de 50mm de comprimento. A deformação  $v_2$  é proveniente do espigão do cabeçote, com 20mm de diâmetro e 87mm de comprimento, que corresponde à distância até à barra com abraçadeira onde se situa o deflectómetro.

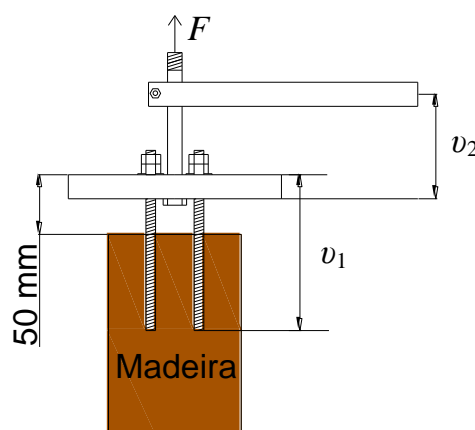


Figura 6.51 – Componentes da deformação medida numa ligação de varões colados

Tendo em conta o referido e as propriedades dos varões apresentadas na Tabela 6.19, admitindo um módulo de elasticidade de 13GPa para a madeira e usando o diâmetro dos elementos de madeira, é apresentada na Tabela 6.22 a comparação entre os valores médios da rigidez experimental e da obtida por este método.

Tabela 6.22 – Comparação entre a rigidez obtida experimentalmente ( $K_s$ ) e a obtida por modelação simplificada ( $K_{s,est}$ )

	Varão de 8mm		Varão de 10mm		Varão de 12mm	
	$K_s$ (kN/mm)	$K_{s,est}$ (kN/mm)	$K_s$ (kN/mm)	$K_{s,est}$ (kN/mm)	$K_s$ (kN/mm)	$K_{s,est}$ (kN/mm)
Média	109,2	276,9	128,2	338,1	171,6	393,8
Máximo	217,3	285,1	277,3	355,6	301,9	414,0
Mínimo	48,7	263,5	55,6	322,0	103,2	381,0
Desvio padrão	46,9	6,1	47,1	8,1	54,7	9,7
$N$	28	28	84	84	24	24

Da análise da Tabela 6.22 verifica-se que usando este método a rigidez é bastante sobrestimada, sendo a rigidez média estimada cerca do triplo da experimental. Mediante estes resultados procedeu-se a uma modelação em elementos finitos, onde apenas foi admitido que o filme de cola é suficientemente fino para se considerar que a madeira se encontra directamente ligada ao varão de aço.

O programa de elementos finitos usado foi o ABAQUS versão 6.7, por permitir trabalhar com materiais ortotrópicos. A modelação foi efectuada para cada uma das três configurações de varões roscados. Foi considerado comportamento elástico linear e as propriedades dos materiais apresentadas na Tabela 6.23. O módulo de elasticidade longitudinal admitido para a madeira corresponde à média obtida para as amostras de toros estudadas anteriormente. Da Tabela 6.22 verifica-se que as variações nos diâmetros dos elementos de madeira provocaram uma variação muito pequena no valor da rigidez estimada. Assim, na modelação, foi considerado o diâmetro dos elementos de madeira igual a 110, 130 e 150mm para as ligações com varões roscados de 8, 10 e 12mm de diâmetro, respectivamente. Este diâmetro dos elementos de madeira corresponde ao valor médio da classe de diâmetros a que os varões podem ser aplicados, definida no ponto 6.3.3 do presente trabalho. O diâmetro do varão roscado, na modelação, foi considerado igual ao seu diâmetro nominal. As restantes características da madeira foram obtidas com base no estudo de Bodig e Jane com 16 espécies de Pinho (Xu, 2002).

Tabela 6.23 – Propriedades dos materiais modelados

	$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$E_3$ (MPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$G_{12}$ (MPa)	$G_{23}$ (MPa)	$G_{31}$ (MPa)
Aço (Isotrópico)		210000			0,3		$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$		
Madeira (Monotrópico)	13000	$0,083E_1$	$0,083E_1$	0,335	0,335	0,416	$0,068E_1$	$0,068E_1$	$0,015E_1$

Na Tabela 6.23 a direcção 1 representa a direcção das fibras de madeira, enquanto as direcções 2 e 3 correspondem às direcções perpendiculares. A discretização efectuada é

apresentada na Figura 6.52. A dimensão padrão dos elementos finitos, prismáticos do tipo linear de 8 nós, foi de 5mm de aresta, efectuando o programa as adaptações geométricas necessárias à malha, não tendo sido obtidas alterações significativas nos resultados para malhas mais refinadas. O provete de madeira foi considerado encastrado na superfície da base e aplicado no topo dos varões um carregamento uniformemente distribuído de valor igual a  $\frac{1}{4}$  de 40% da carga de rotura estimada da ligação (Tabela 6.24).

Um corte ilustrando a deformada e a distribuição de tensões segundo a direcção do fio para 40% da carga de rotura estimada (7,5kN por varão), de uma ligação com varões roscados de 8mm de diâmetro, é apresentado na Figura 6.53.

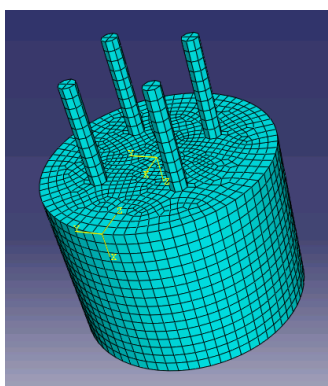


Figura 6.52 – Discretização em elementos finitos

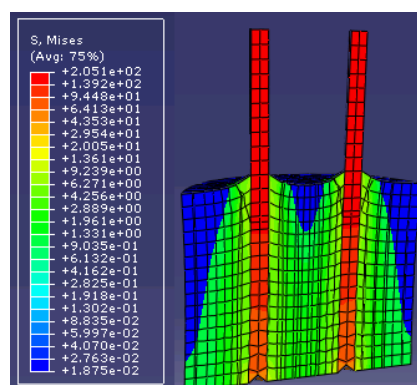


Figura 6.53 – Corte ilustrando a deformada e as tensões instaladas segundo a direcção do fio (MPa)

A rigidez estimada e experimental, para cada configuração da ligação, são apresentadas na Tabela 6.24. É importante referir que os deslocamentos obtidos da modelação em elementos finitos dizem respeito apenas à parte da ligação até às porcas, deslocamento  $v_1$  na Figura 6.51. Assim, tal como anteriormente, é necessário adicionar a deformação do espigão do cabeçote, deslocamento  $v_2$  na Figura 6.51, obtido pela lei de Hook.

Para averiguar a influência da monotropia da madeira nas deformações da ligação, foi efectuada uma modelação considerando a madeira como um material isotrópico com um coeficiente de Poisson de 0,335. As deformações ( $v_1$ ) obtidas foram 20% menores quando comparadas com as obtidas considerando a monotropia da madeira.

Tabela 6.24 – Comparação entre a rigidez experimentalmente e a obtida da modelação

Varão (mm)	$v_1$ (mm)	$v_2$ (mm)	$0,4F_{\max}$ (kN)	$K_{s,est.}$ (kN/mm)	$K_s$ (kN/mm)	
					Média	Maxima
8	0,1001	0,0396	30	214,8	109,2	217,3
10	0,1190	0,0659	50	270,4	128,2	277,3
12	0,1140	0,0818	62	316,7	171,6	301,9

Analisando a Tabela 6.24, pode concluir-se que da deformação total simulada ( $\delta_1 + \delta_2$ ) cerca de 35% é proveniente da zona da ligação inserida na madeira. Comparando as rigidezes simuladas e experimentais, verifica-se que as rigidezes simuladas são superiores em cerca do dobro da média das obtidas experimentalmente, e inferiores às obtidas pelo anterior método simplificado. No entanto, na modelação não são contabilizadas hipotéticas deformações provenientes de esmagamento nas anilhas, da deformação da rosca no interior das duas porcas, deformações no cabeçote da ligação ou deformações devido a defeitos de execução. Como defeitos de execução podem ser apontados a falta de alinhamento dos furos dos varões, não sendo completamente paralelos entre si e o eixo da peça, ou variações do seu diâmetro, devido a vibrações da broca o que se resulta num diâmetro superior e conseqüentemente numa maior espessura do filme de cola. Embora não tenha sido possível obter as propriedades mecânicas da cola junto do fabricante, as resinas epóxi possuem, geralmente, baixos módulos de elasticidade (2 a 4GPa), pelo que o aumento da espessura do filme de cola irá repercutir-se num aumento da deformação da ligação. Para além disso, existiram casos onde, devido possivelmente à retenção de ar na cola, esta acabou por retraino no interior do furo resultando num menor comprimento de colagem e conseqüentemente em maior deformação (Figura 6.54). Por último, de referir a dificuldade em garantir a centralidade dos varões nos furos, o que impede de assegurar uma uniforme espessura do filme de cola em torno do varão.



Figura 6.54 – Defeito de execução numa ligação de varões colados

Assim, a rigidez simulada deve ser encarada como a rigidez máxima a obter para este tipo de ligação, algo que se comprova ao se verificar que a rigidez simulada é bastante próxima dos máximos registados para as rigidezes das ligações (Tabela 6.24). Pode-se assim concluir que esta tipologia de ligação, ao apresentar uma rigidez elevada, leva a que os defeitos de execução se possam repercutir em grandes penalizações em termos de rigidez.

## 6.5 Conclusões

Neste capítulo procedeu-se ao estudo de três tipologias de ligação para uso em madeira de secção circular de Pinheiro bravo: i) ligações de chapa central, ii) ligações de sistema de ancoragem e iii) ligações de varões colados.

As ligações de varões colados apresentaram uma rotura condicionada pelo aço para um filme de cola com 1mm de espessura e um comprimento de colagem de 10 vezes o diâmetro do varão. Esta tipologia de ligação apresentou os valores médios mais elevados de carga de rotura e rigidez, 155,3kN e 171,6kN/m, respectivamente. A rotura das ligações de chapa central foi simultaneamente condicionada pela madeira e aço, com uma carga de rotura média de 112kN e uma rigidez média de 31,6kN/m, valor 80% inferior ao obtido para as ligações coladas. No caso das ligações de sistema de ancoragem, a rotura deveu-se a tracção na direcção perpendicular às fibras, praticamente não apresentando deformações plásticas. Esta tipologia apresentou o valor mais baixo de carga de rotura média (94,9kN) e uma rigidez média (29,3 kN/m) semelhante à da ligação de chapa central.

Apesar das diferenças em termos de cargas de rotura média das tipologias de ligação estudadas, a tensão de tracção aplicada no provete de madeira no momento da rotura foi semelhante, quer em termos de valor médio, 8,0 a 10,9MPa, quer em termos de valor característico, 6,6 a 7,7MPa.

As ligações de varões colados foram a tipologia de ligação que apresentou menor deformação para a carga máxima, enquanto as ligações de chapa central foram as que apresentaram maior valor de deformação. Estas também apresentaram deformações plásticas significativas antes da rotura.

A rigidez das ligações estudadas apresentou um coeficiente de variação (31,6 a 42,9%), superior ao obtido para a carga de rotura (1,4 a 21,9%). As ligações de varões colados foram as que apresentaram o menor coeficiente de variação em termos de carga de rotura (1,4 a 3,2%), o que resulta num quinto percentil bastante próximo do valor médio.

As formulações do Eurocódigo 5, em termos de previsão de carga de rotura e rigidez, foram aplicadas às ligações de chapa central e às ligações de sistema de ancoragem. Com base nos resultados obtidos é possível afirmar que o preconizado no Eurocódigo 5 pode ser aplicado, com erros aceitáveis, às ligações de sistema de ancoragem. Nas ligações de chapa central, a carga de rotura foi estimada com um erro médio superior (24,0%), embora os valores de carga previstos tenham sido, geralmente, inferiores aos obtidos experimentalmente. A rigidez destas ligações foi igualmente estimada com um erro médio elevado (33,9%), não fornecendo valores conservadores.

A presente versão do Eurocódigo 5 não apresenta qualquer modelo de cálculo para as ligações de varões colados. Assim, a carga de rotura foi estimada considerando a rotura de um varão e a plastificação dos outros três. Usando este modelo, as cargas de rotura foram estimadas com um erro moderado, fornecendo valores conservadores. A simulação da rigidez foi efectuada com recurso a um modelo em elementos finitos, sendo os resultados estimados bastante superiores aos experimentais, o que leva a concluir que esta tipologia de ligação, ao

apresentar uma rigidez bastante elevada, é bastante susceptível a penalizações na rigidez devido a pequenos defeitos de execução.

Das tipologias de ligação estudadas, as ligações de varões colados foi a que apresentou, claramente, mais potencial. Este tipo de ligação apresentou um comportamento dúctil, o maior valor médio de carga de rotura e rigidez. Para além disso, devido ao baixo coeficiente de variação, esta ligação apresenta um valor característico da carga de rotura bastante próximo do seu valor médio. Em termos de execução e estética, as ligações de varões colados foram de menor complexidade de montagem que as restantes tipologias estudadas e apresentam menos peças metálicas à vista, o que resulta numa ligação esteticamente mais apelativa.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

### 7.1 Conclusões

A madeira de secção circular como material de construção possui diversas vantagens, entre as quais se destaca o facto de ser um material renovável e amigo do ambiente (retendo CO<sub>2</sub>), sendo indispensável numa política de desenvolvimento sustentável. Para além disso, as diversas tipologias de estruturas encontradas demonstram que é um material bastante versátil. O objectivo do presente estudo foi fornecer as bases, em termos de propriedades mecânicas e ligações, para a aplicação estrutural da madeira de secção circular de Pinheiro bravo. Na persecução deste objectivo foram obtidos resultados e conclusões importantes, os quais se apresentam em seguida, de forma sucinta.

A avaliação das propriedades mecânicas foi efectuada em duas amostras de toros de Pinheiro bravo, uma amostra procedente do Centro de Portugal e a outra procedente do Norte de Portugal. Tendo em conta o sistema de classes da norma EN 338 (CEN, 2003c), e ressaltando-se o facto de a norma ter sido concebida para elementos de madeira de secção rectangular, as amostras enquadram-se na classe C30, sendo a resistência à compressão o parâmetro que impede a atribuição da classe C35.

Da comparação das amostras, verificou-se não existirem diferenças significativas nas suas propriedades mecânicas, apesar de serem oriundas de zonas geográficas bastante distantes. Comparando com a madeira serrada de Pinheiro bravo, constatou-se que em termos de resistência e módulo de elasticidade, a madeira de secção circular de Pinheiro bravo é semelhante à madeira serrada da classe EE. Relativamente a outras espécies de madeira de secção circular, as propriedades mecânicas obtidas neste estudo foram superiores às obtidas para grande parte das espécies das quais se conhecem estudos.

O efeito do torneamento nas propriedades mecânicas dos toros foi estudado numa sub amostra. Concluiu-se que a amostra de toros torneados possuía uma resistência à flexão 35% inferior à amostra de toros não torneados. Em termos de resistência à compressão a redução

registada foi de 12%. Contudo, as diferenças registadas ao nível do módulo de elasticidade foram pouco significativas.

Para economia de tempo e recursos na determinação das propriedades mecânicas dos toros, foi estudada a possibilidade de recorrer a técnicas não destrutivas para esse fim. Assim, as amostras foram avaliadas não destrutivamente por análise visual e por meios mecânicos.

Da análise visual realizada verificou-se que a resistência apresentava boa correlação com a taxa de crescimento ( $r=0,69$  a  $r=0,71$ ) e percentagem de lenho juvenil ( $r=0,64$  a  $r=0,77$ ). A aplicação de uma proposta de classificação visual, apresentada em anterior estudo, levou à rejeição de 34 toros do total de 80 que compõem a amostra conjunta. O motivo da maioria das rejeições deveu-se aos limites impostos para a taxa de crescimento. Verificou-se que devido ao reduzido número de toros alocados à classe superior, é preferível a redução de duas classes de qualidade para apenas uma e o aumento do limite imposto à taxa de crescimento.

O módulo de elasticidade estático foi a propriedade com melhor correlação com a resistência ( $r=0,62$  a  $r=0,88$ ). Assim, avaliação mecânica não destrutiva realizada consistiu em estimar o módulo de elasticidade, mas na sua variante dinâmica. A estimativa das propriedades mecânicas é efectuada por meio de correlações entre estas e o módulo de elasticidade dinâmico. O módulo de elasticidade dinâmico foi estimado por dois métodos, por meio de vibração longitudinal, recorrendo ao equipamento MTG, e por meio de ultrasons, usando o equipamento *Pundit Plus*. Verificou-se que o módulo de elasticidade dinâmico obtido por vibração longitudinal foi geralmente inferior ao estático, enquanto o módulo de elasticidade dinâmico obtido por ultrasons foi superior. Os dois métodos apresentaram coeficientes de correlação semelhantes entre o módulo de elasticidade dinâmico e as propriedades mecânicas, entre 0,72 e 0,90, sendo que o MTG se revelou mais prático por requerer apenas uma pessoa para realizar a classificação. Na tentativa de melhoria dos coeficientes de correlação foram efectuadas regressões lineares múltiplas, usando o módulo de elasticidade dinâmico e outras propriedades. No entanto, o incremento no coeficiente de correlação não foi significativo.

Na temática da análise não destrutiva foi ainda desenvolvido um modelo, SIMPOLE (SIMulator of POLEs), um algoritmo construído em VBA (visual Basic for Applications) do Microsoft Excel<sup>®</sup>, que permite a simulação das propriedades mecânicas de toros. Este algoritmo permite a inserção ou geração de toros, em termos de geometria, massa volúmica, e distribuição dos nós ao longo do comprimento do toro. Bem como a simulação da resistência à flexão, módulo de elasticidade, e a localização e causa (presença ou não de nós) da rotura desses toros. As propriedades mecânicas são simuladas segundo a norma EN 14251, para o caso de ensaio como viga simplesmente apoiada, ou segundo a norma EN 14229, para o caso de ensaio como viga encastrada.

Após calibração, o modelo foi aplicado a uma amostra de 57 toros de pequeno diâmetro de Pinheiro bravo, oriundos do Centro e Norte de Portugal. O SIMPOLE foi capaz de estimar o



módulo de elasticidade e a resistência à flexão individual dos toros com um erro médio aceitável (16,9 a 17,2%). O módulo de elasticidade da amostra foi estimado com erro semelhante, enquanto a resistência à flexão da amostra foi estimada com um erro bastante reduzido (5,3%). O valor característico estimado da resistência à flexão foi 18,5% inferior ao experimental. Com base nestes resultados, o SIMPOLE mostrou potencial para estimar as propriedades mecânicas de toros oriundos de uma floresta, sendo conhecidas as distribuições estatísticas dos nós e as propriedades mecânicas da madeira limpa.

Para além das propriedades mecânicas, e de métodos para as estimar, a aplicação estrutural da madeira de secção circular está dependente da eficiência dos sistemas de ligação. Como tal, foi dado enfoque a três tipologias de ligação, que apresentaram mais potencial de aplicação. Assim, foram estudadas ligações de chapa central, ligações de sistema de ancoragem e ligações de varões colados. Das tipologias de ligação estudadas, as ligações de varões colados foi a que apresentou mais potencial.

A tipologia de ligação de varões colados apresentou o maior valor médio de carga de rotura e rigidez, e um comportamento dúctil, para uma espessura do filme de cola de 1mm e um comprimento de colagem de 10 vezes o diâmetro do varão. A configuração de quatro varões colados de 12mm de diâmetro apresentou uma carga média de rotura de 155,3kN, 38 a 64% superior à obtida para as outras tipologias estudadas, e uma rigidez média de 171,6kN/m, cinco a seis vezes superior à obtida para as restantes tipologias. As ligações de varões colados apresentaram o coeficiente de variação da carga de rotura mais baixo (1,4 a 3,2%), cerca de 5 a 15 vezes inferior ao obtido para as restantes tipologias de ligação estudadas. Como resultado, esta ligação apresenta um valor característico de carga de rotura bastante próximo do seu valor médio. Apesar das diferenças em termos de cargas de rotura média das tipologias de ligação estudadas, a tensão de tracção aplicada no provete de madeira no momento da rotura foi semelhante.

Em termos de capacidade de deformação, as ligações de chapa central foi a tipologia que apresentou o maior valor médio de deformação para a carga máxima. Por oposição, as ligações de varões colados foram aquelas que apresentaram a menor deformação. Em termos de facilidade de execução e estética, as ligações de varões colados foram mais fáceis de executar que as restantes, apresentando um aspecto estético mais apelativo em virtude de apresentarem menos peças metálicas visíveis.

A aplicação das formulações do Eurocódigo 5 para previsão de carga de rotura e rigidez de ligações madeira-aço em corte duplo apresentou erros aceitáveis no caso das ligações de sistemas de ancoragem. No entanto, no caso das ligações de chapa central, os valores estimados apresentaram um desfasamento superior face aos experimentais, nem sempre sendo conservadores. As ligações de varões colados não são contempladas na presente versão do Eurocódigo 5 pelo que foi apresentado um modelo simples, considerando a rotura de um varão e a plastificação dos outros três, que permite estimar a capacidade de carga de modo

conservador, com erro aceitável. A previsão da rigidez foi efectuada com recurso a um modelo em elementos finitos, sendo os resultados estimados bastante superiores aos experimentais, o que leva a concluir que nesta tipologia de ligação, a rigidez pode ser bastante influenciada por pequenos defeitos de execução.

## 7.2 Trabalho futuro

A madeira de secção circular de Pinheiro bravo aqui estudada apresentou excelentes propriedades para uso em estruturas. Com o presente estudo procurou-se fornecer as bases para que isso aconteça, no entanto, algum trabalho remanescente pode ser realizado:

- elaboração de uma norma de classificação visual nacional, nos moldes existentes para a madeira serrada, de modo a criar oferta de material adequado para aplicação estrutural. Adicionalmente é necessário investir na formação e certificação de classificadores;
- testar a eficácia de outros métodos de avaliação não destrutiva, como a vibração transversal, que apresentou excelentes resultados em outros estudos;
- na elaboração do modelo SIMPOLE a penalização dos nós foi determinada com base na fórmula de Hankinson usando o desvio do fio, em função do diâmetro do nó, dado por uma fórmula obtida em outro estudo. Desta forma seria importante modelar o padrão do desvio do fio no caso particular do Pinheiro bravo, de modo a avaliar a aplicabilidade da fórmula;
- realização de ensaios de fadiga e de longa duração com as ligações estudadas. Seria também interessante estudar o comportamento das ligações, em especial as de varões colados, quando sujeitas a elevadas temperaturas, como em situação de incêndio;
- realização de ensaios de ligações de varões colados com variação do teor de água, de modo a aferir a influência deste parâmetro no comportamento da colagem;
- na elaboração das ligações foram seguidos os espaçamentos do EC5. No entanto estes foram estabelecidos para madeira serrada. Assim, o estudo do efeito da variação dos espaçamentos, nomeadamente nas ligações de varões colados, onde os espaçamentos seguidos foram indicados num anexo do EC5 que foi abandonado, seria importante;
- realização de ensaios de arrancamento com varões de diâmetros e classes diferentes das estudadas neste trabalho, de modo a aferir se o comprimento de colagem estabelecido continua a garantir roturas dúcteis, salvo quando a madeira possui fendas, ou se deve ser aumentado ou se pode ser reduzido.
- construção de estruturas piloto de modo a verificar o comportamento e a eficiência em serviço das ligações estudadas. Como sugestão de estrutura apresenta-se na Figura 7.1, e seguintes, uma cúpula, com 4 metros de altura e 8 metros de diâmetro, constituída por 80 toros de 60mm de diâmetro, 33 nós de ligação e usando ligações coladas com varão roscado de 6mm de diâmetro. A estrutura deve ser instrumentada e posteriormente sujeita a esforços, aplicando, por exemplo, uma carga vertical no nó de topo e analisado o seu comportamento. A construção de estruturas, como a sugerida, demonstrativas do potencial deste material, permite impulsionar o seu uso em Portugal e instigar novas construções.

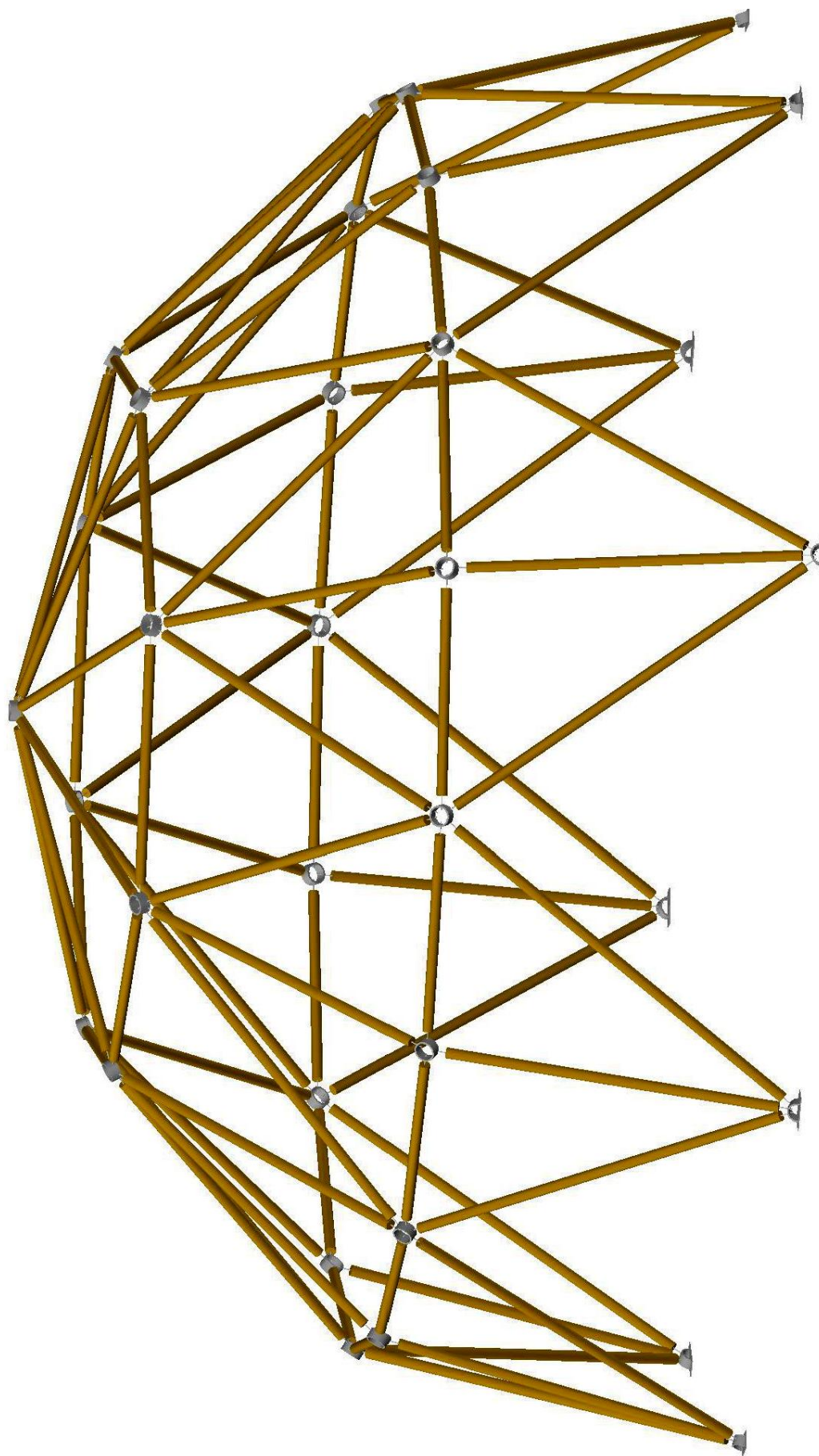


Figura 7.1 – Estrutura piloto proposta

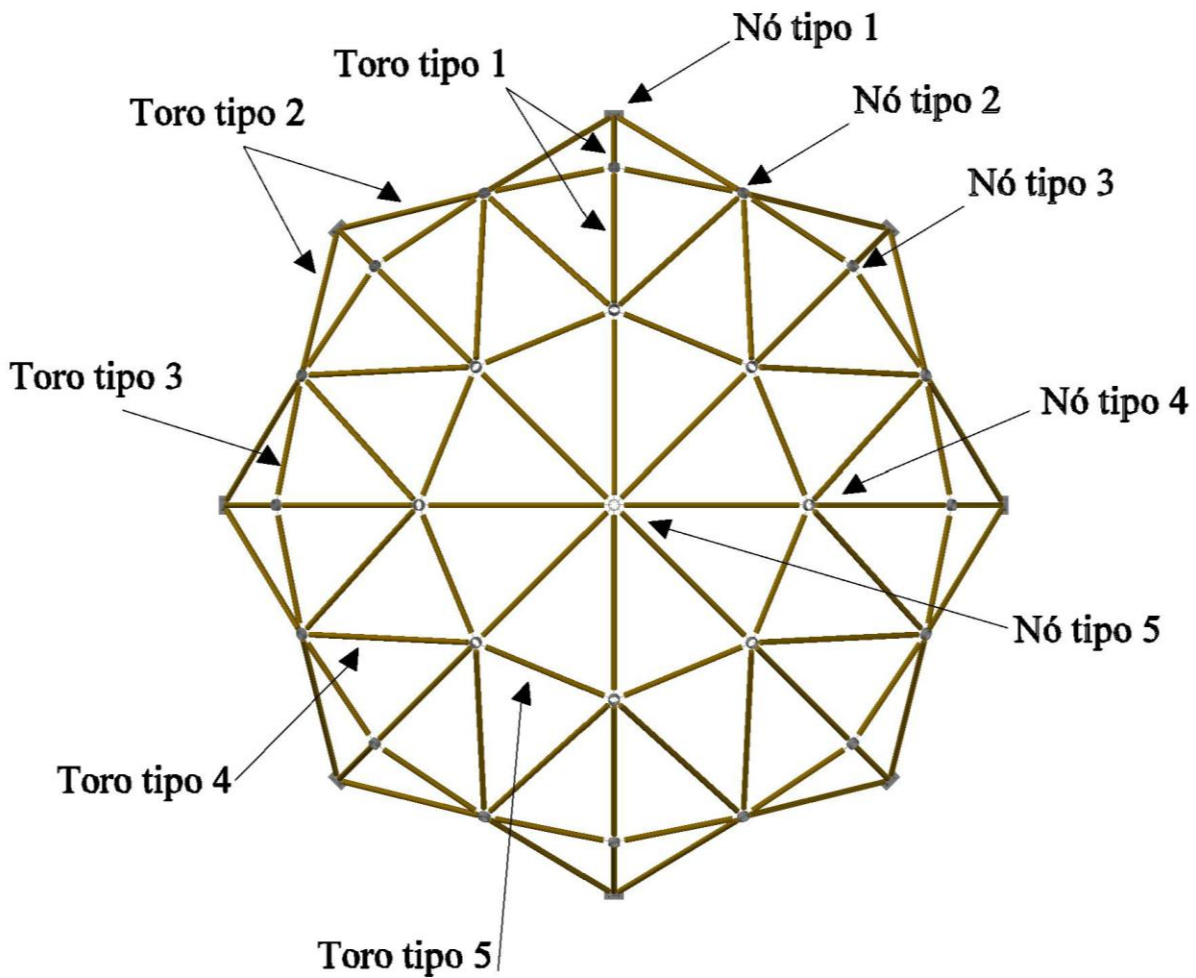


Figura 7.2 – Vista de topo da estrutura piloto proposta com identificação dos nós de ligação e elementos estruturais

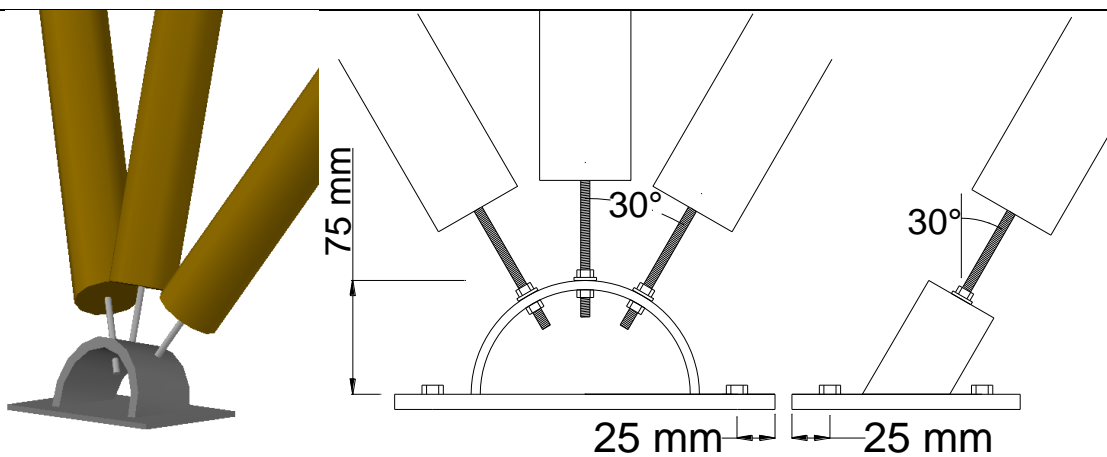


Figura 7.3 – Pormenor do nó de ligação tipo 1

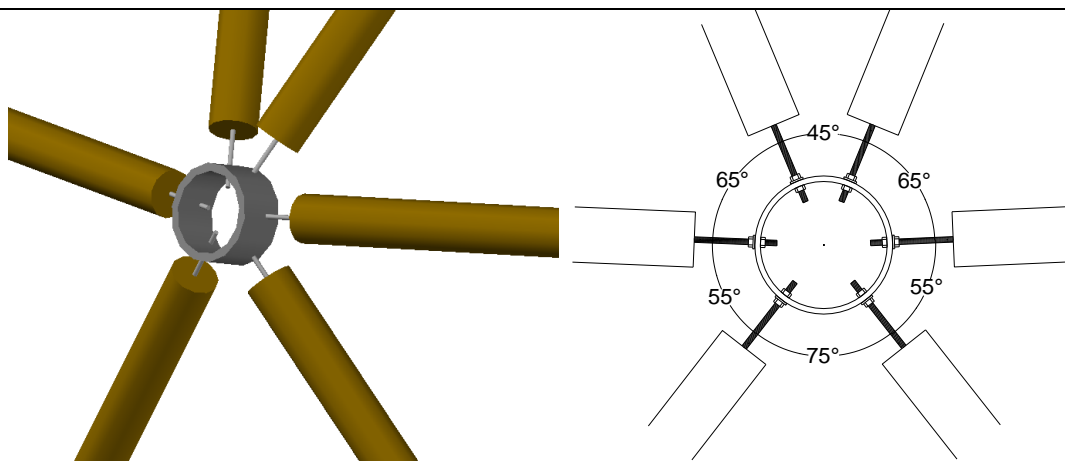


Figura 7.4 – Pormenor do nó de ligação tipo 2

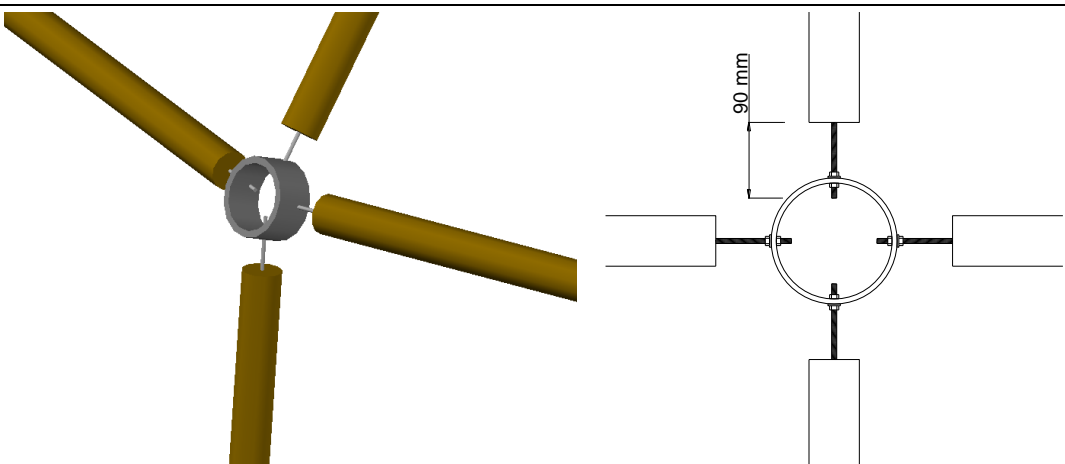


Figura 7.5 – Pormenor do nó de ligação tipo 3

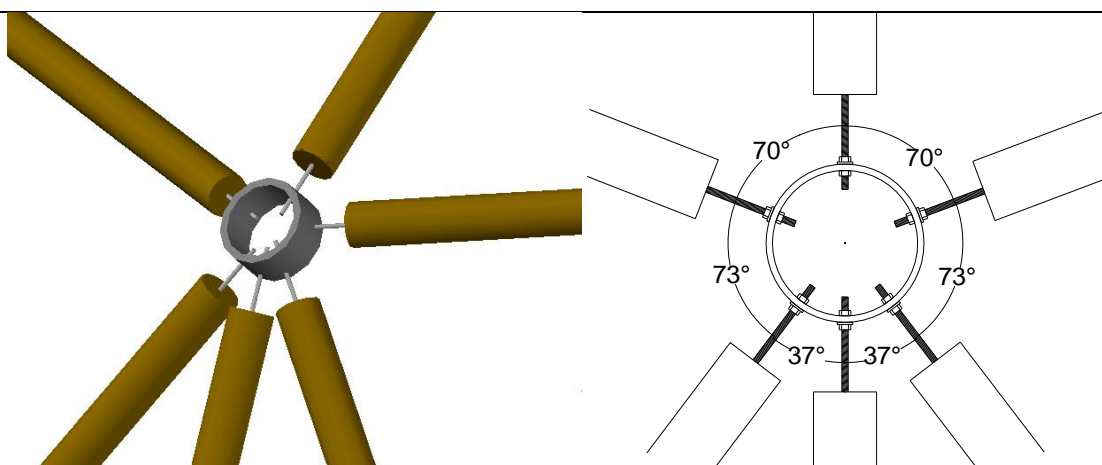


Figura 7.6 – Pormenor do nó de ligação tipo 4

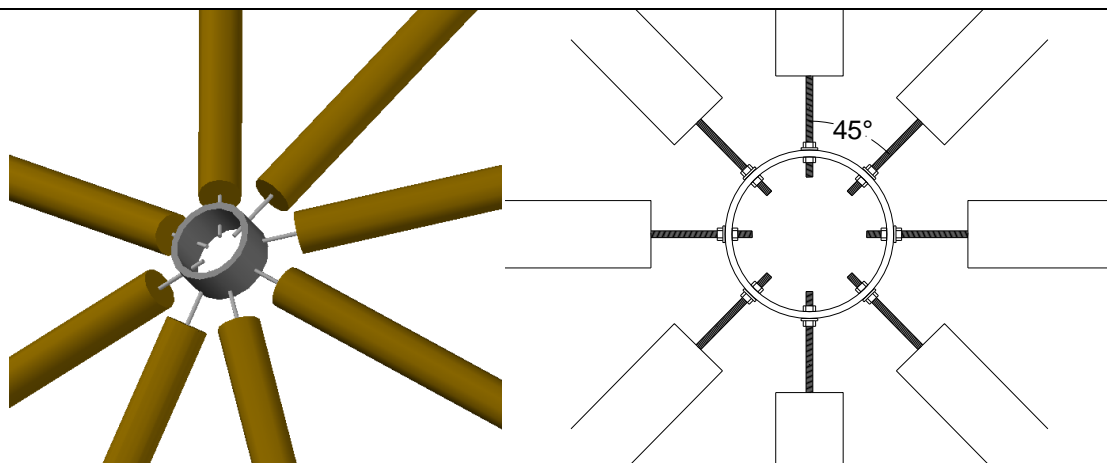


Figura 7.7 – Pormenor do nó de ligação tipo 5

Tabela 7.1 – Material necessário para a construção da estrutura piloto

- 
- 160 varões roscados de 6mm de diâmetro e 150mm de comprimento.
- 
- 80 toros de 60mm de diâmetro com os seguintes comprimentos:
    - i) 1,79m para os 24 toros do tipo 1;
    - ii) 2,25m para os 16 toros do tipo 2;
    - iii) 1,07m para os 16 toros do tipo 3;
    - iv) 2,03m para os 16 toros do tipo 4;
    - v) 1,25m para os 8 toros do tipo 5.
- 
- 320 anilhas e porcas para varões roscados de 6mm de diâmetro
- 
- 33 segmentos de perfil tubular de 150mm de diâmetro externo e 6mm de espessura com 50mm de comprimento, para execução dos nós de ligação.
- 
- 8 chapas de aço de 250x150x20mm, para execução dos apoios.
- 
- 32 parafusos de 8mm para fixação dos nós de ligação da base da estrutura ao solo
- 

Termina-se este capítulo reforçando a ideia de que a madeira de secção circular de Pinheiro bravo é um material de construção com excelentes valências, quer mecânicas quer de sustentabilidade. Espera-se com este estudo fornecer o incentivo necessário para que este material seja devidamente valorizado em aplicações estruturais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Adjanohoun, G., Guillot, J. L., Lanvin, J. D. e Cholat, R. (1998), "Small roundwood grading by non destructive x-rays and ultrasonic waves methods." WCTE 1998, Suíça, 684-691.
- Akcay, H., Eckelman, C. e Haviarova, E. (2005), "Withdrawal, Shear, and Bending Moment Capacities of Round Mortise and Tenon Timber Framing Joints." Forest Products Journal, vol.55, n.º 6, pp. 60-67.
- Al-Khattat, I. (2002), "Small diameter timber: the ultimate engineering solution." Small Diameter Timber: Resource Management, and Markets, Washington.
- Al-Khattat, I. (2008). "Light Prestressed Segmented Arch (LPSA) Bridges: A demonstration of Sustainable Engineering." Structural Engineering International.
- Al-Mattarneh, H. M. A., Ahmad, Z., Ghodgaonkar, D. K. e Malik, S. A. (2002), "Near field microwave methods for evaluation and inspection of timber material." WCTE 2002, Malásia.
- Al-Mattarneh, H. M. A., Ghodgaonkar, D. K., Majid, W. M. b. W. A., Ahmad, Z., Noh, M. S. M. e Hamid, H. A. (2002), "Electromagnetic properties of selected malaysian timber in the microwave frequency range." WCTE 2002, Malásia.
- Anthony, R. W., Pandey, A. K. e Arnette, C. G. (1998a), "Inspection and assessment of timber piles." WCTE 1998, Suíça, 432-439.
- Anthony, R. W., Renforth, L. e Nelson, R. F. (1998b), "Nondestructive strength evaluation of pinus sulvestris poles in the U.K." WCTE 1998, Suíça, 642-648.
- Barnard, G. e Griffiths, R. (1998), "Strength characteristics for small roundwood in bending and compression from a UK resource." WCTE 1998, Suíça, 602-609.
- Bell, E. R., Peck, E. C. e Krueger, N. T. (1954). "Modulus of elasticity of wood determined by dynamic methods." Report 1977. USDA Forest Service.
- Bhandarkar, S. M., Faust, T. D. e Tang, M. (1999), "Catalog: a system for detection and rendering of internal log defects using computer tomography." Machine Vision Applications, vol.11, n.º4, pp. 171-190.
- Bhandarkar, S. M., Luo, X., Daniels, R. e Tollner, E. W. (2005), "Detection of cracks in computer tomography images of logs." Pattern Recognition Letters, vol.26, n.º26, pp. 2282-2294.
- Bhandarkar, S. M., Luo, X., Daniels, R. e Tollner, E. W. (2006), "A novel feature-based tracking approach to the detection, localization, and 3-D reconstruction of internal defects in hardwood logs using computer tomography." Pattern Analysis and Applications, vol.9, n.º2, pp. 155-175.
- Biblis, E. e Meldahl, R. (2006), "Flexural properties of small, clear wood specimens obtained from two 20-year-old loblolly pine plantations planted at 6- by 6-foot and 12- by 12-foot spacings." Forest Products Journal vol. 56, n.º 6, pp. 56-58.
- Bobadilha, I., Arriaga, F., Esteban, M., Iñiguez, G. e Blázquez, I. (2004), "Density estimation by vibration, screw withdrawal resistance and probing in particle and medium density fibre boards." WCTE 2004, Finlândia.
- Boren, H. (1998), "The influence of processing methods on timber's MOE and MOR in bending and compression parallel to grain." WCTE 1998, Suíça, 760-761.
- Boren, H. e Barnard, G. (2000), "Analysis of the strength and stiffness properties for small diameter round Scots pine timber tested in bending and compression parallel to the grain." Paperi ja Puu - Paper and Timber, vol.82, n.º 1, pp. 48-56.

- Bostrom, L. (1998), "Machine strength grading using smart image sensor for defect detection." WCTE 1998, Suíça, 312-317.
- Brasil, M. A. M., Veiga, R. A. d. A. e Ferreira, M. (1977), "Variação da densidade básica nas secções transversais do caule da base do tronco para a copa de Eucalipto." IPEF, vol.15, pp. 73-82.
- Broughton, J. G. e Hutchinson, A. R. (2001), "Glued joints in hardwood timber." Construction and Building Materials, vol.15, pp. 17– 25.
- Bucur, V. (2002), "Ultrasonic and x-ray techniques for nondestructive evaluation of wood." Forum Acusticum, Espanha.
- Bucur, V. (2003), "Techniques for high resolution imaging of wood structure: a review." Measurement Science and Technology, vol.14, pp. .
- Buehlmann, U. e Thomas, R. E. (2002), "Impact of human error on lumber yield in rough mills." Robotics and Computer Integrated Manufacturing, vol.18, , pp. 197-203.
- Burton, R., Dickson, M. e Harris, R. (1998), "The use of roundwood thinnings in buildings - a case study." Building Research & Information vol.26, n.º 2, pp. 76-93.
- Carreira, M. R., Cheung, A. B., Oliveira, F. G. R. d., Dias, A. A., Jr., C. C., Sales, A. e Candian, M. (2006), "Classificação de peças estruturais de pinus sp por ultra-som." 17º congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, Brasil.
- Carreira, M. R., Cheung, A. B., Oliveira, F. G. R. d., Dias, A. A., Jr., C. C., Sales, A. e Stamato, G. C. (2003), "Avaliação de técnicas não-destrutivas aplicadas à madeira de *Pinus sp.*" III Pan American for Nondestructive Testing, Brasil.
- CEN (1991). "Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics." EN 26891. Comité Européen de normalization.
- CEN (1995). "Round and sawn timber - Method of measurement of features." EN 1310. Comité Européen de normalization.
- CEN (2002). "Eurocode 5 - Design of timber structures Part 1-1." EC5. Comité Européen de normalization.
- CEN (2003a). "Eurocode 5 - Design of timber structures Part 2." EC5. Comité Européen de normalization.
- CEN (2003b). "Structural round timber – Test methods." EN14251. Comité Européen de normalization.
- CEN (2003c). "Structural timber – Strength classes." EN338. Comité Européen de normalization.
- CEN (2003d). "Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties." EN408. Comité Européen de normalization.
- CEN (2004a). "Eurocode 5 - Design of timber structures Part 2." EC5. Comité Européen de normalization.
- CEN (2004b). "Structural timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species." EN 1912. Comité Européen de normalization.
- CEN (2004c). "Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density." EN 384. Comité Européen de normalization.
- CEN (2007). "Structural timber – Wood poles for overhead lines." prEN 14229. Comité Européen de normalization.
- Chans, D. O., Cimadevila, J. E. e Gutiérrez, E. M. (2008), "Glued joints in hardwood timber." International Journal of Adhesion & Adhesives, vol.28, pp. 457– 463.
- Chans, D. O., Cimadevila, J. E. e Gutiérrez, E. M. (2009), "Influence of the geometric and material characteristics on the strength of glued joints made in chestnut timber." Materials and Design, vol.30, pp. 1325-1332.



- Chapman, J. (2002), "The potencial of radiata poles as the main structural elements in apartment buildings." *NZ Timber Design Journal*, vol.11, n.º 3, pp. 17 - 24.
- Chrisp, T. M., Cairns, J. e Gulland, C. (2003), "The development of roundwood timber pole structures for use on rural community technology projects." *Construction and Building Materials*, vol.17, pp. 269-279.
- Chui, Y. H., Barclay, D. W. e Cooper, P. A. (1999), "Evaluation of wood poles using a free vibration technique." *Journal of Testing and Evaluation*, vol.27, n.º 23, pp. 191-195.
- Clough, R. W. e Penzien, J.(1993), "Dynamics of structures," McGraw - Hill International Editions.
- Correia, R. R. e Dias, A. A. (2006), "Avaliação da resistência de ligações com parafusos auto-atarraxantes do tipo torx solicitados por tracção axial, em peças de madeira." *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, vol.8, pp. 1-30.
- Coutinho, J. d. S.(1999), "Materiais de Construção I," Madeiras.
- Cramer, S. M. e Goodman, J. R. (1983), "Model for stress analysis and strength predicting of lumber." *Wood and Fiber Science*, vol.15, n.º 4, pp. 338-349.
- Custódio, J., Broughton, J. e Cruz, H. (2009), "A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints." *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol.29, pp. 173 -185.
- Czmoch, I., Thelandersson, S. e Larsen, H. J. (1991), "Effect of within member variability on bending strength of structural timber." *CIB W18 / 24-6-3*.
- Devries, P. L.(1993), "A first course in computational physics," John Wiley & Sons. New York.
- Dias, A. (2009). "Estruturas de madeira." acessado 23 de Fevereiro, 2010, de <http://estruturasdemadeira.blogspot.com/2010/04/torre-de-madeira-em-igarata.html>.
- Eckelman, C., Haviarova, E. e Erdil, Y. (2007), "Exploratory study of small timber trusses constructed with through-bolt and cross-pipe heel connectors." *Forest Products Journal*, vol.57, n.º 3, pp. 39-47.
- Eckelman, C. A. (2004), "Exploratory study of high-strength low-cost through-bolt with cross-pipe and nut connections for square and roundwood timber frame construction." *Forest Products Journal*, vol.54, n.º 12, pp. 29-37.
- Eckelman, C. A. e Senft, J. F. (1995), "Truss system for developing countries using small diameter roundwood and dowel nut construction." *Forest Products Journal* vol.45, n.º 10, pp. 77-80.
- Emerson, R. N., Pollock, D. G., Kainz, J. A., Fridley, K. J., McLean, D. I. e Ross, R. J. (1998), "Nondestructive evaluation techniques for timber bridges." *WCTE 1998, Suíça*, 670-677.
- Engineers, B. C. (2010). acessado 20 de Julho, 2010, de <http://www.bcweb.com>.
- Faller, R. K., Kretschmann, D. E., Reid, J. D., Hascall, J. A. e Sicking, D. L. (2010), "Midwest guardrail system with round timber posts." *WCTE 2010, Itália*.
- Fertis, D. G.(2006), "Nonlinear Structural Engineering," Springer. Alemanha.
- Fisherman, G. S.(1996), "Monte Carlo: concepts, algorithms and applications," Springer. New York.
- Flach, M. e Frenette, C. (2000), "Engineering solutions and connections." *WCTE 2000, Canadá*.
- Foley, C. (2003), "Modeling the effects of knots in structural timber." *Division of structural Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund, Doctoral Thesis*.
- Fonseca, F. M. d. A. (1989), "Variação de algumas características na madeira de Pinus pinaster Ait." *Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Tese de Doutoramento*.
- Franco, N. e Pellicane, P. J. (1993), "Three-dimensional model for wood-pole strength predictions." *Journal of structural Engineering*, vol.119, n.º 7, pp. 2199-2214.

- Gard, W. F., Vries, P. d. e Lanvin, J. D. (1998), "Methods to determine mechanical properties in order to grade roundwood." WCTE 1998, Suíça, 634-641.
- Ghodgaonkar, D. K., Majid, W. M. B. W. A. e Limat, H. B. H. J. (1998), "Microwave nondestructive testing of light red meranti timber." WCTE 1998, Suíça, 333-339.
- Golfín, J. I. F.-., Díez-Barra, M. R., Hermoso, E. e Mier, R. (2007), "Mechanical characterization of visually classified, small-diameter laricio pine round timber." Spanish Journal of Agricultural Research, vol.5, n.º 3, pp. 304-311.
- Green, D. W., Evans, J. W., Murphy, J. F., Hatfield, C. A. e Gorman, T. M. (2005). "Mechanical grading of 6-inch-diameter lodgepole pine logs for the travelers' rest and rattlesnake creek bridges." Research paper FPL-RN-0297. USDA Forest Service.
- Green, D. W., Gorman, T. M., Evans, J. W. e Murphy, J. F. (2004), "Improved grading system for structural logs for log homes." Forest Products Journal vol.54, n.º 9, pp. 52-62.
- Green, D. W., Gorman, T. M., Evans, J. W. e Murphy, J. F. (2006), "Mechanical grading of round timber beams." Journal of materials in civil engineering vol.18, n.º 1, pp. 1-10.
- Green, D. W., Gorman, T. M., Evans, J. W., Murphy, J. F. e Hatfield, C. A. (2008), "Grading and properties of small-diameter Douglas-fir and ponderosa pine tapered logs." Forest Products Journal, vol.58, n.º 11, pp. 33-41.
- Guimarães, R. C. e Cabral, J. A. S.(1997), "Estatística," McGraw-Hill. Porto.
- Hahn, G. J. e Shapiro, S. S.(1967), "Statistical models in engineering," John Wiley & Sons. New York.
- Halabe, U. B., Agrawal, S. e Gopalakrishnan, B. (2009), "Nondestructive evaluation of wooden logs using ground penetrating radar." Nondestructive Testing and Evaluation, vol.24, n.º 4, pp. 329-346.
- Hamm, J. e Schnuriger, M. (2002), "Longitudinal connection of timber components with circular cross section." WCTE 2002, Malásia.
- Hanhijarvi, A., Ranta-Maunus, A. e Turk, G. (2005). "The structural application of thin roundwood poles in building." Report of the Combigrade - Project phase 1.
- Heikkila, J. (2004), "In search of urban log architecture." WCTE 2004, Finlândia.
- Hoffmeyer, P. (1987). "The role of grain angle, knots, tension wood, compression wood, and other anomalies on the mechanical properties of wood. ." Technical University of Denmark. Building Materials Laboratory.
- Houtman, R., Groot, C. J. W. P. e Ende, G. v. d. (1998), "Maximum strength of wire-laced dowel joints for roundwood." WCTE 1998, Suíça, 161-168.
- Huybers, P. (1996). "The structural application of thin roundwood poles in building." Final Report for Project FAIR-CT-95-0091, task 2A.
- IPQ (1973a). "Madeiras - Determinação do teor em água." NP 614. Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (1973b). "Madeiras - Ensaio de compressão axial." NP 618. Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (1973c). "Madeiras - Ensaio de flexão estática." NP 619. Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (1995). "Madeira de pinheiro bravo para estruturas." NP4305. Instituto Português da Qualidade.
- Isaksson, T. (1999), "Modelling the variability of bending strength in structural timber." Division of structural Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund, Doctoral Thesis.
- ISO (1975). "Bois – Détermination de la résistance à la flexion statique." ISO 3133. International Organization for Standardization.
- JCSS (2006). "JCSS Probabilistic model code Part 3: Resistance models." acedido 9 de Março, 2009, de <http://www.jcss.ethz.ch/publications/PMC/RESISTANCES/timber.pdf>.

- Jorissen, A. (2006), "Roundwood Structures." WCTE 2006, USA.
- Junior, C. C. (1996), "Timber bridges in south america." National Conference on Wood Transportation Structures, USA.
- Junior, C. C. (2004), "Emerging timber bridge program to São Paulo state." WCTE 2004, Finlândia.
- Júnior, C. C. e Brito, L. D.(2010), "Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento," LaMEM - Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira. São Paulo.
- Júnior, C. C. e Dias, A. A. (1997), "Utilização da madeira em construções rurais." Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol.1, pp. 71-77.
- Júnior, C. C., Dias, A. A., Góes, J. L. N. d., Cheung, A. B., Stamato, G. C., Pigozzo, J. C., Okimoto, F. S., Logsdon, N. B., Brazolin, S. e Lana, É. L.(2006), "Manual de projeto e construção de pontes de madeira," LaMEM - Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira. São Paulo.
- Kawamoto, S. e Williams, R. S. (2002). "Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood - based composites: a review." Research Paper FPL-GTR-134. United States Department of Agriculture.
- Kline, D. E., Woeste, F. E. e Bendtsen, B. A. (1986), "Stochastic model for modulus of elasticity of lumber." Wood and Fiber Science, vol.18, n.º 2, pp. 228-238.
- Laboratory, F. P. (2010). acessado 22 de Julho, 2010, de <http://www.fpl.fs.fed.us/>.
- Lam, F. e Varuglu, E. (1991), "Variation of tensile strength along the length of lumber - Part 1: Experimental." Wood Science and Technology, vol.25, n.º 5, pp. 351-359.
- Larson, D., Mirth, R. e Wolfe, R. (2004a), "Evaluation of small-diameter ponderosa pine logs in bending." Forest Products Journal vol.54, n.º 1 2, pp. 52-58.
- Larson, D., Wolfe, R. e Mirth, R. (2004b), "Small-diameter ponderosa pine roundwood in compression." WCTE 2004, Finlândia.
- Lee, S.-J., Kim, K.-M. e Lee, J.-J. (2006), "Improvement of the ultrasonic and X-ray CT techniques for field application." WCTE 2006, USA.
- Levan, S. (2000). "Small-diameter round timber demonstration structure." Techline - Properties and use of wood, composites, and fiber products. United States Department of Agriculture.
- Livingston, J. (2006). "Small - diameter success stories II." Research Paper FPL-GTR-168. United States Department of Agriculture.
- LNEC (1997). "Madeira para Construção: Humidade da madeira." Ficha M9. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Lukindo, A. R., Chastain, J. P. e Janni, K. A. (1997), "Techniques for making connections in small diameter timber roundwood members." Wood Design Focus, vol.8, n.º 1, pp. 14-22.
- Lukindo, A. R., Janni, K. A. e Larson, T. D. (1998a), "Reinforcement properties of a ridged plate in a bolted flitch-plate connection." American Society of Agricultural Engineers, vol.41, n.º 1, pp. 187-192.
- Lukindo, A. R., Larson, T. D. e Janni, K. A. (1998b), "Extending the yield theory to the bolted flitch-plate connection." American Society of Agricultural Engineers, vol.41, n.º 5, pp. 1483-1488.
- Machado, J. (2000), "Avaliação da variação das propriedades mecânicas de Pinho bravo (Pinus pinaster Ait.)." Instituto superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Tese de Doutoramento.
- Machado, J. e Cruz, H. (2005), "Within stem variation of Maritime Pine timber mechanical properties." Holz als Roh- Und Werkstoff, pp. 154-159.
- Machado, J. S., Sardinha, R. e Cruz, H. (1998), "Evaluation of lengthwise variation of mechanical properties by ultrasounds." WCTE 1998, Suíça, 304-311.

- Mackie, B. A. (1972), "Building with logs," Prince George, B.C.
- Maldonado, I. B., Herrero, M. E., González, G. Í., Martegui, F. A., Montesinos, D. B. e Monteagudo, J. P. (2007), "Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destrutivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad." *Informes de la Construcción*, vol.59, n.º 506, pp. 107-116.
- Malik, S. A., Al-Mattarneh, H. M. A. e Nuruddin, M. F. (2002), "Review of nondestructive testing and evaluation on timber, wood and wood product." *WCTE 2002, Malásia*, 346-353.
- Malo, K. A. e Ellingsbo, P. (2010), "Roof structure in round timber." *WCTE 2010, Itália*.
- Martins, C. (2010), "Seleção e caracterização de madeira de secção circular para postes de lenhas aéreas." Universidade de Coimbra, Tese de Mestrado.
- Mateus, T. (1961), "Bases para dimensionamento de estruturas de madeira" Memória nº179, LNEC, Lisboa
- Mello, R. I. e Melo, J. E. (2002), "Use of Eucalyptus poles for structures in the brazilian central region." *WCTE 2002, Malásia*.
- Mello, R. L. d. (2006), "Eucalyptus structural poles for medium cost houses in central Brazil." *WCTE 2006, USA*.
- Mello, R. L. d. e Melo, J. E. d. (2006), "Wood structures in the new building of CENAFLO in brasilia - Brazil." *WCTE 2006, USA*.
- Mendes, L., Silva, J., Trugilho, P. e Lima, J. (1999), "Variação da densidade da madeira de Pinus oocarpa Schiede ex Schldtl. No sentido longitudinal dos caules." *Cerne*, vol.5, n.º1, pp.
- Mill, C. (2011). acedido 20 de Julho, 2011, de <http://www.cedarmillloghomes.com>.
- Miná, A. J. S. (2005), "Estudo de estacas de madeira para fundações de pontes de madeira." Escola de Engenharia de São Carlos da, Universidade de São Paulo, São carlos, Tese de Doutorado.
- Morgado, T. (2008), "Aplicação Estrutural da Madeira de Secção Circular de Pinheiro Bravo." Universidade de Coimbra, Tese de Mestrado.
- Morgado, T., Machado, J., Dias, A., Cruz, H. e Rodrigues, J. (2010), "Grading and testing of maritime pine roundwood." *WCTE 2010, Itália*.
- Morgado, T., Rodrigues, J., Machado, J., Dias, A. e Cruz, H. (2009), "Bending and compression strength of Portuguese Maritime pine small-diameter poles." *Forest Products Journal*, vol.59, n.º 4, pp. 23-28.
- Morris, H., Batchelar, M. e Teh, K. (2008), "Full strength round timber pole connection using annular grooves." *WCTE 2006, USA*.
- Murphy, J. F. (2000), "Transverse vibration of a simply supported frustum of a right circular cone." *Journal of Testing and Evaluation*, vol.28, n.º 5, pp. 415-419.
- Natterer, J. (1998), "Tendencies in bridge construction." *WCTE 1998, Suíça*, 100 -107.
- Newlin, J. e Johnson, R. (1924). "Structural timbers. Defects and their influence on strength." Research paper R1041. USDA Forest Service.
- Nguyen, M. N., Leicester, R. H., Seath, C. A. e Foliente, G. C. (2002), "Algorithms for stress grading timber using microwave scanners." *WCTE 2002, Malásia*.
- Patzelt, M. e Olbrich, R. (1998), "Influence of knots on bending strength of small diameter roundwood as basis for a simple strength grading model." *WCTE 1998, Suíça*, 714-715.
- Pellerin, R. F., Koch, P. e Vogt, J. J. (1989), "Mechanical properties of lodgepole pine: 3-inch diameter stems." *Forest Products Journal*, vol.39, n.º4, pp. 62-66.
- Pellicane, P. J. (1983), "A sampling strategy useful in full-distribution simulation." *Wood Science and Technology*, vol.17, pp. 279-286.

- Pellicane, P. J. (1984), "Application of the  $S_b$  distribution to the simulation of correlated lumber properties data." *Wood Science and Technology*, vol.18, pp. 147-156.
- Pellicane, P. J. (1985), "Goodness-of-fit analysis for lumber data." *Wood Science and Technology*, vol.19, pp. 117-129.
- Pellicane, P. J. e Franco, N. (1994a), "Modelling wood pole failure - Part1:Finite element stress analysis." *Wood Science and Technology*, vol.28, pp. 219-228.
- Pellicane, P. J. e Franco, N. (1994b), "Modelling wood pole failure - Part2:Material and geometric considerations." *Wood Science and Technology*, vol.28, pp. 261-274.
- Pereira, R. d. S. (2009), "Aplicação estrutural da madeira de secção circular . Estruturas de contenção de terras." Universidade de Coimbra, Tese de Mestrado.
- Pham, D. T. e Alock, R. J. (1998), "Automated grading and defect detection: a review." *Forest Products Journal*, vol.48, n.º4, pp. 34-42.
- Photographersdirect (2010). acessado 20 de Julho, 2010, de <http://img2.photographersdirect.com/img/19309/wm/pd1826581.jpg>.
- Pigozzo, J. C. (2004), "Estudos e aplicações de barras de aço coladas, como conectores em placas mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes." Universidade de São Paulo, São Carlos, Tese de doutoramento.
- Pigozzo, J. C., Junior, C. C. e Lahr, F. A. R. (2004), "The first composed log-concrete deck bridge in Brazil." *WCTE 2004*, Finlândia.
- Prieto, E. H., Seco, J. I. F.-G., Barra, M. R. D. e Pérez, R. M. (2007), "Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro." *Informes de la Construcción*, vol.59, pp. 87-95.
- Ranta-Maunus, A. (1999a). "Round small-diameter timber for construction." Final report project FAIR CT 95-0091. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 383.
- Ranta-Maunus, A. (1999b), "Strength of small diameter round timber." *CIB W18*, Finlândia.
- Ranta-Maunus, A. (2006), "Bending and compression properties of small diameter round timber." *WCTE 2006*, USA.
- Riberholt, H. e Madsen, P. H. (1979). "Strength distribution of timber structures - Measured variation of the cross sectional strength of structural lumber." *Rapport R114*. Technical University of Denmark.
- Ripley, B. D.(1987), "Stochastic Simulation," Wiley. New York.
- Rodrigues, J. e Vries, P. d. (2010), "Visual and strength grading of dutch larch and portuguese maritime pine small diameter roundwood timber." *Cost E55*, Portugal.
- Rodrigues, J. M. e Sousa, E. (2009), "Programa de Acção Nacional para controlo do Nemátodo da Madeira de Pinheiro. Uma nova estratégia de Controlo." 6º Congresso Florestal Nacional Açores.
- Ross, R. J. e Pellerin, R. F. (1994). "Nondestructive testing for assessing wood members in structures." *Research Paper FPL-GTR-70*. United States Department of Agriculture.
- Ruz, G. A., Estévez, P. A. e Ramírez, P. A. (2009), "Automated visual inspection system for wood defect classification using computational intelligence techniques." *International Journal of Systems Science*, vol.40, n.º 2, pp. 163-172.
- Samson, M. (1993), "Modeling of knots in logs." *Wood Science and Technology*, vol.27, n.º6, pp. 429-437.
- Sandoz, J. L. (1991), "Form and treatment effects on conical roundwood." *Wood Science and Technology*, vol.25, pp. 203-214.
- Sandoz, J. L. e Pavillet, A. (1998), "Ultrasonic timber grading applied to forest products." *WCTE 1998*, Suíça, 818-819.
- Schafer, M. E. (2000), "Ultrasound for defect detection and grading in wood and lumber." *IEEE Ultrasonics Symposium*.

- Schreyer, A., Bathon, A. L. e Prion, H. G. L. (2000), "Determination of the capacities of a new composite timber-steel connector system." WCTE 2000, Canadá.
- Sepúlveda, P. (2001), "Measurement of spiral grain with computed tomography." *Journal of Wood Science*, vol.47, pp. 289-293.
- Sepúlveda, P., Oja, J. e Gronlund, A. (2002), "Predicting spiral grain by computed tomography of Norway spruce." *Journal of Wood Science*, vol.48, pp. 479-483.
- Shim, K. B. (2004), "The tensile properties for powder-driven-nail connections for round timber." WCTE 2004, Finlândia.
- Shim, K. B., Wolfe, R. W. e Begel, M. (2009), "Nailed Mortised-Plate Connections for Small-Diameter Round Timber." *Wood and Fiber Science*, vol.43, n.º 3, pp. 313-321.
- Silva, V. D. d.(2005), "Mechanics and strength of materials," Springer. Coimbra.
- Sluis, E. W. P., Groot, C. J. W. P. e Ende, G. v. d. (1998), "The block shear joint, a new joint for roundwood structures." WCTE 1998, Suíça, 268-276.
- Stern, E. G. (2001), "Construction with small-diameter roundwood." *Forest Products Journal*, vol.51, n.º 4, pp. 71-82.
- Stulz, R. e Mukerji, K. (1993). "Appropriate building materials." acedido 23 de Fevereiro, 2010, de <http://nzdl.sadl.uleth.ca/cgi-bin/library?e=d-00000-00---off-0hdl--00-0---0-10-0---0---0direct-10---4-----0-11--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0-0-11-1-OutfZz-8-00&a=d&cl=CL1.1&d=HASH70c81f6386a2600bdfdd3f.9.11>.
- Taras, A. R. e Iordanescu, M. (1998), "NDE of wood utility poles integrating results of gamma densitometrie and of visual inspection." WCTE 1998, Suíça, 626-633.
- Tsai, M.-J., Lin, C.-J., Kao, Y.-C., Lin, T.-T., Lin, L.-D. e Wang, Y.-N. (2008), "Application of an ultrasonic tomographic technique for detecting defects in standing trees." WCTE 2008, Japão.
- Tsai, P.-H., Chen, C.-J., Hsu, M.-F. e Yeh, Y.-H. (2004), "Estimation of modulus of wooden components by using non-destructive testing strategy." WCTE 2004, Finlândia.
- Tseng, Y.-J. e Hsu, M.-F. (2004a), "Application of drill resistance method on evaluating the compressive strength of wooden components." WCTE 2004, Finlândia.
- Tseng, Y.-J. e Hsu, M.-F. (2004b), "Evaluating the mechanical properties of wooden components using drill resistance method." WCTE 2004, Finlândia.
- USDA (1999), *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Wood handbook : wood as an engineering material, Forest Products Laboratory, Madison, pp. 4.1-4.45.
- Vale, C. M., Lima, J. T. e Carrasco, E. V. M. (2011), "Comportamento ao arrancamento de pinos metálicos embutidos e colados em peças de madeira roliça de pequeno diâmetro." CIMAD 11, Portugal.
- Verde, E. (2010). acedido 20 de Julho, 2010, de [www.engenhariaverde.blogspot.com](http://www.engenhariaverde.blogspot.com).
- Vestol, G. I. e Hoibo, O. (2007), "Bending strength and modulus of elasticity of *Pinus sylvestris* round timber from southern Norway." *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol.25, n.º 12, pp. 185-195.
- Vries, d. P. A. (1998a). "Quality and strength characterization of small diameter Larch." Report C4-08-01. Delft University.
- Vries, d. P. A. (1998b). "Strength grading of small-diameter Larch." Report C4-98-02. Delft University of Technology.
- Vries, d. P. A. e Gard, W. (1998). "The development of a strength grading system for small diameter roundwood." Heron.
- Vries, d. P. A. e Gard, W. F. (2006a), "Small diameter round wood observation tower." WCTE 2006, USA.
- Vries, d. P. A. (2009), "Strength class determination of cloeziana ound wood poles." Cost Action E53 Portugal.
- Vries, d. P. A. e Gard, W. F. (2006b), "Development of a strength grading system of small diameter round wood." WCTE 2006, USA.

- Walford, B. e Reelick, J. (2006), "Structural possibilities using poles of uniform diameter." WCTE 2006, USA.
- Wang, X. (2006), "Effects of size and moisture on stress wave e-rating of structural lumber." WCTE 2006, USA.
- Wang, X., Ross, R. J., MacClellan, M., Barbour, R. J., Erickson, J. R., Forsman, J. W. e McGinnis, G. D. (2001a), "Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method." *Wood and Fiber Science*, vol.33, n.º 4, pp. 522-533.
- Wang, X., Ross, R. J., Mattson, J. A., Erickson, J. R., Forsman, J. W., Geske, E. A. e Wehr, M. A. (2001b). "Several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs." Research paper FPL-RP-600. USDA Forest Service.
- Wegener, G. e Zimmer, B. (1998), "The ecological benefits of increased timber utilization." WCTE 1998, Suíça, 656 - 663.
- Wikipedia (2010). "Goethe tower." acessado 20 de Julho, 2010, de [http://en.wikipedia.org/wiki/Goethe\\_Tower](http://en.wikipedia.org/wiki/Goethe_Tower).
- Winn, M. F., Wynne, R. H. e Araman, P. A. (2004), "ALOG: A spreadsheet-based program for generating artificial logs." *Forest Products Journal*, vol.54, n.º 1, pp. 62-66.
- Winter, W. (1998), "Economical and ecological aspects of multistory timber buildings in Europe." WCTE 1998, Suíça, 664 - 668.
- Wolfe, R. (2000), "Research Challenges for Structural use of small-diameter round timbers." *Forest Products Journal*, vol.50, n.º 2, pp. 21-29.
- Wolfe, R. e Moseley, C. (2000), "Small-diameter log evaluation for valued added structural applications." *Forest Products Journal*, vol.50, n.º 10, pp. 48-58.
- Wolfe, R. W., Gjinolli, A. E. e King, J. R. (2000a), "Space-frame connection for small-diameter round timber." WCTE 2000, Canadá.
- Wolfe, R. W., King, J. R. e Gjonolli, A. (2000b). "Dowel-Nut connection in douglas-fir peeler cores." Research Paper FPL-RP-586. United States Department of Agriculture.
- Wolfe, R. W. e Hernandez, R. (1999), "Trussed assemblies from small-diameter round timbers." Pacific timber engineering conference, Nova Zelândia.
- Wolfe, R. W. e Murphy, J. (2005), "Strength of small-diameter round and tapered bending members." *Forest Products Journal*, vol.55, n.º 3, pp. 50-55.
- Wolfe, R. W., Shim, K. B. e Begel, M. (2003), "Powder-Driven-Nail Connections for Round Timber." IAWPS2003, Coreia.
- Xerez, A. C.(1959), "Topografia Geral Vol. I," Técnica. Lisboa.
- Xu, P. (2002), "Estimating the influence of knots on local longitudinal stiffness in radiata pine structural timber." *Wood Science and Technology*, vol.36, n.º 6, pp. 501-509.
- Yeates, A. (1999). "Use of plantation hardwood thinnings as roundwood in construction " Gottstein fellowship report.
- Yeh, M.-c. e Lin, Y.-l. (2007), "Use of small thinning logs in a round-wood trussed bridge." *Forest Products Journal*, vol.57, n.º 3, pp. 34-38.
- Zangiácomo, A. L. (2007), "Estudo de elementos estruturais roliços de madeira." Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Tese de Doutorado.





## CARACTERÍSTICAS VISUAIS DAS AMOSTRAS DE TOROS

Amostra	Toro	$d_{nom}$ (mm)	Fio torcido (cm/m)	Adelgaçamento (mm/m)	Ovalidade (%)
Centro	1	103	5	3,33	11,4
Centro	2	108	4	2,68	9,5
Centro	3	116	4	6,08	5,1
Centro	4	121	7	2,91	4,9
Centro	5	125	4	9,55	7,8
Centro	6	114	5	5,00	6,3
Centro	7	114	4	6,02	6,4
Centro	8	121	13	6,11	9,2
Centro	9	129	8	2,93	3,7
Centro	10	110	9	6,53	6,4
Centro	11	115	2	6,10	9,5
Centro	12	133	4	10,04	5,8
Centro	13	126	11	2,01	3,7
Centro	14	118	5	5,98	8,4
Centro	15	143	3	9,87	4,6
Centro	16	141	4	10,36	4,0
Centro	17	127	6	4,05	2,5
Centro	18	122	5	3,81	4,4
Centro	19	146	7	8,20	4,7
Centro	20	130	7	2,63	8,2
Centro	21	138	5	3,54	4,7
Centro	22	143	5	7,88	6,4
Centro	23	137	7	6,61	9,0
Centro	24	121	6	3,31	4,8
Centro	25	104	13	3,78	6,7
Centro	26	110	10	5,13	6,1
Centro	27	115	3	4,33	9,7

Amostra	Toro	$d_{nom}$ (mm)	Fio torcido (cm/m)	Adelgaçamento (mm/m)	Ovalidade (%)
Centro	28	111	10	5,86	5,5
Centro	29	119	3	5,88	3,7
Centro	30	119	6	6,00	10,6
Centro	31	118	3	6,39	5,8
Centro	32	140	2	7,59	4,8
Centro	33	127	7	7,57	7,3
Centro	34	128	3	5,16	5,9
Centro	35	119	4	7,62	9,3
Centro	36	128	3	6,30	7,5
Centro	37	118	4	3,83	5,0
Centro	38	106	10	4,98	7,9
Centro	39	115	7	4,20	4,3
Centro	40	110	5	3,17	5,9
Centro	41	118	13	7,27	9,8
Centro	42	128	10	8,64	5,0
Centro	43	118	15	6,71	8,4
Centro	44	124	13	6,42	3,1
Centro	45	107	2	2,94	6,2
Centro	46	103	3	5,23	8,7
Centro	47	121	5	3,39	5,0
Centro	48	128	8	12,73	5,1
Centro	49	113	7	6,31	5,0
Centro	50	134	7	6,20	6,5
Centro	51	136	2	7,49	7,6
Centro	52	151	18	12,21	4,2
Centro	53	127	3	4,00	8,6
Centro	54	133	6	6,84	5,0
Centro	55	142	5	2,46	2,6
Centro	56	141	2	5,05	7,2
Centro	57	133	14	5,88	8,7
Centro	58	144	10	7,14	8,6
Centro	59	143	18	9,84	10,3
Centro	60	154	8	10,20	4,0
Centro	61	150	3	3,86	2,1
Centro	62	120	9	3,43	4,9
Centro	63	148	2	8,49	7,3
Centro	64	124	8	4,92	6,8
Centro	65	131	3	7,14	9,1
Centro	66	140	4	4,30	4,0
Centro	67	143	20	12,00	2,3
Centro	68	124	9	2,69	3,4
Centro	69	130	2	6,45	6,6

Amostra	Toro	$d_{nom}$ (mm)	Fio torcido (cm/m)	Adelgaçamento (mm/m)	Ovalidade (%)
Centro	70	142	2	3,24	5,7
Norte	71	117	14	5,75	3,2
Norte	72	114	6	7,59	10,4
Norte	73	109	6	4,09	8,3
Norte	74	112	6	7,17	12,7
Norte	75	113	4	6,10	6,4
Norte	76	126	3	8,93	4,8
Norte	77	119	6	8,27	10,0
Norte	78	114	6	4,37	6,6
Norte	79	114	11	3,11	7,4
Norte	80	125	8	10,96	3,3
Norte	81	108	3	4,46	8,1
Norte	82	119	3	3,88	7,8
Norte	83	122	3	5,10	3,6
Norte	84	120	3	5,56	12,2
Norte	85	118	5	6,18	4,6
Norte	86	116	9	6,45	9,5
Norte	87	126	3	7,06	4,5
Norte	88	122	2	6,94	2,7
Norte	89	120	2	10,78	7,5
Norte	90	114	3	4,33	4,9
Norte	91	121	5	8,43	5,4
Norte	92	125	2	6,75	7,9
Norte	93	123	8	4,51	5,5
Norte	94	116	4	5,53	4,6
Norte	95	116	13	5,31	5,2
Norte	96	136	3	11,90	5,0
Norte	97	121	13	6,37	5,7
Norte	98	116	8	4,74	4,7
Norte	99	115	8	6,08	7,9
Norte	100	116	5	6,64	9,1
Norte	101	114	3	5,42	6,0
Norte	102	110	10	6,67	8,7
Norte	103	114	6	5,16	12,7
Norte	104	120	8	5,14	3,7
Norte	105	106	2	3,33	6,2
Norte	106	113	3	5,78	8,0
Norte	107	114	6	6,72	5,5
Norte	108	113	2	6,52	9,9
Norte	109	108	6	6,81	7,3
Norte	110	120	8	5,00	4,7
Norte	111	120	9	7,23	6,0

Amostra	Toro	$d_{nom}$ (mm)	Fio torcido (cm/m)	Adelgaçamento (mm/m)	Ovalidade (%)
Norte	112	114	8	5,86	10,1
Norte	113	112	10	5,31	5,1
Norte	114	125	7	12,20	7,5
Norte	115	121	15	8,76	2,8
Norte	116	113	8	4,84	8,9
Norte	117	118	13	5,81	6,2
Norte	118	106	11	5,27	5,5
Norte	119	132	11	2,51	3,2
Norte	120	117	4	4,35	7,5

Amostra	Toro	$d_{nó}$ (mm)	$d_{nó}$ (%)	Taxa de crescimento (mm)	Lenho Juvenil (%)	Lenho de compressão
Centro	1	27	27,6	5,22	100	
Centro	2	14	13,7	2,56	30	
Centro	3	24	23,5	3,82	62	
Centro	4	15	13,6	3,96	54	
Centro	5	16	15,2	5,16	81	Sim
Centro	6	31	29,5	5,31	90	
Centro	7	38	37,6	3,92	65	
Centro	8	51	47,2	9,04	100	Sim
Centro	9	25	21,2	5,69	100	
Centro	10	26	27,4	2,87	51	
Centro	11	31	31,0	4,14	73	
Centro	12	35	32,7	4,09	53	
Centro	13	20	16,9	5,70	100	
Centro	14	26	24,8	5,43	91	
Centro	15	24	20,2	3,87	62	Sim
Centro	16	36	32,1	2,84	10	
Centro	17	23	20,0	4,73	64	
Centro	18	17	17,0	3,80	67	
Centro	19	32	26,7	4,60	60	
Centro	20	27	22,9	5,02	80	
Centro	21	22	17,7	4,10	51	
Centro	22	35	28,5	4,16	59	Sim
Centro	23	33	28,0	5,88	86	
Centro	24	21	19,1	3,21	34	Sim
Centro	25	19	20,2	3,78	63	Sim
Centro	26	21	21,0	3,72	79	
Centro	27	40	36,4	5,73	87	
Centro	28	14	13,9	3,62	59	Sim
Centro	29	33	32,0	5,47	100	
Centro	30	16	15,1	3,32	34	Sim

## ANEXO A – CARACTERÍSTICAS VISUAIS DAS AMOSTRAS DE TOROS

Amostra	Toro	$d_{nó}$ (mm)	$d_{nó}$ (%)	Taxa de crescimento (mm)	Lenho Juvenil (%)	Lenho de compressão
Centro	31	32	30,5	3,22	35	
Centro	32	31	26,1	5,59	100	Sim
Centro	33	19	16,8	3,81	24	
Centro	34	21	18,6	2,10	8	
Centro	35	13	12,6	2,83	36	
Centro	36	32	28,6	3,44	15	
Centro	37	17	16,0	2,89	29	Sim
Centro	38	42	43,8	6,41	100	
Centro	39	20	19,8	3,71	53	Sim
Centro	40	25	25,0	3,48	58	
Centro	41	35	33,7	7,17	100	
Centro	42	25	22,7	5,94	87	
Centro	43	36	34,0	4,20	59	
Centro	44	27	25,0	4,43	83	
Centro	45	26	25,5	3,58	64	
Centro	46	27	29,3	3,12	50	
Centro	47	18	16,7	5,40	64	Sim
Centro	48	15	14,7	5,27	90	
Centro	49	18	18,8	4,79	79	
Centro	50	14	11,4	2,98	20	
Centro	51	23	19,5	4,88	69	
Centro	52	65	59,1	7,11	100	
Centro	53	40	35,7	5,33	76	Sim
Centro	54	29	26,1	4,76	68	
Centro	55	34	25,8	4,68	75	
Centro	56	14	11,2	2,64	15	Sim
Centro	57	42	38,2	4,90	74	
Centro	58	20	15,6	3,30	9	
Centro	59	42	36,2	6,01	100	
Centro	60	90	76,3	4,54	20	
Centro	61	52	38,8	5,75	80	
Centro	62	26	24,5	5,04	92	
Centro	63	27	21,1	3,53	34	
Centro	64	20	18,2	4,81	95	
Centro	65	16	13,9	3,63	15	
Centro	66	20	16,4	4,07	19	
Centro	67	35	31,5	2,68	5	
Centro	68	25	21,7	4,67	74	
Centro	69	46	41,4	6,85	100	
Centro	70	20	14,7	3,27	23	
Norte	71	40	40,0	5,29	76	
Norte	72	40	39,6	5,01	83	

Amostra	Toro	$d_{nó}$ (mm)	$d_{nó}$ (%)	Taxa de crescimento (mm)	Lenho Juvenil (%)	Lenho de compressão
Norte	73	24	24,5	4,06	58	
Norte	74	23	23,7	5,16	57	Sim
Norte	75	28	29,2	5,35	100	
Norte	76	19	19,0	3,24	48	
Norte	77	35	35,0	6,16	100	Sim
Norte	78	22	21,6	3,63	56	
Norte	79	20	19,0	4,54	69	Sim
Norte	80	96	103,2	5,27	89	Sim
Norte	81	24	24,2	3,63	47	
Norte	82	26	23,6	4,00	67	Sim
Norte	83	45	42,9	3,72	77	
Norte	84	22	20,2	4,45	44	Sim
Norte	85	60	60,6	4,86	87	
Norte	86	55	53,9	3,91	81	
Norte	87	94	90,4	4,77	73	
Norte	88	37	35,9	5,51	100	
Norte	89	98	101,0	6,18	100	Sim
Norte	90	30	30,6	4,98	76	
Norte	91	47	47,0	5,58	100	
Norte	92	43	40,2	5,48	83	
Norte	93	15	13,3	3,93	49	
Norte	94			5,31	92	Sim
Norte	95	35	34,7	4,60	100	
Norte	96	28	26,4	5,08	72	
Norte	97	25	23,8	6,38	100	
Norte	98	24	24,0	3,60	49	
Norte	99	31	31,0	4,67	76	Sim
Norte	100	21	20,8	3,98	73	Sim
Norte	101	49	48,5	5,49	84	Sim
Norte	102	47	49,5	3,85	70	Sim
Norte	103	46	44,2	5,92	100	Sim
Norte	104	48	46,6	5,31	76	Sim
Norte	105	16	15,8	3,34	60	Sim
Norte	106	23	23,2	4,85	82	
Norte	107	15	15,2	3,77	60	Sim
Norte	108	34	34,7	5,28	89	Sim
Norte	109	30	32,3	4,01	72	Sim
Norte	110	28	27,5	6,13	100	
Norte	111	50	49,5	5,12	91	Sim
Norte	112	48	47,1	4,25	56	
Norte	113	44	44,0	4,73	65	Sim
Norte	114	21	21,0	4,65	73	

## ANEXO A – CARACTERÍSTICAS VISUAIS DAS AMOSTRAS DE TOROS

Amostra	Toro	$d_{nó}$ (mm)	$d_{nó}$ (%)	Taxa de crescimento (mm)	Lenho Juvenil (%)	Lenho de compressão
Norte	115	65	68,4	5,76	84	Sim
Norte	116	33	32,7	4,87	76	
Norte	117	67	63,8	5,19	74	
Norte	118	38	40,9	4,60	80	
Norte	119	26	21,3	5,66	86	
Norte	120	27	26,2	5,03	59	Sim





## PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS AMOSTRAS DE TOROS

Amostra	Toro	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{toro}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	w (%)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)-EN384	$f_m$ (MPa)
Centro	1	515,8	528,9	11,9	32,41	34,67	73,93
Centro	2	736,0	745,1	11,8	51,14	42,58	116,75
Centro	3	513,5	537,2	11,8	32,72	29,33	50,98
Centro	4	536,0	541,1	12,0	42,31	33,50	68,51
Centro	5	548,4	532,9	11,5	34,83	32,28	63,07
Centro	6	561,4	605,7	11,6	30,27	28,15	46,53
Centro	7	481,5	515,1	11,5	33,66	30,77	56,73
Centro	8	441,9	464,0	11,8	30,10	26,07	39,26
Centro	9	514,3	501,0	11,9	33,11	31,84	61,19
Centro	10	563,3	589,4	11,8	36,21	34,98	75,40
Centro	11	497,0	535,9	11,9	36,21	32,34	63,34
Centro	12		503,5				
Centro	13		532,3				
Centro	14	508,5	512,5	11,9	35,15	32,57	64,35
Centro	15		556,4				
Centro	16		502,2				
Centro	17	477,9	489,9	11,8	39,18	31,52	59,84
Centro	18	532,7	547,5	12,3	36,86	35,00	75,52
Centro	19		534,6				
Centro	20		537,0				
Centro	21		580,6				
Centro	22		575,6				
Centro	23		446,6				
Centro	24	558,4	567,2	11,8	36,74	35,84	79,61
Centro	25	534,7	545,6	12,3	41,94	34,57	73,48
Centro	26	511,5	537,7	12,1	41,28	32,08	62,22
Centro	27	425,5	421,4	11,8	26,08	29,13	50,20
Centro	28	606,3	576,9	11,8	46,93	35,82	79,49

Amostra	Toro	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{toro}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	w (%)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)-EN384	$f_m$ (MPa)
Centro	29	480,8	512,4	11,6	37,22	33,55	68,74
Centro	30	599,8	631,3	12,2	44,52	36,16	81,18
Centro	31	550,8	554,1	12,4	41,70	35,44	77,65
Centro	32		458,1				
Centro	33		499,4				
Centro	34	562,7	592,6	12,0	38,63	35,76	79,19
Centro	35	529,8	545,0	12,1	39,09	37,57	88,37
Centro	36		522,8				
Centro	37	565,2	583,7	12,3	38,24	35,36	77,24
Centro	38	493,2	537,2	12,2	40,53	24,44	34,01
Centro	39	567,7	571,9	12,1	41,38	36,01	80,45
Centro	40	573,4	578,9	12,4	37,89	37,41	87,53
Centro	41	507,7	529,2	12,3	34,43	28,23	46,82
Centro	42	542,7	512,0	12,1	31,01	31,90	61,43
Centro	43	514,6	543,4	12,3	33,39	30,07	53,89
Centro	44	498,9	440,9	11,6	39,64	27,47	44,07
Centro	45	497,5	486,0	12,1	29,71	34,92	75,11
Centro	46	572,1	605,9	12,0	47,93	31,49	59,70
Centro	47	505,0	518,1	12,0	37,51	32,03	61,99
Centro	48	542,9	516,0	11,7	34,61	33,05	66,48
Centro	49	533,0	555,1	12,1	37,79	34,28	72,08
Centro	50		552,4				
Centro	51		540,2				
Centro	52		467,3				
Centro	53		477,4				
Centro	54		480,7				
Centro	55		501,3				
Centro	56		687,6				
Centro	57		543,8				
Centro	58		607,7				
Centro	59		512,1				
Centro	60		527,5				
Centro	61		467,9				
Centro	62	502,4	562,6	11,9	44,61	34,48	73,05
Centro	63	589,8	550,9	12,1	39,75	36,05	80,61
Centro	64		472,8				
Centro	65		499,8				
Centro	66		556,6				
Centro	67		506,3				
Centro	68	582,5	597,1	11,8	40,80	35,66	78,70
Centro	69		407,2				
Centro	70		496,5				

Amostra	Toro	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{toro}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	w (%)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)-EN384	$f_m$ (MPa)
Norte	71	559,8	561,7	12,1	37,78	35,37	77,31
Norte	72	576,9	547,7	11,8	43,36	33,52	68,60
Norte	73	600,1	546,0	11,9	42,48	37,64	88,75
Norte	74	533,2	492,1	12,5	35,50	36,08	80,80
Norte	75		547,0				
Norte	76	547,9	492,6	12,2	40,83	38,39	92,73
Norte	77	458,0	481,6	12,9	34,83	28,66	48,43
Norte	78		511,0				
Norte	79		562,8				
Norte	80	442,8	469,5	11,9	31,79	30,02	53,68
Norte	81	603,0	606,3	12,3	47,56	40,79	106,08
Norte	82	514,7	492,1	12,3	42,01	35,52	78,02
Norte	83	505,7	534,8	12,9	37,14	34,30	72,17
Norte	84	618,3	509,3	13,0	45,60	36,04	80,57
Norte	85	499,5	493,4	12,2	38,08	31,47	59,63
Norte	86	517,6	539,3	11,6	29,44	34,97	75,35
Norte	87	478,5	485,5	11,8	34,71	32,03	62,02
Norte	88	483,5	472,9	12,2	36,32	33,13	66,84
Norte	89	490,2	524,5	12,4	31,91	29,17	50,36
Norte	90	475,2	464,8	12,4	37,92	33,28	67,51
Norte	91	421,0	438,6	11,7	28,37	27,96	45,84
Norte	92		482,0				
Norte	93		523,5				
Norte	94	476,5	497,2	12,2	38,04	32,22	62,84
Norte	95	470,0	462,9	12,1	38,01	31,36	59,17
Norte	96		493,7				
Norte	97		460,4				
Norte	98	581,1	539,4	12,3	45,48	37,05	85,71
Norte	99	527,4	550,2	12,3	49,55	32,38	63,53
Norte	100	549,0	537,0	12,9	37,68	33,89	70,31
Norte	101	506,4	493,6	12,7	37,42	33,58	68,85
Norte	102	567,7	585,5	12,7	43,02	34,60	73,62
Norte	103	429,4	466,1	12,4	29,01	29,94	53,36
Norte	104	524,4	423,1	12,8	30,97	31,51	59,80
Norte	105	607,8	603,9	12,9	46,17	40,22	102,82
Norte	106	520,2	533,1	12,1	40,22	37,23	86,61
Norte	107	548,5	565,8	12,6	39,86	31,22	58,56
Norte	108	454,3	457,4	12,6	34,55	30,63	56,15
Norte	109	554,5	571,1	11,9	34,23	38,05	90,91
Norte	110		476,9				
Norte	111	504,9	534,8	12,1	29,85	28,60	48,22
Norte	112	558,4	566,2	12,2	39,13	35,58	78,31

Amostra	Toro	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{toro}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	w (%)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)-EN384	$f_m$ (MPa)
Norte	113	535,0	533,0	12,9	36,27	35,70	78,92
Norte	114		481,4				
Norte	115	510,4	528,1	11,8	37,55	30,89	57,19
Norte	116	537,2	541,6	12,4	34,23	35,45	77,69
Norte	117	525,1	532,3	12,9	36,24	34,54	73,32
Norte	118	506,2	546,7	11,9	29,62	35,30	76,97
Norte	119		553,5				
Norte	120	609,0	592,8	12,4	43,61	36,16	81,16

Amostra	Toro	$E_{\text{local}}$ (MPa)	$E_{\text{global}}$ (MPa)	$E_{\text{din,vl}}$ (MPa)	$E_{\text{din,us}}$ (MPa)	$E_{\text{din,us}} (c/\rho_{\text{toro}})$ (MPa)	C (m/s)	f (Hz)
Centro	1	12485,8	12933,6	12351	14607,5	14971,9	5,32	1113
Centro	2	23133,3	23205,5	20275	24410,7	24690,5	5,76	1205
Centro	3	13374,9	12956,6	11961	13141,2	13735,8	5,06	1098
Centro	4	11929,9	12421,9	12156	14368,2	14503,5	5,18	1098
Centro	5	10538,8	11186,2	9656	12069,2	11698,6	4,69	1000
Centro	6	13689,2	12780,4	12597	13784,6	14845,3	4,96	1069
Centro	7	10930,9	10698,0	10876	11989,0	12794,5	4,99	956
Centro	8	9076,5	9008,4	8872	9999,6	10488,5	4,76	1025
Centro	9	13194,4	13308,2	11966	15100,3	14699,4	5,42	1137
Centro	10	13148,6	12682,4	13314	15658,1	16369,4	5,27	1108
Centro	11	11991,0	11587,2	12295	13396,0	14433,8	5,19	1166
Centro	12	13407,8	11585,8	11174		12336,9	4,95	1088
Centro	13	13994,3	13504,3	12840		15200,4	5,34	1132
Centro	14	12941,4	12719,0	10949	12495,5	12585,2	4,96	922
Centro	15	14118,3	13263,1	10175		12961,5	4,83	991
Centro	16	11220,3	12077,5	11745		14044,5	5,29	996
Centro	17	12069,0	10831,2	10883	12918,2	13229,6	5,20	1098
Centro	18	12576,5	12763,4	12021	14700,3	15127,2	5,25	1083
Centro	19	12966,1	12970,5	11818		14039,4	5,12	947
Centro	20	10612,2	9975,3	11870		13830,4	5,07	800
Centro	21	14017,2	14255,4	12845		15089,7	5,10	956
Centro	22	13955,3	13044,5	13395		15600,0	5,20	956
Centro	23	10850,9	10433,5	8700		10329,4	4,81	737
Centro	24	13824,0	14313,7	12802	15152,3	15379,2	5,21	956
Centro	25	11284,9	10954,2	11199	13766,0	14067,2	5,07	1039
Centro	26	15038,5	15175,1	12670	14845,8	15613,1	5,39	1118
Centro	27	11292,3	11744,9	9044	11038,7	10919,6	5,09	942
Centro	28	14985,6	16065,3	12974	16151,5	15349,1	5,16	1103
Centro	29	12730,4	13253,4	11727	13287,2	14135,1	5,26	1122
Centro	30	14539,2	13505,1	15739	17533,9	18477,0	5,41	1030
Centro	31	14232,4	14443,4	12771	14665,2	14781,4	5,16	1093

Amostra	Toro	$E_{local}$ (MPa)	$E_{global}$ (MPa)	$E_{din,vl}$ (MPa)	$E_{din,us}$ (MPa)	$E_{din,us} (c/\rho_{toro})$ (MPa)	$C$ (m/s)	$f$ (Hz)
Centro	32	9568,5	9449,6	8437		10014,8	4,68	991
Centro	33	13049,6	12372,9	11131		13408,0	5,18	971
Centro	34	14548,1	15001,9	13672	16444,2	17318,7	5,41	986
Centro	35	15269,8	14760,7	13407	15563,5	16016,4	5,42	1000
Centro	36	12883,3	14335,7	11812		14160,9	5,20	966
Centro	37	15051,5	14667,2	13682	15689,0	16227,0	5,27	1127
Centro	38	10718,3	12156,5	11848	12713,4	13860,7	5,08	1098
Centro	39	14144,0	14441,3	12178	16483,5	16616,1	5,39	1054
Centro	40	17281,2	17654,0	15104	17631,4	17838,3	5,54	1196
Centro	41	8803,3	9633,1	10061	11832,6	12353,0	4,83	1025
Centro	42	11700,7	12305,1	9762	12413,4	11715,4	4,78	1025
Centro	43	10546,0	10574,4	11360	12999,4	13745,8	5,03	1093
Centro	44	11069,8	12487,9	9773	13360,0	11781,5	6,34	1078
Centro	45	13082,0	14175,7	11121	13113,6	12815,5	5,13	1118
Centro	46	14234,2	14347,0	14850	16914,0	17911,7	5,44	1161
Centro	47	12503,8	12134,9	12505	13955,0	14318,9	5,26	1147
Centro	48	12462,0	12506,6	9252	11812,6	11205,9	4,66	996
Centro	49	13799,5	14741,0	12821	15673,2	16333,5	5,42	1118
Centro	50	14151,6	15008,6	12927		15078,8	5,22	1000
Centro	51	15733,7	14954,1	11774		20233,4	6,12	786
Centro	52	7464,3	7412,4	8023		8960,7	4,38	708
Centro	53	9346,0	8728,2	10395		12651,5	5,15	805
Centro	54	12890,5	12676,2	10704		12880,9	5,18	795
Centro	55	11658,3	12082,2	11305		13575,7	5,20	805
Centro	56	19810,9	19136,3	15733		18469,6	5,18	805
Centro	57	10023,6	10135,9	10613		13436,2	4,97	747
Centro	58	15064,9	12960,8	14960		17398,1	5,35	834
Centro	59	9449,4	9201,2	10174		12029,8	4,85	742
Centro	60	11209,0	10965,4	11688		13636,3	5,08	800
Centro	61	9135,1	9080,2	9590		11800,6	5,02	752
Centro	62	13621,2	14155,2	14500	14498,5	16230,9	5,37	859
Centro	63	15291,7	14745,1	12208	14663,7	13705,5	4,99	781
Centro	64	10145,1	10154,3	9911		12165,4	5,07	776
Centro	65	13808,8	13683,4	13350		14104,4	5,31	883
Centro	66	13091,9	13669,0	12607		14809,5	5,16	815
Centro	67	10671,0	9354,6	11848		13363,6	5,14	1000
Centro	68	14139,3	14061,2	14243	16890,2	17298,0	5,38	1132
Centro	69	6902,1	6855,0	7625		8973,4	4,69	722
Centro	70	11938,7	11333,5	12598		15418,2	5,57	844
Norte	71	12649,5	12474,2	12208	14701,8	14756,4	5,12	952
Norte	72	11928,7	12920,9	11109	14643,5	13888,0	5,04	903
Norte	73	12274,9	12148,2	11714	15664,6	14245,3	5,11	927

Amostra	Toro	$E_{local}$ (MPa)	$E_{global}$ (MPa)	$E_{din,vl}$ (MPa)	$E_{din,us}$ (MPa)	$E_{din,us} (c/\rho_{toro})$ (MPa)	$C$ (m/s)	$f$ (Hz)
Norte	74	14122,4	14336,7	11448	15157,2	14024,1	5,33	961
Norte	75	12499,4	12041,0	11822		14514,9	5,15	942
Norte	76	16796,8	16840,9	12584	17309,1	15579,5	5,62	1030
Norte	77	10043,1	9836,7	9893	11546,7	12198,1	5,02	917
Norte	78	13773,2	13897,1	12603		15536,0	5,51	1015
Norte	79	14697,6	13949,0	13201		16060,2	5,34	971
Norte	80	12302,7	13319,8	10011	11358,4	12040,4	5,06	913
Norte	81	13491,8	12356,3	14524	17140,8	17262,7	5,33	976
Norte	82	11427,6	11353,4	10486	12989,6	12438,1	5,02	922
Norte	83	14947,3	14912,1	11608	13239,3	14061,5	5,12	937
Norte	84	14630,5	14710,6	10757	16044,6	13282,1	5,09	1010
Norte	85	9766,9	10927,8	10266	11592,7	11463,0	4,82	908
Norte	86	12296,7	12769,0	12288	13657,4	14202,1	5,14	961
Norte	87	11743,0	11736,3	10806	13162,2	13344,6	5,24	952
Norte	88	10346,7	11250,9	10498	12783,7	12512,3	5,14	986
Norte	89	8137,6	8846,8	9109	10822,4	11604,9	4,70	839
Norte	90	9803,0	10451,3	9822	12046,9	11809,3	5,03	932
Norte	91	7834,5	8487,9	8748	9849,0	10244,3	4,84	878
Norte	92	9977,1	10934,7	10328		12338,6	5,05	942
Norte	93	13472,8	13339,2	12755		15467,4	5,43	996
Norte	94	12796,8	12702,1	10862	12669,3	13231,1	5,16	952
Norte	95	10180,9	10314,7	10280	12806,2	12620,4	5,22	952
Norte	96	11957,7	12911,9	9993		12214,2	4,97	922
Norte	97	7864,0	7923,3	8668		10891,2	4,86	859
Norte	98	14013,3	14198,6	13633	17689,5	16444,7	5,52	1025
Norte	99	10238,7	10130,9	13486	12990,3	13568,0	4,96	996
Norte	100	12284,3	11100,8	11678	15348,9	15083,3	5,29	937
Norte	101	10144,9	9536,8	11017	13260,6	12974,4	5,12	971
Norte	102	12469,2	13059,1	13399	15058,8	15585,4	5,15	961
Norte	103	11176,5	11539,7	9409	9647,9	10493,2	4,74	917
Norte	104	12463,0	12696,5	8560	12845,1	10404,7	4,95	917
Norte	105	18448,4	20709,9	15464	18603,9	18566,1	5,53	1025
Norte	106	13094,4	14595,7	12467	14622,9	14995,3	5,30	991
Norte	107	11500,3	12303,4	12423	14659,3	15168,5	5,17	947
Norte	108	9078,8	10633,1	9735	10726,7	10829,7	4,86	937
Norte	109	15079,3	13511,5	12641	15358,8	15807,8	5,26	947
Norte	110	9529,4	9643,1	10579		11558,7	4,92	932
Norte	111	12498,6	12151,9	11721	12956,6	13730,9	5,07	937
Norte	112	12477,5	13181,6	12975	15930,9	16167,0	5,34	961
Norte	113	9014,9	8048,1	10512	14208,2	14221,2	5,15	942
Norte	114	13005,1	14048,0	9651		11793,3	4,94	903
Norte	115	8931,5	7974,9	10517	11882,4	12282,4	4,82	913

## ANEXO B – PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS AMOSTRAS DE TOROS

Amostra	Toro	$E_{\text{local}}$ (MPa)	$E_{\text{global}}$ (MPa)	$E_{\text{din,vl}}$ (MPa)	$E_{\text{din,us}}$ (MPa)	$E_{\text{din,us}} (c/\rho_{\text{toro}})$ (MPa)	$C$ (m/s)	$f$ (Hz)
Norte	116	11818,0	11981,5	12137	14235,9	14383,4	5,15	942
Norte	117	8802,6	9473,8	11325	13546,8	13795,8	5,08	917
Norte	118	12397,6	12719,1	13062	14883,8	16062,9	5,42	981
Norte	119	13077,4	14691,0	13104		15569,0	5,30	1049
Norte	120	13407,8	13725,6	12773	17008,0	16586,6	5,28	942





# CARACTERÍSTICAS DOS TOROS TORNEADOS

Amostra	Toro	$d_{nom}$ (mm)	Taxa de crescimento (mm)	Amostra	Toro	$d_{nom}$ (mm)	Taxa de crescimento (mm)
Centro	12	99	4,50	Centro	58	119	2,83
Centro	13	99	6,60	Centro	59	99	7,07
Centro	15	99	5,21	Centro	60	120	4,80
Centro	16	99	3,30	Centro	61	120	6,32
Centro	19	99	5,21	Centro	64	100	5,88
Centro	20	98	5,76	Centro	65	99	3,96
Centro	21	99	4,71	Centro	66	120	4,14
Centro	22	100	5,26	Centro	67	97	2,77
Centro	23	99	6,19	Centro	69	99	7,62
Centro	32	98	7,00	Centro	70	119	3,40
Centro	33	99	4,50	Norte	75	78	5,57
Centro	36	97	3,73	Norte	78	79	4,16
Centro	50	119	3,40	Norte	79	99	4,71
Centro	51	99	5,50	Norte	92	99	5,50
Centro	52	100	7,14	Norte	93	98	4,26
Centro	53	98	5,44	Norte	96	100	5,26
Centro	54	98	5,16	Norte	97	79	7,90
Centro	55	120	6,00	Norte	110	78	6,50
Centro	56	100	3,03	Norte	114	80	5,00
Centro	57	98	5,44	Norte	119	100	5,88

Amostra	Toro	$\rho_{12}(\text{kg/m}^3)$	$\rho_{\text{toro}}(\text{kg/m}^3)$	w (%)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)-EN384	$f_m$ (MPa)
Centro	12	466,6	481,1	14,0	36,08	29,55	51,82
Centro	13	515,7	517,3	14,7	31,75	30,78	56,77
Centro	15	523,5	545,9	13,9	31,00	27,72	44,96
Centro	16	443,9	445,3	15,3	26,76	24,19	33,23
Centro	19	486,9	494,6	12,3	27,73	23,04	29,83
Centro	20	506,6	516,6	14,4	40,96	27,27	43,37
Centro	21	577,9	591,3	13,6	37,82	29,45	51,45
Centro	22	510,4	467,9	15,0	30,76	31,08	58,01
Centro	23	436,0	455,7	14,4	29,18	25,39	37,00
Centro	32	394,5	435,7	14,3	23,10	18,95	19,31
Centro	33	465,9	482,7	15,7	31,20	28,53	47,96
Centro	36	485,3	503,0	15,5	30,64	25,88	38,61
Centro	50	535,0	534,3	13,2	28,49	30,96	57,51
Centro	51	517,3	525,5	13,8	35,22	26,84	41,86
Centro	52	431,1	436,1	16,1	24,15	22,34	27,83
Centro	53	460,1	464,1	14,6	31,35	27,88	45,56
Centro	54	495,2	438,0	14,4	30,92	28,91	49,36
Centro	55	507,2	513,4	14,3	36,01	30,56	55,85
Centro	56	653,6	683,0	14,8	52,66	33,56	68,78
Centro	57	492,4	518,1	14,7	35,49	29,59	52,01
Centro	58	585,3	642,8	13,0	47,64	31,67	60,48
Centro	59	486,8	477,2	14,3	34,94	22,55	28,43
Centro	60	516,5	464,5	13,0	20,24	23,82	32,10
Centro	61	451,5	458,5	13,9	27,27	23,55	31,30
Centro	64	422,7	423,6	13,5	31,44	23,68	31,68
Centro	65	515,3	509,0	13,4	30,07	24,97	35,66
Centro	66	584,2	583,7	16,1	40,49	29,11	50,15
Centro	67	465,6	507,7	13,9	29,48	24,81	35,15
Centro	69	355,5	371,4	15,6	27,51	23,21	30,30
Centro	70	497,2	509,8	15,8	30,71	27,05	42,61
Norte	75	493,2	515,6	14,7	26,32	31,72	60,70
Norte	78	480,2	477,7	14,8	39,16	31,31	58,96
Norte	79	553,9	557,9	14,7	41,56	31,81	61,05
Norte	92	452,4	445,5	16,0	32,63	24,43	33,95
Norte	93	496,3	509,0	14,2	41,26	31,41	59,38
Norte	96	521,1	521,4	13,7	41,30	29,89	53,17
Norte	97	438,5	433,7	13,6	28,71	27,67	44,78
Norte	110	456,2	451,6	13,9	26,10	29,93	53,31
Norte	114	520,2	517,9	13,8	34,87	31,19	58,45
Norte	119	504,1	507,5	14,1	42,79	26,64	41,16

## ANEXO C – CARACTERÍSTICAS DOS TOROS TORNEADOS

Amostra	Toro	$E_{local}$ (MPa)	$E_{global}$ (MPa)	$E_{din,vl}$ (MPa)	$E_{din,us}$ (MPa)	$E_{din,us}$ (c/ $\rho_{toro}$ ) (MPa)	C (m/s)	f (Hz)
Centro	12	14491,2	13044,4	9099	10255,7	10667,9	4,69	1000
Centro	13	13797,6	12743,9	11469	13454,3	13693,6	5,11	1077
Centro	15	12045,6	13207,7	9000	10112,5	10658,3	4,40	937
Centro	16	12503,4	13550,3	8768	9803,5	11066,6	4,70	858
Centro	19	9147,4	10813,3	9612	10726,0	11061,5	4,69	847
Centro	20	11098,6	10548,3	10579	12011,7	12391,1	4,87	848
Centro	21	11549,4	12534,0	11788	13965,1	14397,6	4,92	904
Centro	22	11356,6	12842,6	11051	15001,2	13935,5	5,42	859
Centro	23	12589,0	12298,7	8098	9682,1	10307,5	4,71	794
Centro	32	8450,6	7996,7	6276	6861,8	7703,7	4,17	871
Centro	33	11927,6	11586,4	9425	11093,6	11684,6	4,88	899
Centro	36	11107,9	10311,6	10053	11849,1	12448,4	4,94	904
Centro	50	13519,3	13179,7	10826	13571,2	13912,3	5,04	917
Centro	51	10585,1	12070,0	9918	11900,6	12197,6	4,80	828
Centro	52	6701,6	6833,9	6303	7914,3	8150,3	4,28	688
Centro	53	11774,1	9941,2	9428	11162,4	11389,1	4,93	900
Centro	54	13888,4	13002,7	11388	15555,7	13952,4	5,60	880
Centro	55	13710,3	12957,3	11136	13159,0	13487,2	5,09	875
Centro	56	17107,2	17181,2	14659	16240,1	17286,8	4,98	863
Centro	57	9512,3	9862,0	9001	10685,4	11421,5	4,66	799
Centro	58	16521,2	15789,7	13802	15312,7	17090,5	5,11	888
Centro	59	11114,9	9349,4	7548	9462,8	9446,4	4,41	732
Centro	60	11297,9	10450,5	9311	14720,1	15039,6	5,34	757
Centro	61	11552,3	9619,2	8955	10563,6	10824,2	4,84	811
Centro	64	10190,6	8955,0	7291	8810,0	8964,7	4,57	816
Centro	65	11945,3	12851,2	10965	13109,8	13373,0	5,04	908
Centro	66	13466,4	11918,5	11734	11496,7	12692,7	4,44	805
Centro	67	10562,1	10124,1	10142	11362,0	12547,5	4,94	917
Centro	69	7329,6	6829,8	6114	7129,0	7541,6	4,48	793
Centro	70	14054,5	12382,2	11403	12577,1	13580,5	5,03	879
Norte	75	16867,7	14702,8	10304	12545,8	13333,9	5,04	903
Norte	78	15578,8	16692,0	10937	13511,5	13668,2	5,30	972
Norte	79	14928,7	13940,6	12440	14311,9	14722,6	5,08	940
Norte	92	8850,5	9594,3	8270	10502,3	10891,3	4,82	860
Norte	93	13161,9	14191,1	11442	13193,1	13751,4	5,16	952
Norte	96	14828,1	13961,9	10575	11951,5	12143,5	4,79	913
Norte	97	12584,3	8530,7	7401	8677,8	8650,6	4,45	820
Norte	110	13592,2	14184,2	8809	10751,6	10717,5	4,85	874
Norte	114	11550,2	11488,6	9608	10940,2	10974,7	4,59	874
Norte	119	9638,4	10863,0	10618	12654,3	12878,1	5,01	980



# CARACTERÍSTICAS DA AMOSTRA DE CALIBRAÇÃO

Poste	$d_g$ (mm)	Adelgaçamento (cm/m)	Rotura (m)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)	$f_m$ (MPa)	$E_0$ (MPa)	$\rho_{base}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{topo}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$L$ (m)
1	184,0	6,4	1,64	579,8	48,9	55,8	13,0	624,8	529,6	6,34
2	227,6	8,5	1,51	611,0	33,9	50,7	10,0	740,0	587,2	6,32
3	192,6	9,4	2,92	590,5	49,9	44,1	11,4	650,6	523,4	6,36
4	198,0	8,2	2,00	504,5	39,9	51,0	11,9	550,4	503,6	6,31
5	175,0	6,1	2,81	646,2	31,6	56,7	12,4	698,3	505,8	6,32
6	210,4	7,7	1,81	593,5	43,7	46,7	9,3	588,1	534,9	6,39
7	209,0	8,0	1,65	516,7	35,6	45,1	10,0	547,2	490,4	6,34
8	198,0	10,1	2,50	592,2	27,7	45,4	9,4	630,2	494,3	6,37
9	187,8	6,6	1,70	588,6	65,9	54,7	11,7	613,2	519,3	6,41
10	208,5	5,1	2,00	637,3	72,6	60,4	14,0	681,3	567,1	6,36
11	208,5	7,2	2,63	572,0	88,1	47,4	10,2	655,7	491,0	6,41
12	198,0	6,8	1,87	616,5	69,1	58,3	12,5	695,8	487,1	6,41
13	195,4	4,2	2,15	654,5	61,1	57,8	11,8	686,7	555,8	6,36
14	186,0	8,7	2,49	656,4	68,4	49,6	11,8	852,1	522,6	6,45
15	189,1	8,2	2,63	545,5	82,5	42,5	9,8	594,5	476,9	6,42
16	192,6	5,3	2,10	474,0	105,6	46,2	10,3	590,8	412,2	6,45
17	209,1	6,4	1,95	516,8	90,8	48,2	9,8	566,8	379,3	6,44
18	191,0	8,3	1,85	457,1	115,4	44,0	10,4	504,6	322,5	6,38
19	203,4	9,5	2,25	561,0	87,9	39,7	9,9	672,1	605,0	6,32
20	186,0	5,9	2,10	642,1	77,9	57,4	12,7	717,5	552,8	6,47
21	196,0	6,8	1,58	486,7	107,1	46,8	10,6	589,2	360,5	6,35
22	196,7	9,6	2,47	462,2	115,7	48,4	10,2	570,2	296,7	6,42
23	203,7	6,5	1,55	569,8	89,0	49,4	10,0	633,2	445,7	6,42
24	200,2	5,7	1,57	498,8	101,1	47,5	9,8	585,4	360,0	6,41
25	204,4	9,2	2,15	551,9	81,0	44,2	11,3	579,1	457,5	6,36
26	201,2	7,1	1,56	532,8	75,7	43,7	9,5	547,5	358,4	6,44
27	197,7	7,5	2,16	612,6	66,5	54,0	12,1	662,7	594,2	6,43

28	190,3	6,1	1,59	536,2	80,3	46,0	10,3	583,4	561,3	6,40
29	196,7	5,3	1,79	589,2	61,4	56,2	11,5	639,4	576,4	6,34
30	191,3	6,8	2,25	519,1	62,9	46,3	9,7	596,4	529,7	6,37
31	218,7	6,1	1,96	519,6	85,5	48,7	9,1	601,4	542,3	6,40
32	202,1	8,3	2,22	575,3	60,3	48,9	10,8	657,9	592,1	6,47
33	197,0	7,0	3,66	586,6	54,7	48,7	11,0	666,7	552,5	6,35
34	188,0	4,7	1,90	621,0	46,0	65,4	12,6	705,6	622,5	6,37
35	193,5	5,7	1,94	657,9	43,3	58,5	13,6	666,7	591,2	6,38
36	200,5	6,8	2,82	538,8	61,0	44,1	9,7	620,7	500,3	6,36
37	204,4	7,7	1,84	555,5	74,8	45,9	10,2	626,3	475,6	6,39
38	183,3	9,0	1,72	602,8	54,6	46,6	12,0	659,9	507,1	6,36
39	192,6	9,3	1,57	609,5	48,6	42,3	10,3	679,3	538,5	6,38
40	205,3	3,5	1,90	615,3	43,1	55,2	10,5	688,5	520,6	6,36
41	192,9	5,9	1,53	615,2	63,1	45,9	8,8	667,2	465,7	6,38
42	184,9	5,0	1,90	557,7	36,7	53,1	12,9	611,4	487,9	6,41
43	190,0	4,7	1,66	506,4	80,0	50,8	9,1	584,8	493,1	6,37
44	183,0	7,6	1,50	516,4	74,9	41,0	10,0	614,3	532,3	6,45
45	180,0	7,9	1,63	566,5	58,4	49,3	11,2	626,0	582,4	6,35
46	181,0	3,4	1,63	675,1	49,6	68,4	15,8	698,7	630,1	6,47
47	193,2	6,5	1,94	614,0	41,3	56,5	11,2	683,1	544,0	6,37
48	209,1	8,2	2,12	610,8	45,9	50,4	10,0	668,5	564,3	6,36
49	190,3	3,8	2,65	621,6	64,5	50,5	9,5	683,0	530,8	6,38
50	204,4	4,7	2,36	580,3	49,8	51,2	11,4	649,4	563,3	6,37
51	182,4	5,7	1,70	692,5	52,4	61,8	14,2	680,2	645,5	6,37
52	189,1	5,3	1,97	597,8	65,4	49,1	10,1	672,7	516,6	6,37
53	191,3	4,9	1,90	628,1	53,8	60,6	12,6	686,6	576,3	6,40
54	198,3	7,1	1,53	542,5	78,3	41,1	9,2	608,6	527,0	6,39
55	199,9	6,2	1,83	567,9	75,6	49,1	10,5	611,7	547,9	6,37
56	180,8	5,1	1,65	650,6	50,6	61,5	12,4	662,9	586,0	6,38

# CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA LIMPA

Poste	Média dos valores das duas peças			
	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)	$f_m$ (MPa)	$E_0$ (MPa)
1	602,5	69,1	59,0	14257
2	609,8	69,1	58,8	12378
3	644,5	73,6	55,9	11721
4	422,9	118,3	51,9	11519
5	680,2	57,8	63,5	12108
6	616,0	67,5	48,2	8894
7	535,4	78,8	51,5	9183
8	608,0	68,1	53,1	8769
9	659,5	64,0	71,5	12594
10	702,5	58,2	80,9	15691
11	604,5	61,9	64,1	9406
12	620,5	65,8	63,3	11455
13	711,6	51,3	79,7	15118
14	666,3	54,7	69,1	11393
15	592,7	70,0	61,7	8859
16	563,5	72,1	57,6	10876
17	545,3	71,9	55,4	9908
18	532,4	74,7	56,0	11527
19	612,1	71,8	56,9	8951
20	686,0	63,1	69,6	12525
21	568,4	75,1	57,8	11751
22	570,4	76,4	58,5	9980
23	688,8	56,1	71,5	10598
24	483,6	99,6	53,0	10245
25	611,4	74,2	58,3	12367
26	579,1	82,0	58,4	11606
27	652,9	74,9	71,6	14126

Poste	Média dos valores das duas peças			
	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)	$f_m$ (MPa)	$E_0$ (MPa)
29	664,7	73,5	72,5	14052
30	469,7	118,3	58,1	11183
31	490,9	111,1	59,1	12147
32	622,2	86,0	66,7	11494
33	614,7	76,6	55,6	11138
34	683,0	71,4	68,5	12254
35	739,8	57,4	78,1	17468
36	529,2	91,6	51,6	8614
37	599,1	77,6	48,6	9674
38	620,8	69,6	63,5	13218
39	609,1	84,9	57,0	9340
40	658,7	71,8	59,6	11446
41	615,1	72,2	57,6	10613
42	621,1	75,0	64,5	12444
43	515,0	105,1	55,1	11231
44	511,1	99,0	56,1	8345
45	566,7	87,1	57,3	9906
46	707,0	67,4	77,5	16573
47	679,0	80,0	73,5	10403
48	641,2	66,4	58,2	9314
49	649,9	68,5	60,0	11007
50	607,3	70,0	65,0	10257
51	673,2	62,5	70,1	14783
52	550,9	90,3	54,1	11624
53	649,9	63,8	64,4	10958
54	525,4	98,9	56,7	9059
55	587,9	68,6	58,9	12428

28 531,5 105,4 58,6 10830					56 634,9 88,7 68,4 13940				
Amostra	Toro	$\rho_{peça}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	w (%)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_m$ (MPa)	$E_o$ (MPa)		
Centro	1	526,1	523	11,8	43,26	82,58	9808		
Centro	3	545,0	523	12,1	44,18	91,03	11543		
Centro	4	568,9	568	11,7	48,54	106,30	11544		
Centro	5	509,9	512	11,6	36,55	77,07	9675		
Centro	7	565,1	568	11,7	46,76	95,78	13100		
Centro	9	500,8	497	11,8	40,11	88,05	10640		
Centro	11	499,3	497	11,5	41,98	72,66	10212		
Centro	17	526,9	522	11,7	43,63	84,14	9723		
Centro	24	559,5	577	12,8	48,10	84,60	10970		
Centro	27	419,4	414	12,0	30,98	43,56	6633		
Centro	29	499,6	494	11,6	39,89	78,78	9396		
Centro	30	641,1	652	12,2	47,85	92,54	12259		
Centro	31	548,7	522	12,0	38,54	88,05	11416		
Centro	34	663,7	661	12,5	57,13	108,31	14832		
Centro	37	625,2	619	12,1	55,20	109,65	12727		
Centro	38	504,0	498	11,4	36,54	86,09	10166		
Centro	41	557,9	561	12,3	43,48	73,03	8174		
Centro	42	533,8	509	11,7	39,64	79,05	9303		
Centro	43	540,1	532	12,0	42,63	70,51	8320		
Centro	44	457,1	462	11,5	36,85	75,27	9633		
Centro	45	493,4	482	11,8	39,72	78,98	8845		
Centro	46	617,9	611	12,1	50,12	102,61	11771		
Centro	47	516,3	504	11,7	46,21	94,46	11492		
Centro	48	575,4	559	11,9	48,46	95,12	10648		
Centro	49	539,8	543	12,1	48,11	84,80	9530		
Centro	62	521,0	522	11,7	47,63	88,13	11547		
Centro	63	575,1	569	12,0	50,36	89,27	12751		
Norte	71	538,2	526	12,2	40,85	78,46	9163		
Norte	72	538,8	543	12,1	39,09	88,75	10700		
Norte	73	636,1	624	12,3	49,67	97,35	11269		
Norte	74	566,2	565	11,8	49,15	103,93	14488		
Norte	77	462,7	437	12,2	34,52	67,31	7599		
Norte	80	477,5	476	12,3	38,09	77,76	10407		
Norte	81	684,7	666	12,8	57,40	120,90	15239		
Norte	83	551,6	551	12,2	47,74	96,41	12152		
Norte	84	631,1	634	13,1	51,63	93,62	9410		
Norte	85	560,2	560	12,6	46,38	80,05	9774		
Norte	86	554,2	546	12,3	47,20	90,90	11775		
Norte	87	518,1	530	11,9	48,58	66,05	12185		
Norte	88	507,4	515	12,1	41,76	82,96	9313		
Norte	89	579,6	571	12,4	48,25	93,42	8423		



## ANEXO E – CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA LIMPA

Amostra	Toro	$\rho_{peça}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_m$ (MPa)	$E_0$ (MPa)
Norte	91	431,1	415	11,8	31,29	70,55	8199
Norte	94	481,0	482	11,7	40,44	79,33	9732
Norte	98	602,6	597	11,7	50,97	103,85	15033
Norte	99	536,1	541	12,0	46,14	88,40	12296
Norte	100	641,9	622	12,7	50,73	88,22	7185
Norte	102	654,3	657	12,3	57,81	100,99	11354
Norte	103	471,4	465	12,2	35,18	70,75	6675
Norte	104	501,5	496	11,9	39,46	69,05	7093
Norte	108	424,5	428	11,7	31,23	61,49	7955
Norte	111	497,7	492	11,6	40,18	74,17	9670
Norte	112	559,5	562	12,2	46,33	84,88	9485
Norte	113	528,0	523	11,7	43,83	83,03	7953
Norte	115	543,5	546	11,7	40,88	75,06	8832
Norte	116	547,2	545	12,1	43,28	92,58	10096
Norte	118	516,0	510	12,4	37,05	88,28	9706
Norte	120	586,8	574	12,5	49,83	95,49	9974

Amostra	Toro	$E_{din,us}$ (MPa)	$E_{din,us}$ ( $c/ \rho_{peça}$ ) (MPa)	$C$ (m/s)
Centro	1	13380	13309	5,05
Centro	3	15765	15120	5,38
Centro	4	14662	14647	5,08
Centro	5	11131	11187	4,68
Centro	7	16062	16135	5,34
Centro	9	12887	12798	5,08
Centro	11	12596	12538	5,03
Centro	17	13516	13395	5,07
Centro	24	13485	13907	4,90
Centro	27	9124	9001	4,66
Centro	29	13013	12861	5,11
Centro	30	16278	16566	5,04
Centro	31	13867	13187	5,03
Centro	34	18303	18219	5,24
Centro	37	16438	16265	5,13
Centro	38	12712	12566	5,03
Centro	41	10765	10815	4,39
Centro	42	11993	11427	4,74
Centro	43	10858	10699	4,48
Centro	44	11792	11930	5,09
Centro	45	10890	10645	4,70
Centro	46	14898	14731	4,91
Centro	47	13855	13516	5,18
Centro	48	15156	14718	5,13

Amostra	Toro	$E_{\text{din,us}}$ (MPa)	$E_{\text{din,us}}$ (c/ $\rho_{\text{peça}}$ ) (MPa)	C (m/s)
Centro	49	11858	11925	4,69
Centro	62	14490	14513	5,28
Centro	63	15353	15191	5,17
Norte	71	11635	11378	4,65
Norte	72	13501	13618	5,00
Norte	73	14644	14355	4,79
Norte	74	17768	17735	5,60
Norte	77	11917	11263	5,07
Norte	80	12369	12336	5,09
Norte	81	19803	19258	5,37
Norte	83	15228	15222	5,25
Norte	84	12964	13014	4,52
Norte	85	13452	13447	4,89
Norte	86	14910	14693	5,18
Norte	87	14269	14587	5,25
Norte	88	12230	12415	4,91
Norte	89	11578	11416	4,46
Norte	91	9945	9573	4,81
Norte	94	11056	11078	4,80
Norte	98	18172	18001	5,50
Norte	99	15577	15731	5,39
Norte	100	10618	10284	4,06
Norte	102	14935	14987	4,77
Norte	103	9097	8977	4,39
Norte	104	9537	9429	4,36
Norte	108	9498	9582	4,73
Norte	111	12742	12600	5,06
Norte	112	11973	12028	4,62
Norte	113	10648	10549	4,49
Norte	115	10995	11046	4,50
Norte	116	12719	12673	4,82
Norte	118	14101	13941	5,22
Norte	120	14695	14385	5,00

## RESULTADOS DO SIMPOLE

Poste	$f_{m,sim}$ (MPa)	$E_{0,sim}$ (MPa)	Rotura <sub>sim</sub> (m)
1	58,78	13315,0	1,96
2	59,58	11681,3	1,5
3	42,18	10936,6	4,5
4	35,17	10811,3	2,54
5	64,58	11525,6	1,5
6	39,04	8019,3	2,6
7	42,19	8135,2	4,69
8	40,26	7863,9	5,41
9	66,73	11770,0	3
10	81,25	15015,3	2
11	51,36	8490,1	4,67
12	52,70	11099,9	1,85
13	80,59	14850,8	1,5
14	62,52	11063,8	3,64
15	45,41	8537,3	1,8
16	49,86	10439,1	3,65
17	37,72	9298,8	1,96
18	40,90	10801,4	4,79
19	30,61	8289,9	3,62
20	70,95	12264,0	1,5
21	53,69	11285,6	2,74
22	39,38	9280,4	5,66
23	65,72	10260,1	2,15
24	39,35	9383,1	3,63
25	51,13	11922,1	2,51

Toro	$f_{m,sim}$ (MPa)	$E_{local,sim}$ (MPa)	$E_{global,sim}$ (MPa)
1	80,27	11123,1	11039,7
3	70,51	11376,0	11797,9
4	94,47	11517,7	11039,9
5	57,17	9450,8	10407,1
7	65,37	13041,5	13329,8
9	71,84	10474,4	9917,3
11	57,55	9632,8	10525,0
17	74,11	9718,5	9365,3
24	76,32	10905,0	10758,0
27	38,12	7563,8	7446,3
29	58,44	9400,0	8871,1
30	75,14	13685,2	13597,7
31	61,15	11276,2	11898,9
34	103,56	14815,8	15277,0
37	96,49	12684,7	12315,9
38	44,05	7458,7	9569,1
41	34,42	9098,0	8728,0
42	61,07	9122,3	9745,6
43	39,43	8384,6	8838,9
44	51,37	9152,7	9463,4
45	60,99	8844,8	9322,1
46	60,69	11771,1	12299,4
47	84,55	11336,0	10985,7
48	71,28	10602,5	11278,4
49	52,40	9356,1	9273,5

Poste	$f_{m,sim}$ (MPa)	$E_{0,sim}$ (MPa)	Rotura <sub>sim</sub> (m)
26	43,06	11088,8	3,24
27	70,34	13523,3	2,2
28	59,74	10503,4	1,5
29	73,66	13666,9	1,5
30	44,96	10477,8	4,24
31	59,90	11606,7	1,5
32	60,23	10665,9	2,21
33	37,08	10017,9	3,65
34	65,98	11844,5	2,77
35	78,24	17174,7	1,5
36	34,81	7571,8	2,4
37	41,77	9011,8	3,76
38	45,90	11925,9	2,58
39	33,74	8333,4	2,51
40	51,39	10581,2	1,92
41	57,66	9994,6	1,5
42	64,54	12173,0	1,5
43	47,71	10668,9	1,65
44	45,81	7679,4	2,04
45	47,64	9207,3	3,58
46	77,69	16198,1	1,5
47	73,57	10032,6	1,5
48	58,46	8878,8	1,5
49	57,67	10204,4	1,65
50	60,82	9871,8	2,34
51	70,27	14521,7	1,5
52	51,63	10794,3	3,22
53	64,44	10285,8	1,5
54	50,18	8414,4	3,09
55	56,95	11497,6	4,2
56	68,69	13537,0	1,5

Toro	$f_{m,sim}$ (MPa)	$E_{local,sim}$ (MPa)	$E_{global,sim}$ (MPa)
62	72,48	11547,0	10688,0
63	80,39	14083,3	13962,9
71	55,19	9095,8	8321,6
72	59,39	12173,0	11536,8
73	72,60	11155,8	11754,0
74	89,82	16297,6	16344,6
77	43,56	7598,5	7955,0
80	56,02	10340,5	9361,6
81	99,68	15237,5	16222,4
83	66,27	11349,7	10862,4
84	89,62	10675,7	10734,0
85	49,40	9772,8	8762,5
86	62,71	11509,0	12478,3
87	45,67	11830,0	11305,2
88	59,89	9312,6	8733,3
89	43,24	8416,5	7925,6
91	38,01	8198,7	8053,6
94	38,01	9732,2	9732,2
98	82,89	15027,5	14244,2
99	43,61	12079,8	12446,8
100	68,80	6981,9	7701,4
102	84,48	11226,7	11887,5
103	36,01	7297,2	7194,0
104	52,64	6678,9	6555,4
108	53,01	7915,6	8429,5
111	45,64	7880,7	9031,6
112	67,62	10374,5	10436,5
113	52,87	7643,1	8066,0
115	42,78	8804,8	7536,4
116	65,67	9511,0	10533,5
118	53,92	9105,2	9448,3
120	88,06	9941,8	10217,3

## RESULTADOS DAS LIGAÇÕES DE SISTEMA DE ANCORAGEM

Ligação	$F_{\max}$ (kN)	$K_{s,1}$ (kN/mm)	$K_{s,2}$ (kN/mm)	$v_{1,F\max}$ (mm)	$v_{2,F\max}$ (mm)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_{\text{toro}}$ (mm)	$w$ (%)
1	89,74	50,46	37,40	1,89	2,75	566,55	125,50	13,86
2	84,98	48,33	29,59	2,58	3,53	456,88	119,50	14,15
3	103,07	40,03	28,21	2,97	3,98	623,22	105,00	13,76
4	104,84	-	37,95	2,46	2,82	627,07	123,00	14,16
5	109,79	59,96	42,14	2,95	3,03	609,57	101,50	13,68
6	83,03	39,81	43,12	2,60	2,38	523,32	109,50	13,92
7	92,57	15,63	49,81	6,36	5,04	548,53	116,50	13,80
8	73,19	23,69	25,59	3,67	4,55	502,57	106,50	13,75
9	60,8	20,04	24,08	3,18	3,65	508,10	92,25	13,15
10	99,67	28,64	22,82	4,41	5,78	539,60	102,00	13,07
11	68,15	15,05	17,36	5,37	4,21	492,06	108,50	13,72
12	83,56	32,68	24,57	3,02	3,59	525,04	101,75	13,08
13	52,21	19,48	25,61	3,03	2,26	445,60	104,25	13,75
14	111,78	57,34	65,88	3,03	2,71	709,32	113,50	14,09
15	85,78	18,58	22,23	4,74	3,71	585,02	103,00	13,26
16	85,60	47,51	70,47	2,80	2,56	627,85	101,00	14,13
17	81,05	20,07	20,46	3,93	3,36	546,68	105,00	13,27
18	70,95	41,63	32,26	2,69	2,68	580,64	91,00	13,84
19	75,16	19,17	22,45	3,63	4,59	624,45	93,00	13,78
20	82,17	30,25	26,99	3,72	4,31	558,54	99,00	13,38
21	76,30	24,00	24,99	2,40	4,33	549,24	92,50	13,68
22	84,21	22,54	27,44	4,03	3,84	614,07	93,50	13,89
23	76,82	21,33	26,06	5,21	3,45	526,67	97,50	13,20
24	81,24	16,60	16,95	5,84	5,66	580,63	101,50	13,13
25	86,39	37,65	25,62	4,35	3,88	587,72	99,00	13,86
26	74,52	23,76	21,72	3,91	4,32	537,40	98,50	12,81
27	89,36	34,19	31,24	3,87	3,37	557,40	104,50	12,77
28	73,60	20,15	17,67	3,72	5,23	473,76	94,00	13,12

Ligação	$F_{max}$ (kN)	$K_{s,1}$ (kN/mm)	$K_{s,2}$ (kN/mm)	$v_{1,Fmax}$ (mm)	$v_{2,Fmax}$ (mm)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_{toro}$ (mm)	$w$ (%)
29	69,85	15,76	25,53	6,16	3,17	575,73	100,50	13,14
30	92,36	34,09	28,62	4,42	3,88	517,56	105,00	13,12
31	70,32	24,80	22,20	3,95	3,78	514,35	105,00	13,42
32	104,51	37,25	26,14	3,49	4,80	629,15	106,50	13,95
33	97,73	38,43	53,88	4,47	3,58	623,94	103,50	14,19
34	113,42	63,06	50,33	3,04	3,09	649,94	109,50	13,59
35	106,17	24,96	25,53	5,00	5,34	498,90	116,00	13,71
36	86,8	17,61	16,87	5,95	5,53	510,95	113,00	13,48
37	89,49	20,21	19,45	5,20	5,65	504,79	110,00	13,94
38	78,38	18,43	15,78	5,48	5,50	528,44	108,50	13,32
39	66,32	16,85	16,54	3,65	4,27	501,16	107,00	13,20
40	104,04	25,25	22,97	5,10	5,41	517,27	122,50	12,85
41	109,24	30,15	27,81	5,52	5,43	487,36	123,50	14,06
42	102,02	-	-	-	-	535,31	120,00	13,32
43	95,33	25,79	24,27	5,46	4,88	494,51	116,50	13,88
44	108,64	26,58	28,04	4,54	4,31	510,08	114,00	14,07
45	112,6	29,32	27,56	5,74	4,77	498,55	119,50	14,08
46	97,75	23,00	19,40	8,29	6,11	501,54	121,00	14,23
47	125,99	41,09	49,04	3,46	3,23	633,46	125,00	13,80
48	113,53	17,69	16,26	7,56	6,78	519,13	137,00	14,05
49	105,74	30,63	25,61	4,68	5,33	512,80	140,00	14,37
50	86,26	16,68	21,67	5,44	4,33	511,14	129,50	13,88
51	103,68	33,81	28,69	3,85	4,29	502,41	128,50	13,54
52	110,99	23,60	55,65	5,67	2,23	590,76	122,25	13,70
53	121,94	34,74	43,49	4,04	4,83	651,84	113,50	13,77
54	128,52	22,91	21,81	6,10	6,83	538,38	138,00	13,78
55	131,24	28,98	16,86	5,04	6,98	659,70	115,50	14,12
56	136,55	34,27	25,14	4,68	6,62	661,63	117,50	13,53
57	145,14	22,64	28,29	5,26	3,84	681,68	126,50	14,21
58	147,41	27,82	27,82	5,03	7,11	696,84	131,50	13,65

## RESULTADOS DAS LIGAÇÕES DE CHAPA CENTRAL

Ligação	$F_{\max}$ (kN)	$K_{s,1}$ (kN/mm)	$K_{s,2}$ (kN/mm)	$v_{1,F\max}$ (mm)	$v_{2,F\max}$ (mm)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_{\text{toro}}$ (mm)	$w$ (%)
1	103,28	26,36	29,16	3,97	4,68	604,78	97	13,22
2	89,80	33,91	15,62	4,02	5,26	518,34	104,5	13,76
3	122,77	40,27	29,66	4,94	5,07	577,18	98	13,48
4	91,14	29,63	27,19	4,73	4,37	516,74	95	12,57
5	110,52	23,26	35,71	6,64	4,59	543,80	109	13,82
6	85,73	18,66	42,14	6,86	2,82	539,86	96,5	12,35
7	86,49	27,69	17,56	5,14	4,89	519,27	102,5	13,55
8	117,75	37,68	25,81	5,04	5,14	581,95	103	13,8
9	96,27	34,40	29,90	4,20	4,94	522,86	103,5	13,01
10	101,05	25,19	22,93	4,95	4,96	530,93	103,5	13,72
11	108,87	27,23	26,01	5,56	6,00	537,22	110	13,76
12	70,76	19,96	20,70	4,09	4,74	430,33	98,5	13,56
13	107,53	25,81	26,64	5,93	5,09	482,25	100	13,03
14	119,08	25,70	20,20	6,50	5,58	563,87	105,5	12,44
15	129,28	32,33	44,46	7,54	4,53	628,60	107	14,04
16	124,05	34,59	35,01	4,82	2,76	614,25	111	13,64
17	120,81	41,32	24,59	5,72	5,08	605,01	101	13,75
18	93,70	26,73	25,91	4,59	4,70	522,02	107,5	13,66
19	121,99	34,13	29,65	5,68	4,55	564,81	105,5	13,75
20	121,57	40,06	43,05	6,29	5,74	608,76	112	13,05
21	129,28	32,33	44,46	4,95	5,66	635,77	111,5	14,3
22	112,55	37,56	25,43	3,70	4,92	604,95	102	14,15
23	112,75	51,30	43,55	4,51	4,91	563,72	106	13,32
24	100,47	33,57	38,39	3,40	3,13	490,70	107	13,45
25	107,23	23,07	40,38	6,98	5,29	455,24	113	13,48
26	107,64	21,26	23,72	7,02	6,55	520,46	110	13,97
27	117,39	60,39	44,52	5,16	5,52	563,08	121	13,4
28	89,89	69,12	31,86	4,01	4,26	519,74	118,5	13,22

Ligação	$F_{\max}$ (kN)	$K_{s,1}$ (kN/mm)	$K_{s,2}$ (kN/mm)	$v_{1,F\max}$ (mm)	$v_{2,F\max}$ (mm)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_{\text{toro}}$ (mm)	$w$ (%)
29	102,96	29,25	23,32	6,70	7,68	461,16	122,5	13,95
30	110,81	31,63	32,41	5,48	5,30	515,84	110	13,43
31	89,68	25,52	27,02	6,45	4,27	482,16	127,5	13,68
32	130,76	28,30	28,98	8,81	7,84	580,81	132,5	14,36
33	134,93	20,36	50,48	9,71	4,25	651,12	124	13,93
34	129,68	17,05	21,44	11,04	7,41	514,11	134,5	14,41
35	122,7	20,47	20,90	9,57	8,72	527,04	134,5	13,73
36	101,98	39,55	58,60	3,16	3,14	549,74	128,5	13,65
37	126,04	20,99	21,18	14,83	7,83	526,70	131	13,85
38	154,57	39,94	42,62	6,25	5,20	677,37	125	12,95
39	133,33	48,65	33,13	4,28	4,45	615,95	129,5	13,48
40	88,61	25,55	22,16	7,49	6,99	528,99	126	13,86
41	135,46	22,61	28,02	7,73	6,58	594,52	136	14,12
42	116,81	26,81	23,01	10,27	8,17	481,56	135	13,57
43	120,11	39,43	36,37	6,81	5,54	553,28	139	13,79
44	121,48	23,08	42,87	8,10	5,32	554,19	137,5	13,58
45	117,37	32,71	37,20	7,92	6,26	554,11	141,5	13,73
46	76,75	27,39	24,71	5,06	5,28	484,43	132,5	13,22
47	152,60	42,17	33,43	16,72	12,57	621,11	135,5	13,87



## RESULTADOS DAS LIGAÇÕES DE VARÕES COLADOS

Varão	Ligação	$F_{\max}$ (kN)	$K_{s,1}$ (kN/mm)	$K_{s,2}$ (kN/mm)	$v_{1,F\max}$ (mm)	$v_{2,F\max}$ (mm)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_{\text{toro}}$ (mm)	$w$ (%)
$\Phi 8$	1	74,24	85,29	128,64	2,12	1,03	601,16	109	13,8
$\Phi 8$	2	75,08	102,79	155,77	1,43	0,70	644,39	114,5	13,6
$\Phi 8$	3	75,27	119,70	-	1,65	0,33	534,34	106,75	13,0
$\Phi 8$	4	74,78	152,03	140,63	1,22	1,12	639,83	117,25	12,4
$\Phi 8$	5	75,571	83,35	-	2,80	0,83	468,36	99,5	14,1
$\Phi 8$	6	75,39	-	217,32	0,81	1,40	521,22	108,5	13,2
$\Phi 8$	7	73,91	-	85,91	1,22	0,93	594,65	110	13,8
$\Phi 8$	8	71,79	-	-	1,41	0,59	487,78	111,5	13,7
$\Phi 8$	9	75,08	58,73	69,39	3,71	2,53	498,55	108,5	13,6
$\Phi 8$	10	74,44	111,36	69,00	1,72	1,33	465,14	108,5	13,7
$\Phi 8$	11	73,95	66,22	51,93	3,37	2,20	493,61	103,5	13,7
$\Phi 8$	12	73,89	-	-	1,55	2,16	674,56	107,5	13,8
$\Phi 8$	13	73,49	81,05	62,96	1,55	1,49	517,70	116,5	13,0
$\Phi 8$	14	74,3	54,23	132,63	2,34	0,87	526,96	101	13,5
$\Phi 8$	15	71,47	144,16	-	2,33	0,45	640,21	118	12,6
$\Phi 8$	16	75,14	48,65	-	1,58	1,18	581,42	104	13,8
$\Phi 8$	17	74,31	-	190,50	1,02	1,35	625,68	112,25	12,3
$\Phi 8$	18	-	76,80	-	0,68	1,08	567,17	108	13,5
$\Phi 8$	19	73,53	95,61	170,45	0,81	0,84	478,35	116,25	13,8
$\Phi 8$	20	73,16	111,16	190,68	0,81	0,43	530,44	96	13,0
$\Phi 10$	1	128,55	95,60	-	2,27	5,28	661,25	131,4	13,6
$\Phi 10$	2	122,21	-	107,14	1,86	3,41	665,87	128	13,7
$\Phi 10$	3	129,94	122,03	-	3,43	1,42	609,34	123,75	13,7
$\Phi 10$	4	124,95	-	133,91	1,50	3,40	492,22	127	13,0
$\Phi 10$	5	127,69	-	85,75	4,20	2,89	491,55	122,5	12,4
$\Phi 10$	6	128,76	141,03	124,75	2,01	2,26	581,67	123,25	14,0
$\Phi 10$	7	122,45	-	94,48	2,58	3,38	503,64	139	13,8

Varão	Ligação	$F_{\max}$ (kN)	$K_{s,1}$ (kN/mm)	$K_{s,2}$ (kN/mm)	$v_{1,F\max}$ (mm)	$v_{2,F\max}$ (mm)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_{\text{toro}}$ (mm)	$w$ (%)
Φ10	8	118,68	-	-	1,40	3,05	603,24	132	13,6
Φ10	9	127,21	177,27	80,37	1,87	2,11	618,53	127,75	13,5
Φ10	10	118,48	120,74	64,67	1,78	1,91	488,93	121,5	13,8
Φ10	11	125,47	108,27	97,45	1,25	1,61	576,98	132	13,0
Φ10	12	122,3	88,06	66,68	1,48	1,59	479,64	133	12,6
Φ10	13	124,66	-	91,70	0,67	1,58	516,71	123,25	13,8
Φ10	14	120,08	110,80	71,83	1,14	1,77	496,04	129,5	13,2
Φ10	15	129,57	126,48	95,22	1,58	0,86	595,28	119,5	13,8
Φ10	16	130,97	-	124,85	0,43	0,92	607,73	136,25	13,7
Φ10	17	-	82,32	55,60	2,13	3,13	532,53	135	13,8
Φ10	18	127,76	127,01	94,52	0,89	1,85	563,65	128,25	12,3
Φ10	19	125,33	202,16	108,15	1,22	1,99	587,79	121,5	13,8
Φ10	20	130,01	105,80	111,87	1,94	2,23	646,18	119,5	13,0
Φ10	21	128,66	89,29	77,88	1,98	1,63	580,81	133,5	13,5
Φ10	22	131,36	98,16	93,54	2,17	1,58	601,84	119,75	12,6
Φ10	23	125,04	126,79	137,52	2,15	1,06	617,57	119,5	12,3
Φ10	24	129,09	186,30	195,64	2,41	0,91	589,03	120,25	13,5
Φ10	25	126,79	-	131,29	1,18	1,05	571,67	113,5	13,8
Φ10	26	126,37	95,59	148,96	2,78	1,49	591,04	124,5	13,0
Φ10	27	133,21	-	97,92	2,08	1,41	591,92	122,5	13,8
Φ10	28	129,00	110,94	86,76	1,69	1,85	579,73	116,25	13,7
Φ10	29	127,39	144,56	107,80	2,44	1,32	615,67	141	13,6
Φ10	30	124,61	163,45	123,96	1,44	1,34	471,42	141,5	13,7
Φ10	31	125,98	136,59	123,12	2,37	1,58	682,75	144,75	13,7
Φ10	32	111,92	199,06	226,85	0,96	0,52	498,39	137,5	13,8
Φ10	33	126,37	97,77	126,38	1,90	1,46	575,14	124,75	13,0
Φ10	34	122,77	178,75	168,77	2,60	1,25	591,16	116	13,5
Φ10	35	130,39	161,54	131,38	1,80	1,14	632,36	123,5	13,8
Φ10	36	129,88	102,64	120,39	3,19	1,78	652,12	139	13,6
Φ10	37	129,73	73,30	103,52	2,95	1,42	577,80	129	13,0
Φ10	38	126,21	-	98,70	1,41	3,18	614,87	126,5	12,4
Φ10	39	133,31	220,65	150,72	2,31	1,32	644,87	129	14,0
Φ10	40	132,05	136,31	105,91	1,84	1,41	508,45	137,5	13,2
Φ10	41	129,77	268,28	134,14	1,39	1,51	621,40	119,5	12,1
Φ10	42	122,23	-	87,70	0,54	1,07	616,85	126,5	12,4
Φ10	43	129,29	206,84	159,84	0,73	0,85	580,55	117,5	12,3
Φ10	44	127,12	148,75	185,63	1,40	0,91	519,83	123,5	12,1
Φ10	45	127,16	-	116,07	2,22	1,48	619,35	128	12,3
Φ10	46	127,11	277,34	132,09	1,07	1,04	416,97	128,5	11,6
Φ10	47	124,90	188,07	108,02	1,35	1,40	558,43	126	12,1
Φ10	48	124,44	-	59,51	0,30	1,69	575,22	122,25	12,0
Φ10	49	124,17	58,48	113,55	2,23	1,06	447,90	127,5	12,0
Φ10	50	126,27	249,39	183,96	0,83	0,89	585,17	114,75	11,7

## ANEXO I – RESULTADOS DAS LIGAÇÕES DE VARÕES COLADOS

Varão	Ligação	$F_{\max}$ (kN)	$K_{s,1}$ (kN/mm)	$K_{s,2}$ (kN/mm)	$v_{1,F\max}$ (mm)	$v_{2,F\max}$ (mm)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_{\text{toro}}$ (mm)	$w$ (%)
$\Phi 12$	1	155,43	218,64	104,05	1,87	1,69	532,00	141,5	13,8
$\Phi 12$	2	157,59	158,67	115,17	2,12	1,48	505,98	155,5	13,0
$\Phi 12$	3	158	194,12	103,25	2,04	1,87	572,15	143	13,5
$\Phi 12$	4	156,22	233,24	158,94	1,98	1,77	667,11	140,25	13,6
$\Phi 12$	5	154,90	138,68	-	3,75	3,43	530,71	140	13,8
$\Phi 12$	6	155,15	-	162,29	2,64	2,21	556,28	159,5	12,3
$\Phi 12$	7	155,57	-	-	1,55	0,72	539,51	149	13,5
$\Phi 12$	8	154,51	301,89	170,69	0,98	1,42	534,44	149,5	13,8
$\Phi 12$	9	152,48	138,32	137,04	1,46	2,64	507,11	157	13,0
$\Phi 12$	10	158,88	192,97	-	2,13	1,21	607,76	153	13,8
$\Phi 12$	11	155,97	146,62	103,88	2,52	1,76	546,22	146	13,6
$\Phi 12$	12	151,00	176,20	221,40	3,35	1,11	598,43	173,5	13,0
$\Phi 12$	13	156,61	-	170,19	1,87	1,35	677,19	146,5	12,4
$\Phi 12$	14	155,48	199,48	112,28	3,88	2,69	599,04	162	13,9
$\Phi 12$	15	151,85	300,00	159,95	1,27	2,01	598,76	153,25	13,2