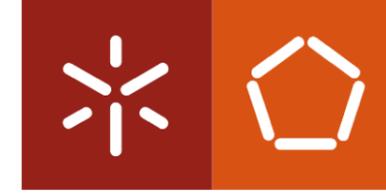




Estruturas antigas de casquinha. Avaliação do impacto do caruncho pequeno por simulação da degradação.

Daniel Aloysio Shiguematsu Menezes Freitas Lima

Uminho | 2022



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Daniel Aloysio Shiguematsu Menezes Freitas Lima

Estruturas antigas de casquinha. Avaliação do impacto do caruncho pequeno por simulação da degradação

Fevereiro de 2022



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Daniel Aloysio Shiguematsu Menezes Freitas Lima

**Estruturas antigas de casquinha. Avaliação
do impacto do caruncho pequeno por
simulação da degradação**

Dissertação de Mestrado
Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Jorge M. Branco
Doutora Lina Nunes

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Doutor Jorge M. Branco e Doutora Lina Nunes, agradeço por todo suporte, orientação, partilha de conhecimento e amizade. Agradeço, ainda, por terem me dado a oportunidade de realizar a dissertação na área das estruturas de madeira, despertando em mim o interesse por um tema com enorme potencial.

À toda equipe técnica do Laboratório de estruturas da Universidade do Minho (LEST), nas pessoas do Marco, Sr. Matos, Sr. Gonçalves, César e Luciano, por toda disponibilidade e ajuda técnica para a realização da campanha experimental, imprescindíveis para que os objetivos do trabalho fossem alcançados com sucesso.

Ao engenheiro Carlos Jesus, do Laboratório de Materiais da Universidade do Minho, pela disponibilização do equipamento e ajuda na realização dos ensaios de arrancamento.

Aos Doutores Manuel Francisco Costa Pereira e António Maurício, do IST, pela ajuda prestada na realização da micro tomografia computadorizada, bem como no tratamento e interpretação dos resultados.

Ao Doutor Leonardo Rodrigues, por todo auxílio técnico/científico e amizade.

À turma 2019/2020 do MCRS, pela partilha de conhecimento, trabalho em equipe e amizade.

À toda minha família, em especial meus pais, pelo amor incondicional, apoio irrestrito e por me proporcionarem todas as condições para me dedicar aos estudos.

À minha companheira de vida, Marina, por me proporcionar um dia-a-dia descontraído e feliz, por todo companheirismo não somente na vida pessoal, mas também profissional, e por me acompanhar e incentivar em todos os momentos desse percurso sem nunca hesitar.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação.

Muito obrigado.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Devido à sua abundância na natureza e às suas características mecânicas, físicas e de durabilidade, a madeira é um dos materiais de construção mais antigos utilizados pelo homem. Recentemente, a necessidade de reabilitar o parque edificado e a criação de novos produtos de madeira levaram a uma maior utilização da madeira impulsionada também como uma opção para fixação do carbono no âmbito de uma estratégia mais vasta de combate às alterações climáticas.

A utilização de madeira como material de construção traz consigo os desafios habituais da sua aplicação, entre eles a sua suscetibilidade à deterioração por agentes biológicos. Considerando em particular a ação dos insetos, no contexto português, destacam-se, pela sua capacidade de causarem danos graves em estruturas com conseqüente redução do seu tempo de serviço, as térmitas subterrâneas e os carunchos grandes. Os carunchos pequenos, por seu lado, representam um grande desafio, uma vez que a quantificação do seu impacto na resistência mecânica dos elementos estruturais levanta ainda muitas dúvidas. A dificuldade de avaliação do nível de degradação pode levar a muitas substituições e intervenções desnecessárias, aumentando-se os custos da reabilitação e desperdiçando tempo de vida útil das estruturas.

Neste contexto, o objetivo principal do trabalho descrito nesta dissertação foi avaliar, para uma madeira com forte tradição de aplicação no país, a casquinha, a redução da resistência de ligações típicas de carpintaria com dente simples (Perna-Linha) degradadas por caruncho pequeno. Para isso, recorreu-se à simulação do ataque do caruncho e realizou-se ensaios à compressão em 60 provetes de ligações. A partir dos ensaios à compressão, procurou-se estabelecer correlações entre o nível de degradação e a redução da resistência mecânica.

Em paralelo, recorreu-se à técnica de micro tomografia computadorizada de raios X (μ -XCT) para a determinação da percentagem de material lenhoso “consumido pelos carunchos”, como forma de avaliação da degradação. Adicionalmente, procurou-se validar a utilização do equipamento MATEST Digital pull-off tester E142-01 para a realização de ensaios de arrancamento de parafusos *in situ*, estabelecendo-se correlações entre a resistência ao arrancamento e a massa volúmica da madeira.

PALAVRAS-CHAVE

Degradação biológica; Casquinha; Caruncho pequeno; Ligações de carpintaria com dente simples; Ensaio à compressão; Micro tomografia computadorizada de raios X; Ensaio de arrancamento.

ABSTRACT

Due to its abundance in nature and its mechanical, physical, and durability characteristics, wood is one of the oldest building materials used by man. Recently, the development of new Engineered Wood products and buildings rehabilitation needs associated with the use of timber as an option for a broader strategy to combat climate change have led to greater use of wood.

The use of wood as a building material brings the usual challenges of its application, including its susceptibility to deterioration by biological agents. Considering insects infestations, in the Portuguese context, underground termites and old house borers stand out for their ability to cause damage to structures with a consequent reduction in their service life. On the other hand, common furniture beetles are a big issue, since the quantification of their impact on the mechanical strength of structural elements still raises many doubts. The difficulty in assessing the level of degradation can lead to many unnecessary replacements and interventions, increasing rehabilitation costs and reducing the structures' service life. In this context, the main objective of the research described in this dissertation was to evaluate, for a wood species with a strong tradition of application in the country (Scots pine), the reduction of resistance of traditional single step joints degraded by woodworms. For this, resorted to the artificial simulation of the beetle attack. Also, compression tests were carried out on 60 single step joint specimens. From the compression tests, attempts to establish correlations between the level of degradation and the reduction in mechanical strength were made.

In parallel, the X-ray micro-computed tomography (μ -XCT) technique was used to determine the percentage of material consumed by the woodworm, as an alternative to evaluate the degradation. Additionally, was tried to validate the use of the MATEST Digital pull-off tester E142-01 equipment to carry out in situ screw withdrawal tests, establishing correlations between pullout strength and wood density.

KEYWORDS

Biological degradation; Scots Pine; Common furniture beetle; Single Step Joint; X-ray micro-computed tomography; screw withdrawal tests.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Quadros.....	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação e enquadramento.....	2
1.2. Objetivos e metodologia.....	4
1.3. Estrutura da dissertação.....	4
1.4. Disseminação dos resultados.....	6
2. A madeira como material de construção, o caso da casquinha.....	7
2.1. Contexto histórico.....	8
2.1.1. Contexto português.....	9
2.1.2. Ligações de carpintaria com dente simples (Perna-Linha).....	11
2.2. Estrutura e crescimento da madeira.....	12
2.3. Defeitos e singularidades.....	14
2.4. Características físicas e químicas.....	20
2.5. Características mecânicas.....	24
2.6. Degradação.....	27
2.6.1. Degradação por agentes físicos e químicos.....	27
2.6.2. Degradação por agentes biológicos.....	29
2.6.2.1. Fungos.....	29
2.6.2.2. Insetos.....	32
2.6.3. Normalização aplicável à durabilidade face à ação de agentes biológicos.....	35
2.7. Casquinha.....	37
3. Caracterização da casquinha.....	40

3.1.	Considerações gerais	41
3.2.	Métodos.....	41
3.2.1.	Características e descrição dos provetes	41
3.2.2.	Inspeção visual.....	43
3.3.	Apresentação e discussão dos resultados	44
3.3.1.	Determinação do teor de água e massa volúmica.....	44
3.3.2.	Inspeção visual.....	47
3.4.	Conclusões	50
4.	Caracterização mecânica de ligações Perna-Linha deterioradas por simulação artificial de ataque de insetos	52
4.1.	Considerações gerais	53
4.2.	Métodos.....	54
4.2.1.	Simulação da degradação por caruncho pequeno	54
4.2.2.	Micro tomografia computadorizada de raios X (μ -XCT).....	56
4.2.2.1.	Seleção/Preparação das amostras	56
4.2.2.2.	Aquisição	57
4.2.2.3.	Reconstrução.....	58
4.2.2.4.	Tratamento/Análise	59
4.2.3.	Ensaio à compressão das ligações.....	61
4.2.4.	Ensaio de arrancamento perpendicular às fibras	64
4.3.	Apresentação e discussão dos resultados	66
4.3.1.	Simulação da degradação.....	66
4.3.2.	Micro tomografia computadorizada de raios X (μ -XCT).....	68
4.3.3.	Ensaio à compressão das ligações.....	71
4.3.4.	Ensaio de arrancamento perpendicular às fibras	89
4.4.	Conclusões	93
5.	Conclusões e Futuros Desenvolvimentos	95
5.1.	Considerações finais	96
5.2.	Estudos futuros	99

Referências Bibliográficas	100
Anexos	109
I. Resultados detalhados do ensaio à compressão das ligações Perna-Linha	109
II. Resultados detalhados da análise micro-XCT	126
III. Resultados detalhados do ensaio ao corte em provetes pequenos.....	127
IV. Resultados detalhados do ensaio de arrancamento perpendicular às fibras.....	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - a) Exemplos de apoios de vigas de cobertura; b) Exemplos de apoios de vigas de pavimentos.	3
Figura 1.2 - Encadeamento do programa experimental.....	6
Figura 2.1 – Técnicas construtivas recorrentes em um edifício pombalino genérico.....	9
Figura 2.2 – Palacete Ribeiro da Cunha, centro de Lisboa.....	10
Figura 2.3 – Asna simples.....	11
Figura 2.4 – Ligações tradicionais de carpintaria. (a) Ligação com dente simples; (b) Ligação com dente duplo; (c) Configuração geométrica ideal; (d) Configuração geométrica perpendicular à perna; (e) Configuração geométrica perpendicular.....	11
Figura 2.5 - Seção transversal do tronco de uma árvore e suas respectivas camadas.....	13
Figura 2.6 - Arranjo celular em uma resinosa e em uma folhosa. (a) Casquinha (<i>P. sylvestris</i>); (b) Carvalho (<i>Quercus robur</i>).....	14
Figura 2.7 - Nó exposto na superfície da madeira.....	15
Figura 2.8 - Medição dos nós e calculo do KAR total e marginal.....	16
Figura 2.9 - Fendas de secagem. (a) Vista lateral de uma viga; (b) Vista frontal.....	17
Figura 2.10 - Medição do desvio de inclinação do fio.....	18
Figura 2.11 - Medição do descaio.....	18
Figura 2.12 – Medição da taxa de crescimento.....	19
Figura 2.13 - Medição de empenos.....	20
Figura 2.14 - Direções e seções principais a serem consideradas na madeira.....	20
Figura 2.15 - Curvas de equilíbrio higrométrico.....	22
Figura 2.16 - Fatores condicionantes para a degradação biológica.....	29
Figura 2.17 - Degradação causada por fungos de podridão. (a) Podridão castanha; (b) Podridão branca.	31
Figura 2.18 - Seções transversal, radial e tangencial de um provete cúbico de casquinha.....	38
Figura 3.1 - Representação do provete de Ligação de Carpintaria de dente simples (Perna-Linha). (a) dimensões; (b) geometria.....	42
Figura 3.2 – Provete utilizado para o ensaio de arrancamento perpendicular às fibras.....	42

Figura 3.3 - Histograma da massa volúmica corrigida para um teor de água de 12% dos provetes submetidos ao ensaio à compressão.	47
Figura 3.4 - Histograma da massa volúmica corrigida para um teor de água de 12% dos provetes submetidos ao ensaio de arrancamento.	47
Figura 3.5 - Levantamento fotográfico de um dos provetes de ligação Perna-Linha.	48
Figura 3.6 - Ficheiro com as verificações da inspeção visual para um dos provetes de ligação Perna-Linha, segundo a UNE56544:2011.	49
Figura 3.7 - Defeitos detetados durante a inspeção visual. (a) Nós na região do entalhe considerados relevantes para o resultado dos ensaios. (b) Nós e fendas de secagem considerados não relevantes para os resultados dos ensaios.	50
Figura 4.1 - Zonas de simulação da degradação. (a) degradação na Perna e na Linha; (b) degradação apenas na Linha.	55
Figura 4.2 - Esquema do procedimento usual aplicado nos processos de micro tomografia computadorizada de raios-X (μ -XCT) (Parracha et al., 2021).	56
Figura 4.3 - Seleção/preparação das amostras para a μ -XCT. (a) Talão resultante do ensaio à compressão (rotura por corte paralelo às fibras do talão); (b) Local de retirada da amostra no talão; (c) Amostras extraídas do centro do talão.	57
Figura 4.4 - Visualização das imagens 2D do objeto reconstruído através do programa Data Viewer. (a) Plano coronal; (b) Plano sagital; (c) Plano transaxial.	59
Figura 4.5 - Visualização 3D do objeto reconstruído através do programa CTVox.	59
Figura 4.6 - Método de análise adotado no programa CTan para a quantificação do volume de madeira e vazios.	61
Figura 4.7 - Ensaio à compressão. (a) Aplicação da carga de compressão na perna (NRafter); (b) Esquema da distribuição dos esforços; (c) Ilustração dos possíveis modos de rotura da ligação (Verbist et al., 2017; Branco et al., 2018).	62
Figura 4.8 - Registo dos deslocamentos com recurso a LVDTs.	63
Figura 4.9 - Ensaio de arrancamento perpendicular às fibras. (a) Equipamento Fixo Lloyd LR50KPlus; (b) Equipamento móvel MATEST Digital pull-off tester E142-01.	65
Figura 4.10 - Simulação da degradação por caruncho. (a) Furos de entrada; (b) Furos de saída.	67
Figura 4.11 - Gráfico de dispersão e correlação entre a perda de massa obtida na análise μ -XCT ($ML\mu - XCT$) e a perda de massa teórica da amostra (MLt, a).	70

Figura 4.12 - Gráfico de dispersão e correlação entre a perda de massa obtida na análise μ -XCT ($ML\mu - XCT$) e a perda de massa obtida pela pesagem dos provetes de tamanho estrutural (MLg).....	70
Figura 4.13 - Gráfico de dispersão e correlação entre a perda de massa obtida na análise μ -XCT ($ML\mu - XCT$) e a perda de massa teórica calculada com base na densidade de furação (MLt, p).....	71
Figura 4.14 - Gráfico de dispersão e correlação entre perda de massa obtida pela pesagem dos provetes de tamanho estrutural (MLg) e a perda de massa teórica calculada com base na densidade de furação (MLt, p).....	71
Figura 4.15 - Linha com rotura por corte paralelo às fibras após o ensaio a compressão.	72
Figura 4.16 - Seções resistentes ao corte paralelo às fibras das Ligações Perna-Linha após a rotura. .	73
Figura 4.17 - Valores médios e desvios-padrão da resistência ao corte paralelo às fibras obtidos através do ensaio à compressão.	74
Figura 4.18 - Gráfico de dispersão dos resultados do ensaio à compressão, separado por lotes.	74
Figura 4.19 - Ensaio de caracterização da resistência ao corte paralelo às fibras em provetes pequenos, segundo a ASTM D143 (2021).	75
Figura 4.20 - Valores médios e desvios-padrão da resistência ao corte paralelo às fibras obtidos através do ensaio de caracterização em provetes pequenos.	76
Figura 4.21 - Gráfico de dispersão dos resultados do ensaio de caracterização em provetes pequenos, separado por lotes.....	76
Figura 4.22 - Gráfico de dispersão dos resultados do ensaio de caracterização em provetes pequenos e correlação com a massa volúmica.	77
Figura 4.23 - Histograma dos valores obtidos para a resistência ao corte, com sobreposição da curva de densidade com distribuição normal.....	78
Figura 4.24 - Valores médios e desvios-padrão da resistência ao corte paralelo às fibras obtidos através do ensaio à compressão. (a) Grupos SSJ_ML-I_Tb e SSJ_ML-I_Tb-R (1,67 furos/cm ²); (b) Grupos SSJ_ML-II_Tb e SSJ_ML-II_Tb-R (3,33 furos/cm ²); (c) Grupos SSJ_ML-III_Tb e SSJ_ML-III_Tb-R (4,00 furos/cm ²).	79
Figura 4.25 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal. (a) SSJ_ML-I_Tb; (b) SSJ_ML-I_Tb-R; (c) SSJ_ML-II_Tb; (d) SSJ_ML-II_Tb-R; (e) SSJ_ML-III_Tb; (f) SSJ_ML-III_Tb-R.	80
Figura 4.26 - Modos de rotura e gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal típicos do ensaio à compressão em Ligações Perna-Lina. (a) Rotura por corte paralelo às fibras na Linha. (b) Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal	

em roturas por corte paralelo às fibras; (c) Rotura por esmagamento da superfície frontal (Verbist et al., 2017); (d) Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal em roturas por esmagamento da superfície frontal (Verbist et al., 2017).	81
Figura 4.27 - Valores médios e desvios-padrão da resistência ao corte paralelo às fibras obtidos através do ensaio à compressão.	82
Figura 4.28 - Correlação obtida entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a perda de massa. ...	84
Figura 4.29 - Medição da redução da área resistente ao corte.	84
Figura 4.30 - Correlação obtida entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a redução da área resistente.	86
Figura 4.31 - Correlação obtida entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a redução da área resistente e equação de redução da resistência ao corte por redução de área resistente.	87
Figura 4.32 - Correlação obtida entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a redução da área resistente, equação de redução da resistência ao corte por redução de área resistente e resistência de projeto, segundo o Eurocódigo 5.	88
Figura 4.33 - Correlação obtida entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a massa volúmica dos provetes submetido ao ensaio à compressão.	89
Figura 4.34 - Correlação obtida entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a massa volúmica, separada por grupos de degradação.	89
Figura 4.35 - Valores médios e desvios-padrão de arrancamento perpendicular às fibras obtidos para cada grupo.	90
Figura 4.36 - Correlações obtidas entre a resistência ao arrancamento perpendicular às fibras e a massa volúmica original.	92
Figura 4.37 - Correlações obtidas entre a resistência ao arrancamento perpendicular às fibras e a massa volúmica residual.	92
Figura 4.38 - Correlações obtidas entre a resistência ao arrancamento perpendicular às fibras e a perda de massa.	92
Figura I.1 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 6 provetes do grupo de referência (SSJ_REF).	111
Figura I.2 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb.	112
Figura I.3 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb-R.	112

Figura I.4 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb.	113
Figura I.5 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb-R.	113
Figura I.6 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb.	114
Figura I.7 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb-R.	114
Figura I.8 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 6 provetes do grupo de referência (SSJ_REF).	115
Figura I.9 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb.	115
Figura I.10 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb-R.	116
Figura I.11 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb.	116
Figura I.12 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb-R.	117
Figura I.13 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb.	117
Figura I.14 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb-R.	118
Figura I.15 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 6 provetes do grupo de referência (SSJ_REF).	118
Figura I.16 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb.	119
Figura I.17 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb-R.	119
Figura I.18 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb.	120
Figura I.19 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb-R.	120

Figura I.20 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb.....	121
Figura I.21 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb-R.....	121
Figura I.22 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 6 provetes do grupo de referência (SSJ_REF).	122
Figura I.23 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb.	122
Figura I.24 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb-R.	123
Figura I.25 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb.	123
Figura I.26 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb-R.	124
Figura I.27 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb.	124
Figura I.28 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb-R.	125

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Função e parede celular dos grupos celulares que formam as madeiras resinosas e folhosas.	14
Quadro 2.2 - Classes de duração das ações.....	26
Quadro 2.3 - Classes de serviço.....	26
Quadro 2.4 - Características identificadoras dos ataques por carunchos.	35
Quadro 2.5 - Classes de risco.	37
Quadro 2.6 - Propriedades físicas da casquinha para um teor de água de 12% (Tsoumis, 1991).....	38
Quadro 2.7 - Durabilidade natural e impregnabilidade da casquinha.....	39
Quadro 2.8 - Valores característicos de resistência mecânica da casquinha de acordo com a sua classe de qualidade e respetiva classe de resistência.....	39
Quadro 3.1 - Resumo dos valores de teor de água obtidos para os provetes submetidos ao ensaio à compressão e dos provetes submetidos ao ensaio de arrancamento.	45
Quadro 3.2 - Resumo dos valores de massa volúmica dos provetes submetidos ao ensaio à compressão e dos provetes submetidos ao ensaio de arrancamento, ambos para um teor de água de 12%.....	46
Quadro 4.1 - Resumo dos parâmetros definidos para a aquisição.....	58
Quadro 4.2 - Resumo dos parâmetros definidos para a reconstrução.....	58
Quadro 4.3 - Algoritmo definido para o tratamento das imagens.....	60
Quadro 4.4 - Resumo da distribuição dos provetes nas diferentes localização e níveis da degradação para o ensaio à compressão.	64
Quadro 4.5 - Resumo da distribuição dos provetes para os diferentes níveis de degradação e equipamento usado no ensaio de arrancamento perpendicular às fibras.	66
Quadro 4.6 - Resumo da perda de massa dos provetes relativa à área degradada artificialmente.	67
Quadro 4.7 - Valores de perdas me massa.....	69
Quadro 4.8 - Valores de força máxima e resistência ao corte paralelo às fibras de cada Lote submetido ao ensaio à compressão.	73
Quadro 4.9 - Valores de resistência ao corte paralelo às fibras de cada Lote submetido ao ensaio de caracterização ao corte paralelo às fibras em provetes pequenos.	76
Quadro 4.10 - Valores de força máxima e resistência ao corte paralelo às fibras dos provetes pertencentes aos Lotes 1 e 2 submetidos ao ensaio à compressão.	77

Quadro 4.11 - Valores médios (absolutos e relativos) e desvios-padrão da resistência ao corte paralelo às fibras obtidos através do ensaio à compressão.....	79
Quadro 4.12 - Distribuição dos provetes por densidades de furação e respectivos valores e desvios-padrão de perda de massa (%), massa volúmica original (kg/m ³), massa volúmica residual (kg/m ³) e resistência ao corte paralelo às fibras (MPa).....	82
Quadro 4.13 - Resultado do Teste de Tuckey realizado com recurso ao software PAST.	83
Quadro 4.14 - Grupos e valores limites para a distribuição dos provetes por redução da área de corte.	85
Quadro 4.15 - Distribuição dos provetes por redução da área de corte e respectivos valores médios e desvios-padrão de redução da área resistente (%), massa volúmica original (kg/m ³) e resistência ao corte paralelo às fibras (MPa).	85
Quadro 4.16 - Valores de força máxima e resistência ao arrancamento perpendicular às fibras.....	90
Quadro 4.17 - Valores médios e desvios-padrão de perda de massa (%), massa volúmica original (kg/m ³), massa volúmica residual (kg/m ³) e resistência ao arrancamento perpendicular às fibras (MPa) dos grupos ensaiados no Equipamento Fixo.	91
Quadro 4.18 - Valores médios e desvios-padrão de perda de massa (%), massa volúmica original (kg/m ³), massa volúmica residual (kg/m ³) e resistência ao arrancamento perpendicular às fibras (MPa) dos grupos ensaiados no Equipamento Móvel.....	91
Quadro I.1 -Massas volúmicas (ρ_w, ρ_{12}), teores de água (w), perdas de massa (ML), redução da área resistente ao corte (AR) e resistência ao corte paralelo às fibras (τ) dos 60 provetes de ligação Perna-Linha.....	109
Quadro II.1 – Volume total, volume de madeira, volume de vazios e volume de madeira não estrutural obtidos na análise μ -XCT.	126
Quadro III.1 – Massa volúmica ($\rho_{12\%}$), força máxima obtida no ensaio (Fmax) e resistência ao corte paralelo às fibras (τ) do ensaio de caracterização ao corte dos diferentes lotes (L1, L2 e L3).....	127
Quadro IV.1 - Massas volúmicas ($\rho_w, \rho_{12,ori}$ e $\rho_{12,res}$), teores de água (w), perdas de massa (ML), forças máximas obtidas nos ensaios (Fmax) e resistências ao arrancamento perpendicular às fibras (f) dos provetes ensaiados no equipamento fixo Lloyd LR50KPlus.	132
Quadro IV.2 - Massas volúmicas ($\rho_w, \rho_{12,ori}$ e $\rho_{12,res}$), teores de água (w), perdas de massa (ML), forças máximas obtidas nos ensaios (Fmax) e resistências ao arrancamento perpendicular às fibras (f) dos provetes ensaiados no equipamento móvel MATEST Digital pull-off tester E142-01.	133

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Resumo: Atualmente, a madeira ressurge como alternativa para o setor da construção na mitigação das alterações climáticas, gerando-se uma demanda por pesquisas nesta área. A madeira tem sido usada como material de construção por vários séculos e por diferentes civilizações, com numerosos exemplos de estruturas remanescentes e em condições de uso. Nestes casos, é de extrema importância fornecer métodos e ferramentas para avaliar o nível de segurança das estruturas de madeira existentes, descrevendo e avaliando cada um de seus componentes.

Entretanto, a madeira é um material com elevada complexidade, principalmente ao se considerar a sua degradação biológica. Nesse sentido, este trabalho é proposto para a avaliação de ligações de carpintaria com dente simples (Perna-Linha) deterioradas pela ação de caruncho pequeno.

Este capítulo introdutório explica com mais detalhes a motivação, o enquadramento e o escopo da pesquisa. Além disso, para melhor compreensão da estrutura da dissertação, é apresentado um esboço e a visão geral dos capítulos do trabalho.

1.1. Motivação e enquadramento

Com a crescente consciencialização acerca do desenvolvimento sustentável, é possível observar cada vez mais esforços, em forma de incentivos a hábitos e práticas sustentáveis, com o intuito de se mitigar os danos da atividade humana no ecossistema global.

Neste contexto as Nações Unidas criaram a chamada Agenda 2030, que estabelece 17 objetivos para o Desenvolvimento Sustentável. O setor da construção possui um papel importante em diversos desses objetivos, uma vez que é um setor crucial para atingir boa qualidade de vida e contribui para o crescimento económico, mas é responsável por uma grande parcela dos impactos ambientais a nível global.

Estima-se que 40% de toda a demanda de energia, 36% das emissões de gases com efeito de estufa, 40% do consumo de matéria-prima e 33% de todos os resíduos gerados provém desse setor (Rashid & Yusoff, 2015), evidenciando o seu potencial na luta contra os fatores promotores de alterações climáticas.

A reabilitação, em comparação com a construção nova, é vista como uma forma de mitigar este impacto, a partir da redução do consumo energético dos edifícios antigos (e conseqüente redução da produção de energia), da extração de menos matérias-primas para a produção de materiais de construção e de menor volume de resíduos de demolição e construção.

No contexto português, é possível observar um grande número de edifícios antigos com grandes necessidades de reabilitação, resultante de um forte incentivo para a construção nova de edifícios de habitação nas últimas décadas do século XX (Freitas, 2012).

A madeira, como material de construção, está sujeita à degradação devido a agentes físicos, químicos e biológicos. A degradação biológica é usualmente resultante da ação de fungos de podridão ou ataque por insetos e tal fenómeno é fortemente relacionado com as condições ambientais (temperatura e humidade relativa), o teor de água e a espécie da madeira (Cruz et al., 2015).

É comum encontrar na literatura existente um limiar de 18%-30% de teor de água na madeira para que se ative o processo de degradação biológica, por exemplo em Brischke & Rapp (2008) e Zabel & Morrell (2020). Os fungos de podridão apenas conseguem colonizar a madeira se as condições forem propícias (teor de água acima de 18%-30%, presença de oxigénio e temperatura/humidade relativa do ar favoráveis). Enquanto as térmitas subterrâneas, apesar de serem capazes de infestar madeiras com teor de água relativamente baixo, preferem madeiras com teor de água acima de 20% (Cruz et al., 2015).

Adicionalmente, em relação aos insetos de madeira seca, os representantes da família Anobidae são muitas vezes associados a madeiras mais velhas e já com sintomas de ataque por fungos de podridão, ou seja, que já tiveram durante a sua vida em serviço teores de água acima de 20%-30% (Berry, 1994; Cruz & Nunes, 2012).

As vigas de madeira presentes nas coberturas e pavimentos são expostas apenas ocasionalmente a teores de água acima de 20% (EN 335, 2013). Porém, em construções antigas, esses elementos são apoiados diretamente na alvenaria (Figura 1.1) e, segundo Franzone (2018), uma das patologias mais recorrentes em alvenarias é a presença e proliferação de humidade. Essa humidade pode ser transportada para os elementos de madeira expondo as vigas encastradas a teores de água elevados por um tempo acima do estimado. É assim comum observar em construções antigas elementos de madeira que apresentam degradação biológica em estado avançado. A Figura 1.1 apresenta exemplos de vigas de madeira encastradas na alvenaria de suporte, com apoio direto entre a alvenaria e a madeira, demonstrando as práticas construtivas da época que favoreceram a degradação deste tipo de ligação com o passar dos anos.

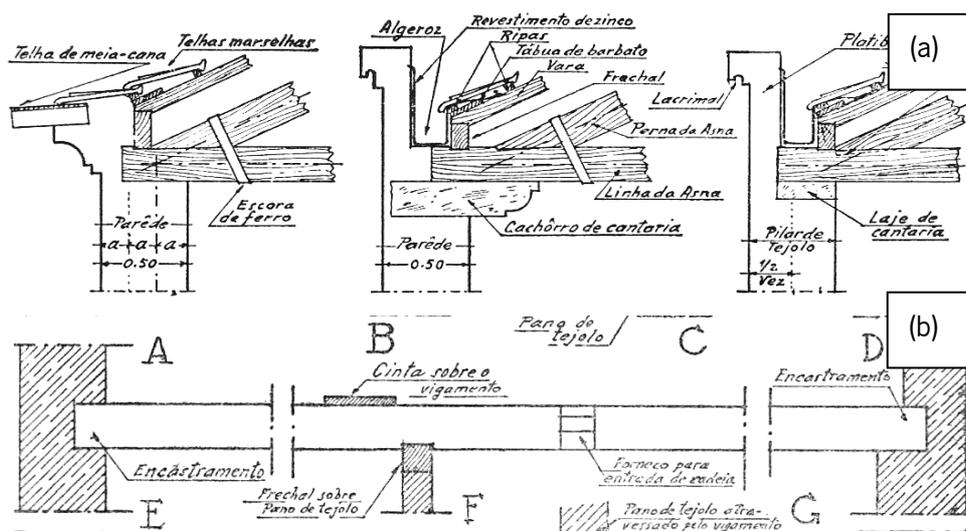


Figura 1.1 - a) Exemplos de apoios de vigas de cobertura; b) Exemplos de apoios de vigas de pavimentos. (Costa, 1930a); (Costa, 1930b)

Apesar de inúmeros exemplos de elementos de madeira nas construções que apresentaram redução significativa da vida útil devido deterioração biológica, seja por fungos ou ataque de insetos, são inúmeras as estruturas de madeira, também em Portugal, que demonstram que a madeira pode apresentar durabilidade elevada quando aplicada corretamente e com a devida manutenção.

A casquinha (*Pinus sylvestris* L.) é a conífera com maior distribuição no globo terrestre, com extensão natural que vai além do Círculo Polar Ártico, na Escandinávia, ao sul da Espanha e da região oeste da Escócia até o Mar de Okhotsk, no leste da Sibéria (Labra et al., 2006). As suas boas propriedades

mecânicas aliadas a uma grande facilidade de trabalho e sua ampla divulgação em toda a Europa, conferem à casquinha um vasto campo de aplicação, ocupando lugar cativo na reabilitação de edifícios. Entretanto, a presença frequente de nós de grandes dimensões e a sua suscetibilidade elevada aos fungos e aos insetos são inconvenientes que trazem a necessidade de especial atenção na sua aplicação (LNEC, 1997a).

Para uma reabilitação sustentável, é assim necessária a identificação de zonas com risco elevado de deterioração, proceder à correta avaliação do seu nível de degradação, bem como dos seus efeitos no comportamento da estrutura. Neste contexto, é urgente preencher as lacunas existentes na bibliografia e normas atuais acerca da deterioração biológica de estruturas de madeira em construções antigas, para que se torne possível embasar de forma mais precisa e fiável a tomada de decisão por parte dos engenheiros e arquitetos.

1.2. Objetivos e metodologia

A avaliação da segurança de estruturas é um desafio no campo da engenharia devido à extrema complexidade encontrada em diversas estruturas e, no caso particular das estruturas de madeira, o desafio torna-se ainda maior, em resultado da variabilidade das propriedades do material e a possível presença de agentes de degradação biológica (fungos e insetos).

Estabeleceu-se como objetivo principal desta dissertação a avaliação do comportamento mecânico de ligações de carpintaria com dente simples (Perna-Linha) deterioradas por ação de caruncho pequeno. Numa primeira fase, apresenta-se a revisão bibliográfica relativa à utilização e caracterização da casquinha enquanto material estrutural e à sua degradação biológica. De seguida, foi idealizada e executada uma campanha experimental destinada à quantificação da redução da resistência ao corte paralelo às fibras em ligações de carpintaria com dente simples (Perna-Linha) através da simulação artificial do ataque de caruncho pequeno.

O plano de trabalhos foi estruturado de forma a reunir toda informação relevante para a realização do estudo, identificando o conhecimento existente, os avanços recentes e as limitações, para assim, propor e realizar campanhas experimentais que contribuem para o desenvolvimento do conhecimento acerca da durabilidade de estruturas de madeira.

1.3. Estrutura da dissertação

O presente estudo encontra-se dividido em 5 capítulos. As referências bibliográficas e os anexos constituem capítulos adicionais independentes.

No primeiro capítulo (Introdução), apresenta-se a motivação e o enquadramento do tema, os objetivos definidos, o método de trabalho e a organização da dissertação.

No segundo capítulo (A madeira como material de construção, o caso da casquinha), é realizada uma revisão do estado da arte. Destaca-se a madeira como material de construção, referindo-se à sua constituição, variabilidade, caracterização comportamental e propriedades físicas, químicas, mecânicas e tecnológicas. Ainda neste capítulo, é abordada a degradação da madeira, descrevendo as famílias de carunchos existentes e a tipologia de danos causados nos elementos de madeira. Neste capítulo, o conteúdo é direcionado para a casquinha, espécie estudada neste trabalho.

No capítulo 3 (Caracterização da casquinha), procede-se à caracterização dos provetes utilizados durante a campanha experimental do presente estudo. É abordada a inspeção visual dos provetes, bem como a determinação das suas características físicas (teor de água e massa volúmica).

No capítulo 4 (Caracterização mecânica de ligações perna-linha deterioradas por simulação artificial de ataque de insetos), procede-se à avaliação da redução da resistência ao corte paralelo às fibras em ligações de carpintaria com dente simples (Perna-Linha) em resultado do ataque de caruncho pequeno. Para o efeito, recorreu-se à simulação da degradação através da realização de furos com um berbequim no sentido longitudinal das fibras de madeira. Adicionalmente, é realizada a quantificação da degradação resultante da simulação através da utilização de micro tomografia computadorizada de raios X (μ -XCT), bem como a avaliação do ensaio de arrancamento perpendicular às fibras como alternativa para a avaliação da degradação biológica *in situ*. Portanto, neste capítulo descreve-se o processo de simulação da degradação por caruncho pequeno e todos os procedimentos de ensaios. Por fim, correlacionam-se e comparam-se os resultados obtidos e conclui-se sobre estes.

No quinto e último capítulo, referente às conclusões, apresenta-se a síntese dos resultados obtidos ao longo do estudo e propõem-se possíveis desenvolvimentos futuros.

Os anexos são constituídos pelos resultados parciais relativos às campanhas experimentais realizadas nos capítulos 3 e 4, bem como toda informação adicional importante sobre procedimentos de ensaios adotados. A Figura 1.2 apresenta o encadeamento do programa experimental executado nesta dissertação.

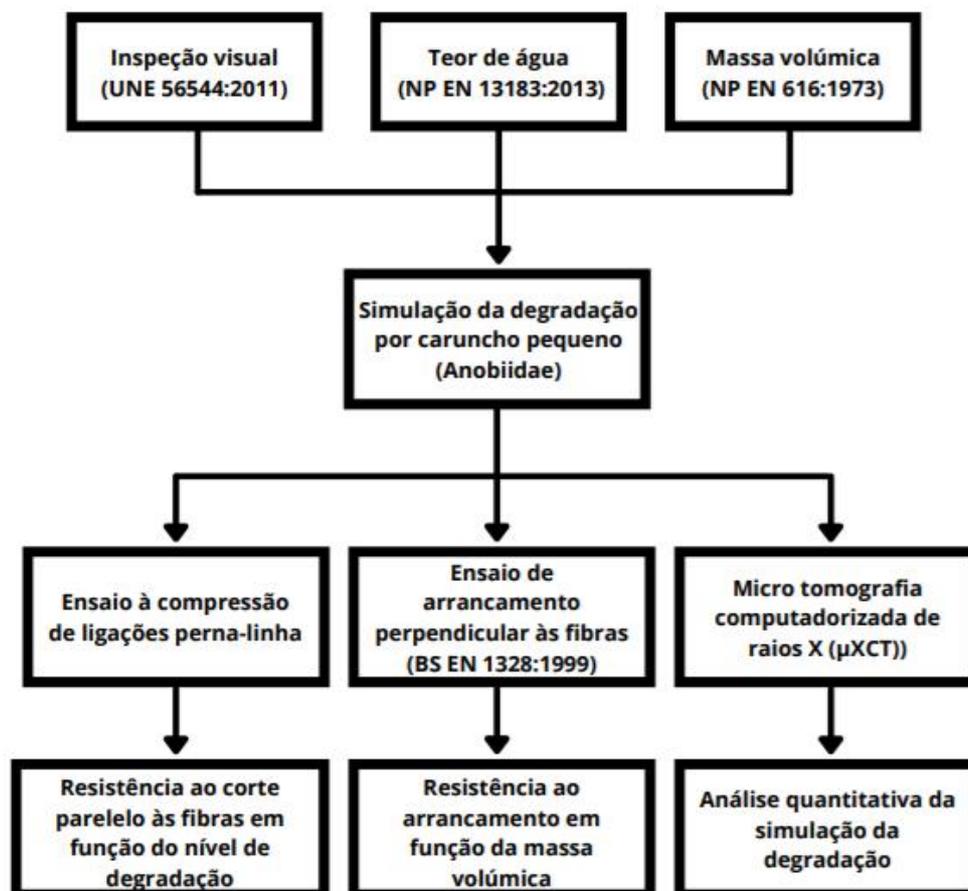


Figura 1.2 - Encadeamento do programa experimental.

1.4. Disseminação dos resultados

- Parracha, J., Pereira, M., Maurício, A., Faria, P., Lima, D. F., Tenório, M., Nunes, L. (2021) Assessment of the Density Loss in Anobiid Infested Pine Using X-ray Micro-Computed Tomography. Buildings, 11(4), 173. Doi: <https://doi.org/10.3390/buildings11040173> (Estado: Artigo publicado na revista Buildings).
- Lima, D. F., Tenório, M., Branco, J. M., Nunes, L. (2022) The wood moisture factor on the biological deterioration of wooden structures. REHABEND 2022 - Euro-American Congress on Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management. Granada, Espanha, Setembro de 2022. (Estado: Aceite).

CAPÍTULO 2

A MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO, O CASO DA CASQUINHA

Resumo: Uma melhor compreensão do desempenho da madeira como material de construção, bem como da sua durabilidade, permite uma melhor avaliação da integridade das estruturas de madeira existentes e as possíveis ações necessárias para manter sua segurança. No entanto, a grande variabilidade da madeira, quer seja entre espécies, quer seja dentro da mesma espécie, eleva o grau de complexidade da caracterização do material.

Nesse contexto, o capítulo seguinte apresenta uma descrição detalhada da utilização da casquinha como material de construção. Primeiramente, são abordados a constituição, variabilidade, caracterização comportamental e propriedades físicas, químicas, mecânicas e de durabilidade gerais da madeira. Por fim, é feito um resumo com as principais características da casquinha, espécie estudada neste trabalho.

2.1. Contexto histórico

A madeira é um material compósito natural de origem biológica proveniente de um organismo vivo, a árvore. Como material natural, é higroscópico e apresenta heterogeneidade e anisotropia elevadas, além de comportamento elástico (Cruz & Nunes, 2012).

A madeira é um dos materiais mais antigos utilizados pelo homem para os mais diversos fins. Os egípcios utilizavam-na para fabricar móveis, esculturas e caixões em 2500 AC, enquanto no império grego as estruturas das camas eram feitas de madeira (Dinwoodie, 2000). Descobertas recentes indicam para a utilização da madeira nos poços de Altscherbitz, Alemanha, há mais de 7000 anos (Woodard & Milner, 2016).

Apesar do reconhecido uso da madeira em cabanas e palafitas durante a Pré-História e em casas construídas com troncos emparelhados na Noruega e Escandinávia durante o século IV, foi na Idade Média que se estabeleceram os princípios básicos da construção em madeira na Europa. A elevada destreza dos carpinteiros no final da Idade Média e Renascimento, permitia a construção de edifícios em madeira que resistiram tanto ou mais que os construídos em alvenarias de pedras e tijolos (Lourenço & Branco, 2012). No contexto português, assim como na maioria dos países do sul da Europa, as estruturas de madeira estão presentes nas coberturas, pavimentos e, em alguns casos, também nas paredes (Hamburg et al., 2018).

Muito utilizada historicamente, o uso da madeira reduziu devido à perceção pública e a regulamentos prescritivos de segurança contra incêndios que foram introduzidos durante o século XX, o que contribuiu para a consolidação da indústria do betão e do aço (CEI-Bois, 2019). Entretanto, o desenvolvimento de novos produtos em madeira como a madeira lamelada colada, madeira lamelada cruzada colada (CLT) e a madeira microlaminada (LVL), aliado à necessidade de adaptação do mercado às alterações climáticas através da utilização de materiais com baixos níveis de emissão de carbono, impulsionaram a utilização da madeira enquanto material de construção e, em particular, em aplicações estruturais.

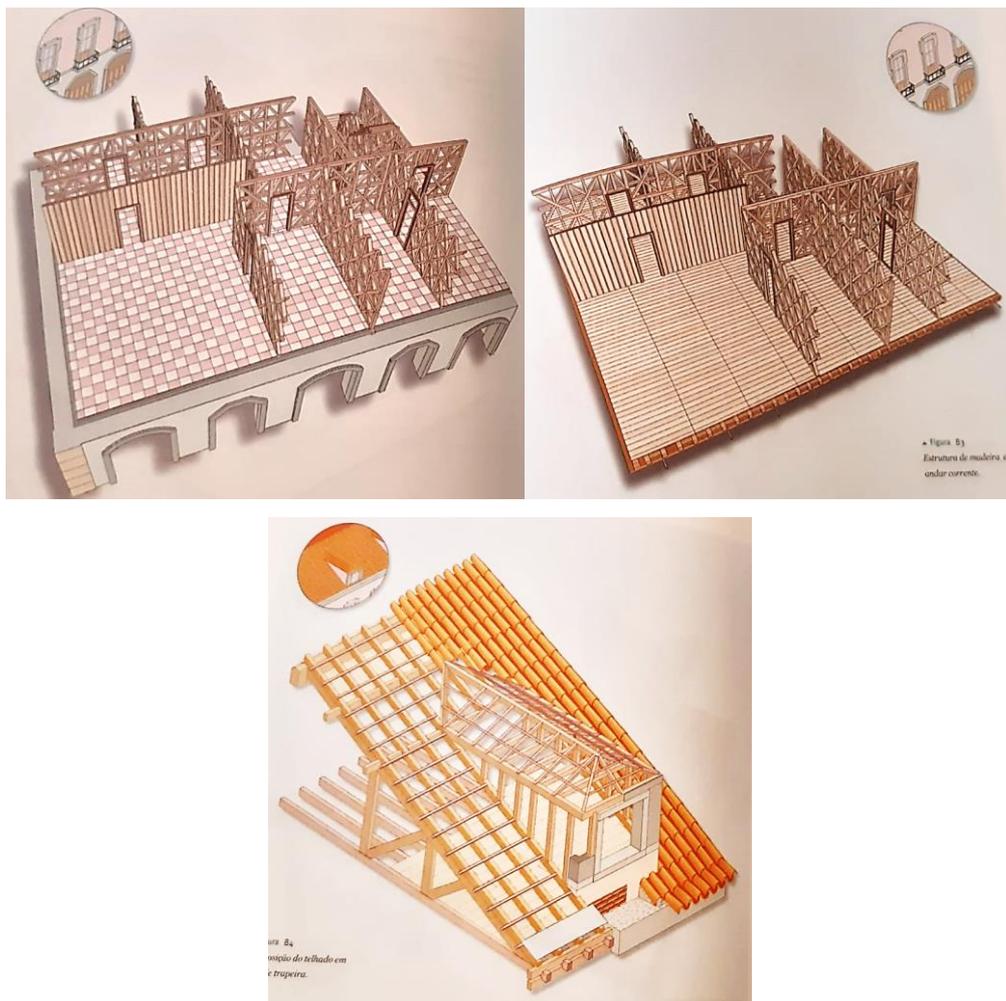
Contudo, o forte abandono nas últimas décadas do século XX levou à escassez de técnicos especializados no sector, a carência de regulamentações específicas e à falta de confiança no material pelos diferentes intervenientes no sector da construção. Hoje, em Portugal, urge a necessidade em reatar o conhecimento, o saber fazer, sobre as estruturas de madeira.

A madeira, enquanto material de construção, necessita de especial atenção na sua utilização, principalmente quando utilizada para funções estruturais. A grande variedade de espécies e produtos que possuem comportamento e características diferentes, sua origem natural e biológica que resulta num material anisotrópico, heterogéneo e sujeito a degradação biológica, tornam necessários

conhecimentos técnicos e científicos específicos, pois apesar de sua elevada complexidade, quando aplicada de forma correta, com a devida proteção e manutenção, a madeira é um dos materiais de construção mais eficientes.

2.1.1. Contexto português

Após o terremoto no ano de 1755, estabeleceu-se na região de Lisboa o sistema construtivo chamado de construção pombalina, fortemente influenciado pela necessidade de racionalização e de garantir que os edifícios pudessem responder com eficácia um futuro desastre (Appleton, 2003). Os edifícios construídos na época pombalina eram baseados na combinação entre a alvenaria pesada, rígida e frágil com a madeira leve, flexível e resiliente, assegurando um bom desempenho quer para cargas verticais quer para horizontais (Appleton, 2003). Os edifícios pombalinos possuem como características a geometria regular, paredes principais em alvenaria de pedra, paredes interiores em frontal pombalino, pisos e cobertura em madeira (Figura 2.1) (Cóias, 2007).



Na época, a arquitetura pombalina foi considerada por muitos como pobre e mesquinha, devido a ausência de exuberância decorativa que se encontrava em outras cidades europeias. Porém, Appleton (2003) a classifica como “um acto excepcional de depuração tecnológica, em que se atinge um grau de compreensão extraordinário acerca do comportamento das estruturas”, reforçando sua posição ao evidenciar como a construção pombalina sobrevive após cerca de 250 anos, mesmo sem a devida manutenção (Appleton, 2003).

A elevada complexidade e exigência técnica da construção pombalina levaram o sistema construtivo a ser encarado como um obstáculo à rapidez da expansão das cidades, e no último terço do século XIX deu-se início a época das construções gaioleiras. Os edifícios gaioleiros eram compostos por paredes alvenarias de pedras, de razoável ou má qualidade, com pisos e cobertura em madeira (Appleton, 2003; Córias, 2007). A época gaioleira perdurou até aproximadamente a década de 30 do século XX, momento no qual o betão se consolida como principal material de construção em Portugal.

Nos períodos anteriores ao sismo de Lisboa (antes de 1755), pombalino (entre 1755 e 1870) e gaioleiro (entre 1870 e 1930) a madeira possuía grande expressão como material estrutural em Portugal, estando presente nos pisos e coberturas (e paredes na construção pombalina). Córias (2007) estimou que, em 2007, os edifícios construídos anteriores a 1755, pombalinos e gaioleiros ainda representavam cerca de 39% do parque edificado em Lisboa.

A casquinha é uma madeira frequentemente encontrada nesses períodos, principalmente ao se tratar de obras com maior importância. Como exemplo, pode-se citar o Palacete Ribeiro da Cunha (Figura 2.2), edifício de quatro pavimentos, construído em 1877 (época gaioleira) no centro de Lisboa, sendo estruturalmente formado por pisos, escadas e cobertura de casquinha e alvenaria de pedra (irregular) revestida por argamassa e tinta (Henriques et al., 2012).



Figura 2.2 – Palacete Ribeiro da Cunha, centro de Lisboa.
(Câmara municipal de Lisboa, s.d.)

2.1.2. Ligações de carpintaria com dente simples (Perna-Linha)

Conforme mencionado anteriormente, o sistema construtivo português entre os séculos XVIII e XX adotou estruturas em madeira para as coberturas, pisos e, em alguns casos, como reforços em paredes de alvenaria. Apesar do declínio da madeira e a ascensão do betão, a madeira continuou a ter um papel de relevância nas estruturas das coberturas portuguesas (Branco, 2008). As coberturas tradicionais portuguesas são, geralmente, compostas por asnas simples (Figura 2.3), com vão livre médio de 6m, podendo ser encontradas asnas com escoras e pendurais adicionais para vãos maiores.

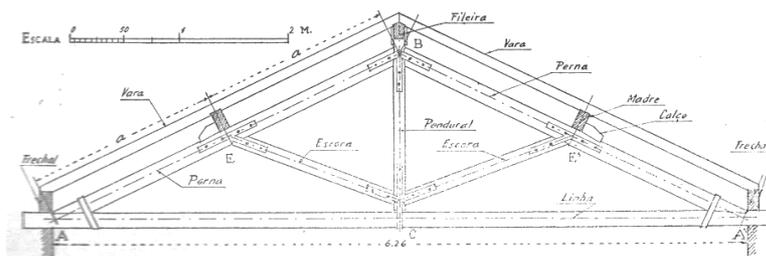


Figura 2.3 – Asna simples.
(Costa, 1930a)

As ligações de carpintaria são ligações tradicionalmente utilizadas para se conectar a perna e a linha nas asnas de madeira, sendo os esforços diretamente transferidos entre os elementos por compressão e/ou fricção (Yeomans, 2003; Branco, 2008). Ao longo do tempo, desenvolveram-se variantes geométricas deste tipo de ligação, destacando-se duas delas, as ligações com dente simples e as ligações com dente duplo (Figura 2.4), sendo as ligações com dente simples as mais comuns devido à sua simplicidade e facilidade de corte.

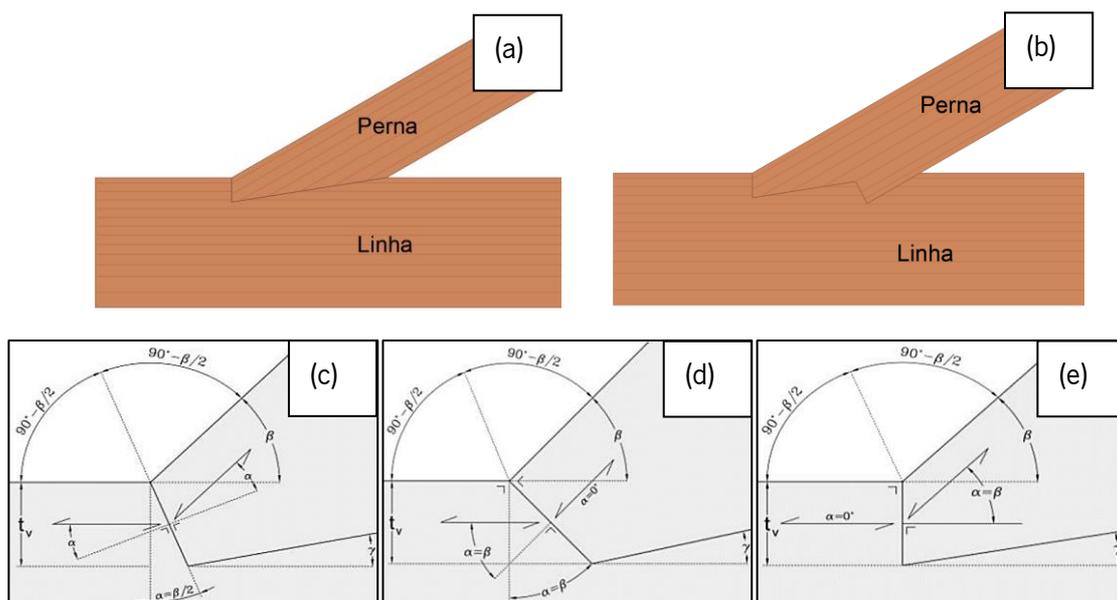


Figura 2.4 – Ligações tradicionais de carpintaria. (a) Ligação com dente simples; (b) Ligação com dente duplo; (c) Configuração geométrica ideal; (d) Configuração geométrica perpendicular à perna; (e) Configuração geométrica perpendicular.

Entre as ligações com dente simples pode-se separá-las em três famílias: a configuração geométrica ideal, a configuração geométrica perpendicular à perna e a configuração geométrica perpendicular à linha (Oslet, 1890). O que difere as três famílias é a inclinação do corte do entalhe na superfície frontal (α) em relação a inclinação da perna (β), onde a configuração geometria ideal possui α equivalente a $\beta/2$, a configuração geométrica perpendicular à perna possui α equivalente a β e a configuração geométrica perpendicular à linha possui $\alpha=0^\circ$ (Figura 2.4).

A configuração geométrica ideal surgiu por último, com o desenvolvimento de novas tecnologias de corte (por exemplo CNC), e é considerada a mais eficiente entre elas. Porém, devido a falta de ferramentas de carpinteiros precisas, que impossibilitavam cortes mais complexos, as outras duas configurações são comumente encontradas em construções mais antigas (Verbist et al., 2017).

Nas últimas décadas, é possível observar estudos acerca do comportamento mecânico de ligações de carpintaria com dente simples, por exemplo Verbist et al. (2017), Branco et al. (2018), Munafò et al. (2015), Palma et al. (2010), entre outros. Porém, Verbist et al. (2017) alerta que a comparação entre os resultados experimentais e numéricos indicam que o comportamento mecânico destas ligações são, geralmente, subestimados, levantando-se a necessidade de se revisar as equações de dimensionamento presentes nas normas atuais.

Apesar de serem ligações tradicionais e comumente encontradas nas construções, tanto em construções novas, mas principalmente em construções mais antigas, as ligações de carpintaria com dente simples continuam a apresentar lacunas de conhecimento a serem exploradas, principalmente ao considerar-se a sua degradação biológica.

2.2. Estrutura e crescimento da madeira

A estrutura de uma árvore pode ser dividida em três constituintes: raiz, fuste e copa. A madeira utilizada na construção é obtida dos troncos, que durante o período de vida da árvore possui a função de sustentar a copa e realizar a condução de água e nutrientes absorvidos pela raiz (Carvalho, 1996).

O tronco, por sua vez, é formado pela medula, borne, cerne, câmbio, casca e entrecasco. O câmbio é responsável pela produção de novas células, produzindo lenho para o interior e casca/entrecasco para o exterior, fazendo com que a árvore cresça em diâmetro (Carvalho, 1996; Cruz & Nunes, 2012). A formação do lenho é realizada de forma cíclica, formando os anéis de crescimento. O anel de crescimento pode ser formado por duas camadas distintas, denominadas por lenho de início de estação (lenho de primavera) e lenho de fim de estação (lenho de outono). O lenho de primavera apresenta células de

grande largura e paredes finas, enquanto as células do lenho de outono são de menor largura e paredes mais espessas. Essa diferença a nível celular faz com que o lenho de outono seja mais denso e seja responsável por conferir maior resistência ao tronco (Wiedenhoeft, 2011; Cruz & Nunes, 2012). Em zonas climáticas temperadas é possível observar as duas camadas, onde o lenho de primavera, geralmente, possui cor mais clara, tornando-se possível estimar a idade de uma árvore a partir do número de anéis.

As células vivas da árvore constituem o borne e são responsáveis pela condução da água e nutrientes (atividade fisiológica) e conforme a ocorrência da morte destas células é formado o cerne. A transformação do borne em cerne é variável consoante a espécie, ocorrendo entre os 5 e os 30 anos de vida da árvore. Tal transformação causa a alteração na cor do lenho (onde geralmente o cerne é mais escuro), redução da permeabilidade e aumento da durabilidade natural, decorrente do processo de deposição de um conjunto de compostos orgânicos denominados de extrativos (Machado et al., 2009; Cruz & Nunes, 2012). A proporção borne/cerne varia de acordo com a espécie e, em alguns casos, não é possível observar a distinção cromática entre borne e cerne (Machado et al., 2009).

Tratando-se da casca, entrecasco e medula, os dois primeiros são responsáveis pela proteção externa da árvore, enquanto a medula é formada por um tecido macio, em torno do qual se verifica o primeiro crescimento da madeira (Pfeil & Pfeil, 2003). A Figura 2.5 representa a seção transversal de um tronco, identificando-se as respectivas camadas descritas anteriormente.

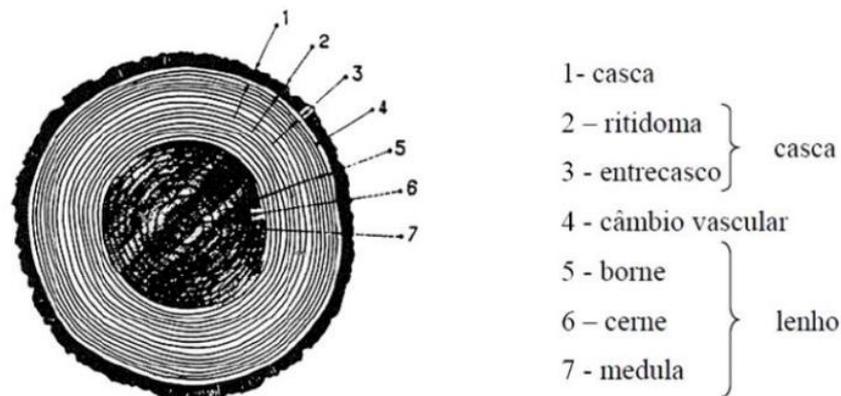
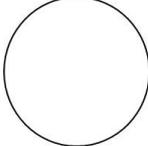


Figura 2.5 - Seção transversal do tronco de uma árvore e suas respectivas camadas.
 (LNEC, 1995)

Tratando-se das espécies florestais, é possível separá-las em dois grandes grupos: resinosas (gimnospérmicas) e folhosas (angiospérmicas). A principal diferença entre os dois grupos dá-se na sua organização anatômica, no qual as resinosas apresentam estrutura mais simples, formada por traqueídeos e parênquima. Enquanto as folhosas são compostas, para além dos traqueídeos e

parênquima, por fibras e vasos lenhosos. Além disso, as folhosas apresentam um crescimento mais lento, dando origem a madeiras com densidade mais elevada e maior durabilidade (Carvalho, 1996). O Quadro 2.1 apresenta a função, forma e presença em cada grupo celular que forma o lenho, enquanto a Figura 2.6 apresenta o arranjo celular de uma espécie resinosa (casquinha, *P. sylvestris*) e de uma folhosa (Carvalho europeu, *Quercus robur*). Como exemplos de espécies resinosas, pode-se citar o pinheiro, o abeto e o espruce, enquanto alguns exemplos de folhosas são castanho, carvalho, eucalipto e o ipê.

Quadro 2.1 - Função e parede celular dos grupos celulares que formam as madeiras resinosas e folhosas. Adaptado de Dinwoodie (2000)

Célula	Espécies florestais	Função	Parede celular
Parênquima	Resinosas e Folhosas	Armazenamento	
Traqueídeo	Resinosas e Folhosas	Suporte e condução	
Fibras	Folhosas	Suporte	
Vasos lenhosos	Folhosas	Condução	

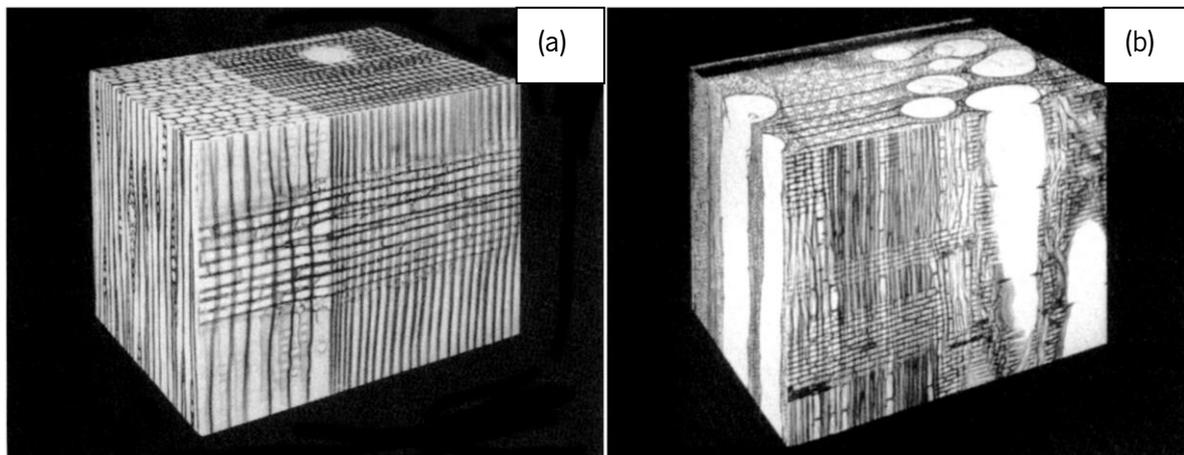


Figura 2.6 - Arranjo celular em uma resinosa e em uma folhosa. (a) Casquinha (*P. sylvestris*); (b) Carvalho (*Quercus robur*). (Dinwoodie, 2000)

2.3. Defeitos e singularidades

A madeira como material natural apresenta defeitos e singularidades resultantes do seu crescimento, processo de secagem, serragem/transformação ou ataques biológicos que a conferem características

únicas (Carvalho, 1996). A qualidade de uma peça de madeira é medida pelas características médias do seu lenho e pelos defeitos que ele apresenta (tipo, quantidade e distribuição) (Cruz et al. 2015). Entende-se por defeito da madeira toda e qualquer singularidade e irregularidade que a madeira apresente e que possa comprometer a sua utilização, ou seja, que comprometa seu desempenho mecânico, físico e/ou na sua durabilidade (capacidade resistente, deformações e vida útil) (Carvalho, 1996).

Uma descrição detalhada dos defeitos mais significativos da madeira é disponibilizada pela norma NP 180 (1962), e esses defeitos são utilizados como parâmetros na avaliação da qualidade da peça através da classificação visual. A seguir são descritos de forma resumida os defeitos considerados mais relevantes na classificação visual de uma peça de madeira (nós, fendas, inclinação do fio, bolsas de resina, descaio, taxa de crescimento e empenos).

- Nós

Um nó corresponde a base de um ramo inserida no tronco principal da árvore. É composto de uma seção simples de massa lenhosa, com desenvolvimento cônico com origem na medula e forma a depender do plano de corte da madeira (Figura 2.7) (Cruz et al. 2015).

Geralmente, os nós são os defeitos mais condicionantes para a resistência global do elemento, causando uma alteração brusca na orientação das fibras vizinhas, resultando numa mudança de esforço paralelo para perpendicular às fibras, o que, para um material fortemente anisotrópico, condiciona o seu valor de resistência máxima (Branco & Sousa, 2014). O seu efeito torna-se mais ou menos gravoso de acordo com a sua dimensão, localização e tipo de esforço considerado, onde as zonas tracionadas são as mais afetadas, uma vez que a resistência à tração da madeira na direção paralela às fibras é cerca de trinta vezes superior à resistência no plano perpendicular (Machado et al., 2009).



Figura 2.7 - Nó exposto na superfície da madeira.

Caso o elemento de madeira seja utilizado para fins não estruturais, a importância dos nós é meramente estética, procurando-se peças com nós que possuam uma distribuição uniforme, pequena dimensão, aderentes e são, ou seja, que possuam pouca expressão nas faces expostas da peça (Cruz et al. 2015). No caso de elementos estruturais, é preciso considerar a área dos nós em relação a área total da secção transversal, nomeadamente o KAR (*Knot Area Ratio*) (Figura 2.8), que pode ser total (KART) ou marginal (KARM). A quantificação do KART é realizada pela projeção dos nós na secção transversal, enquanto para o KARM, quantifica-se a área ocupada pelos nós na zona próxima dos cantos em cerca de um quarto da altura da peça. Idealiza-se que cada nó se desenvolve em forma de cone até à medula ou, no caso de não existir medula, o vértice do cone localiza-se no exterior da secção transversal.

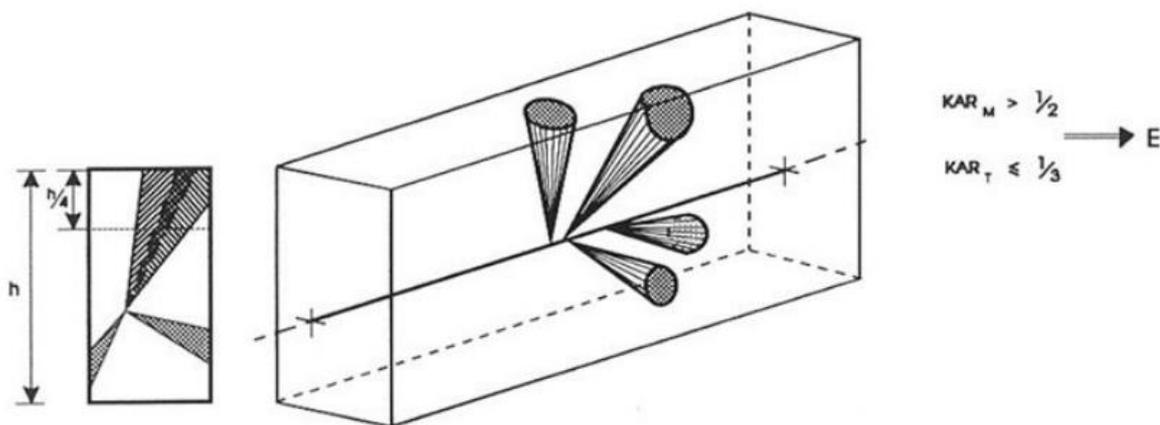


Figura 2.8 - Medição dos nós e cálculo do KAR total e marginal. (LNEC, 1997b)

- Fendas

As fendas, tal como os nós, introduzem descontinuidade no material lenhoso, podendo ser causada por secagem, danos exteriores ou má conceção/dimensionamento. As fendas de secagem são as mais comumente observadas e, geralmente, são consequência da secagem brusca e não uniforme da madeira ou de ciclos de molhagem/secagem, que por sua vez geram gradientes de humidade e esforços internos devida a uma forte retração das camadas exteriores sem que haja uma retração efetiva das camadas interiores, separando-se as fibras segundo os seus raios lenhosos (Figura 2.9), podendo designar-se de repassadas ou não repassadas. Uma fenda é repassada quando ocorre simultaneamente em duas superfícies opostas de uma peça (Branco & Sousa, 2014; Cruz et al., 2015).

As fendas anelares podem ocorrer quando a árvore se encontra sujeita a fenómenos de flexão regulares e abundantes durante o seu desenvolvimento (como ação de ventos fortes e neve) e separam as fibras segundo os seus anéis de crescimento (Cruz & Nunes, 2012).

A influência que as fendas têm na resistência mecânica da madeira irá depender do tipo de esforço, da eventual associação com outros defeitos e da sua morfologia (localização, extensão e profundidade) (Machado et al., 2009).

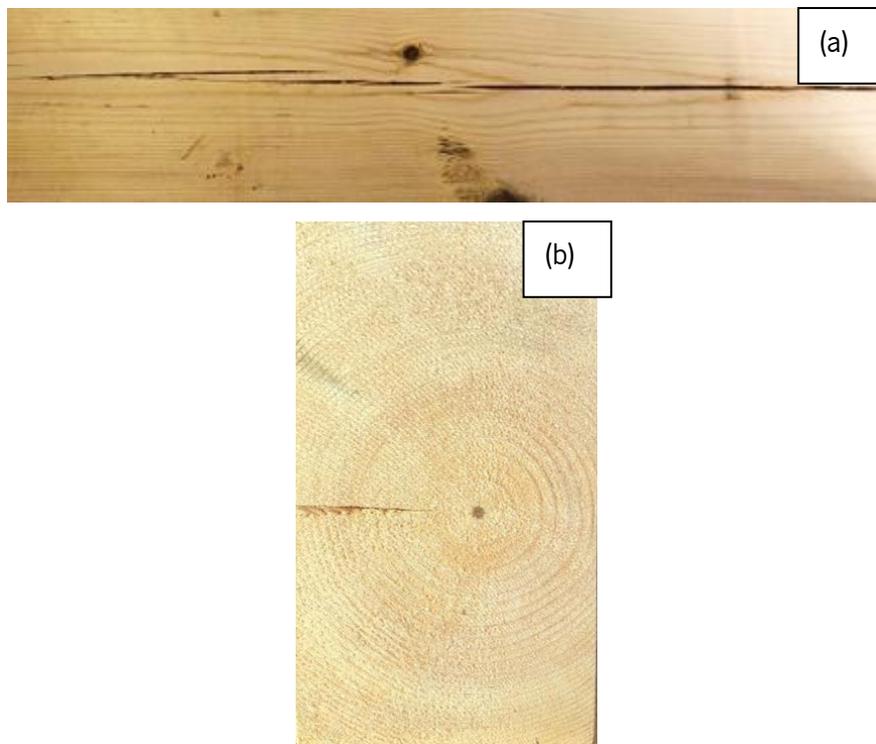


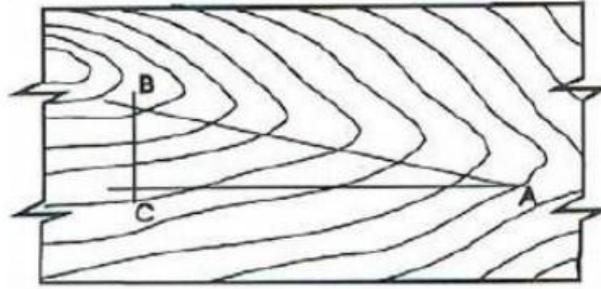
Figura 2.9 - Fendas de secagem. (a) Vista lateral de uma viga; (b) Vista frontal.

- Bolsa de resina

As bolsas de resina, assim como os nós, representam uma alteração localizada da direção das fibras da madeira, e por isso, formam uma região de menor desempenho mecânico (Machado et al., 2009). Para a quantificação do efeito das bolsas de resinas, caso ocorram na proximidade de nós, devem ser incluídas no cálculo dos KAR correspondentes (NP 4305, 1995). Entretanto, as bolsas de resina são, geralmente, de pequena dimensão e possuem pouco efeito na qualidade da peça (Branco & Sousa, 2014).

- Desvio de inclinação do fio

A inclinação do fio (fio diagonal ou torcido) é uma anomalia que resulta da existência de um ângulo entre a direção das fibras da madeira e o eixo longitudinal da peça (Figura 2.10) (Cruz & Nunes, 2012). Pode ser resultado do crescimento da árvore (curvatura do tronco ou o fio torcido), ou do plano inadequado de corte das peças de madeira (Machado et al., 2009; Cruz & Nunes, 2012). Assim como nos nós, a anomalia resulta na mudança da direção da aplicação de esforços, podendo causar diminuições significativas da resistência da peça, onde um maior ângulo de inclinação do fio resulta numa maior perda de resistência mecânica.



$$\text{Inclinação do fio} = BC/AC$$

Figura 2.10 - Medição do desvio de inclinação do fio.
(LNEC, 1997b)

- Descaio

É um defeito de laboração que representa a falta de madeira em uma ou mais arestas da peça, que resulta do corte da madeira próximo à periferia do tronco podendo também ser resultante da perda de seção por ataque de fungos ou insetos (Machado et al., 2009; Branco & Souza 2014). O descaio não interfere de forma significativa nas propriedades mecânicas e a sua principal implicação é a dificuldade de fixação, colagem ou ligação a outras peças (Cruz & Nunes, 2012; Machado et al., 2009). A sua avaliação é realizada pelo quociente entre a projeção do descaio em uma superfície e a largura total dessa superfície (NP 4305, 1995) através das equações 2.1 e 2.2.

$$\frac{V_1}{h} \text{ ou } \frac{V_2 + V_3}{h} \quad [2.1]$$

$$\frac{b - K_1}{b} \text{ ou } \frac{k_2 + k_3}{b} \quad [2.2]$$

Onde, h , b , V_1 , V_2 , V_3 , k_1 , k_2 e k_3 estão representados na Figura 2.11.

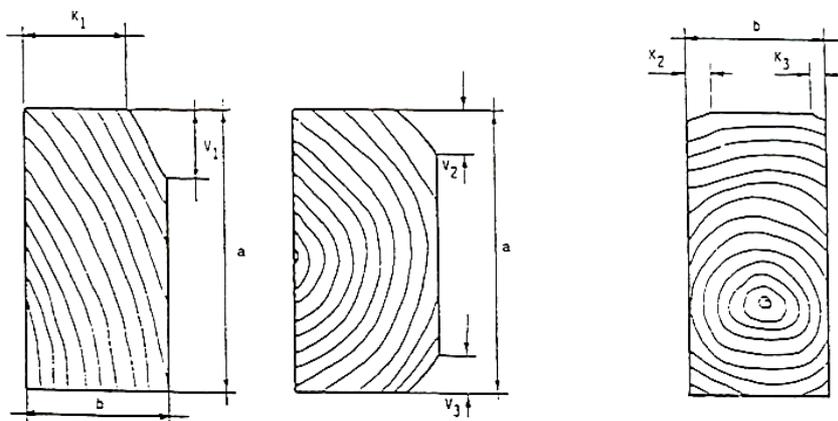


Figura 2.11 - Medição do descaio
(LNEC, 1997b)

- Taxa de crescimento

A taxa de crescimento não representa um defeito, mas sim uma singularidade. Ela permite, em alguns casos e de forma indireta, estimar a massa volúmica da madeira, uma vez que uma taxa de crescimento mais lenta, geralmente, representa uma massa volúmica mais elevada (Cruz & Nunes, 2012; Machado et al., 2009). A taxa de crescimento é quantificada pela largura média dos anéis de crescimento medida sobre a linha radial máxima que se possa traçar em um dos topos da peça através da equação 2.3 (Figura 2.12).

$$\text{Taxa de crescimento} = \frac{R(mm)}{n^{\circ} \text{ de anéis de crescimento anuais}} \quad [2.3]$$



Figura 2.12 – Medição da taxa de crescimento.

- Empenos

Os empenos são deformações que resultam da variação do teor de água e anisotropia da madeira (NP 4305, 1995). Assim como o descaio, os empenos não representam, geralmente, perda de resistência do material, e a sua influência está relacionada à dificuldade de utilização das peças em obra (Cachim, 2014). Os empenos podem ser classificados em quatro tipos (arco de face, arco de canto, hélice e meia cana) e são quantificados conforme ilustra a Figura 2.13 (NP 4305, 1995).

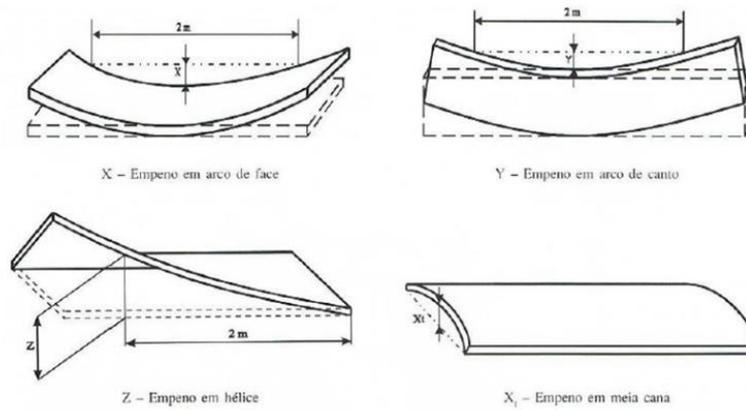


Figura 2.13 - Medição de empenos.
(NP 4305, 1995)

2.4. Características físicas e químicas

- Anisotropia da madeira

A madeira é um material anisotrópico. Os três eixos principais considerados no caso das madeiras são: o eixo longitudinal ou axial (correspondente à direção paralela às fibras), o eixo radial (correspondente à direção perpendicular às fibras e aos anéis de crescimento) e o eixo tangencial (correspondente à direção perpendicular às fibras e paralelo aos anéis de crescimento) (Machado et al., 2009, Cruz & Nunes, 2012) (Figura 2.14).

A anisotropia da madeira resulta em consideráveis variações de propriedades físicas e mecânicas de acordo com a direção considerada (Kretschmann, 2011). Segundo Pfeil & Pfeil (2003), as diferenças de propriedades entre o eixo radial e tangencial, geralmente, não são relevantes, por outro lado, ao observar as propriedades físicas e mecânicas do eixo axial, é possível notar diferenças significativas em relação aos eixos tangencial e radial.

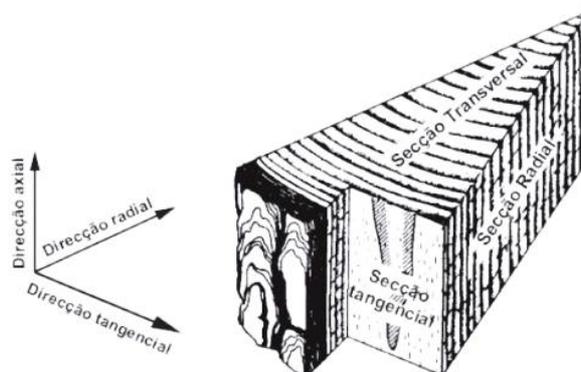


Figura 2.14 - Direções e seções principais a serem consideradas na madeira.
(Machado et al., 2009)

A anisotropia da madeira pode ser classificada pelo quociente entre os fatores de retração unitária tangencial e radia (R_t/R_r). A classificação fornece um indicativo sobre a propensão da madeira para empenar, onde valores de R_t/R_r mais elevados indicam uma propensão maior para empenos.

- Humidade e teor de água

A humidade da madeira tem impacto na maioria das propriedades físicas e mecânicas da madeira, condicionando a estabilidade dimensional, o desenvolvimento de fendas e a degradação biológica. A quantificação da humidade é realizada a partir do seu teor de água, que é expresso em termos da massa de água em relação a massa de material lenhoso (EN 13183, 2002).

A água está presente na madeira em três formas distintas: água livre, água de constituição e água de embebição ou impregnação. A água de constituição está ligada à madeira por fortes atrações químicas e a única forma de removê-la é através da decomposição química da madeira. Por outro lado, a água de embebição está ligada às paredes celulares da madeira por forças atrativas intramoleculares e a sua variação é responsável por mudanças dimensionais na madeira. Por fim, a água livre está presente nas cavidades das células (lumens), tanto na forma de água líquida como na forma de vapor de água (Cruz et al., 2015).

Imediatamente após o seu abate, a madeira (em estado verde) começa a perder sua água livre e nesta fase o teor de água da madeira é, geralmente, maior que 100%. Após perder toda a sua água livre, contém apenas água de constituição e de embebição (paredes celulares saturadas), diz-se então que a madeira atingiu o Ponto de Saturação das Fibras (PSF), que corresponde a um teor de água na faixa de 25%-30%. O PSF é um estado que pode ser atingido apenas de forma teórica, uma vez que o processo de absorção e dessorção é temporalmente e espacialmente contínuo e ininterrupto (Brischke & Alfredsen, 2020). Além disso, o PSF é considerado como um marco importante no processo de secagem da madeira, uma vez que variações do teor de água abaixo do PSF levará a variações na dimensão da madeira e nas suas propriedades mecânicas (LNEC, 1997c).

A madeira, como material natural e higroscópico que é, absorve ou liberta água de acordo com as condições ambientais no qual está inserida (temperatura e humidade relativa do ar), procurando de forma contínua atingir o seu teor de água de equilíbrio. Com o comportamento higroscópico da madeira, torna-se possível estimar o seu teor de água, associando-se curvas higrométricas a temperatura e a humidade relativa do ar do ambiente (Cruz et al., 2015). Por exemplo, de acordo com a curva de equilíbrio higrométrico do pinho (Figura 2.15), estimasse que o seu teor de água de equilíbrio, a 20°C e a uma humidade relativa do ar correspondente a 65%, seja aproximadamente 12%.

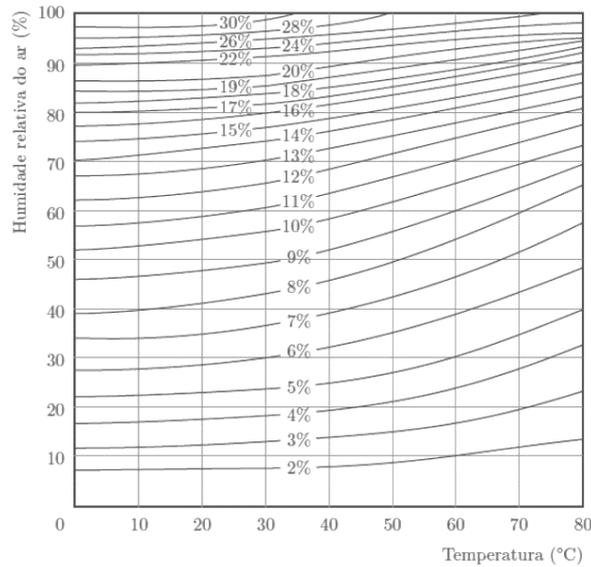


Figura 2.15 - Curvas de equilíbrio higrométrico.
(Cruz et al., 2015)

O teor de água da madeira pode ser medido através de métodos diretos ou indiretos. O primeiro, de acordo com a norma EN 13183 (2002), é baseado em medidas gravimétricas antes e após a secagem da madeira calculado a partir da equação 2.4, sendo o mais utilizado em laboratórios.

$$w(\%) = \frac{\text{Massa húmida} - \text{Massa seca}}{\text{Massa seca}} \times 100 \quad [2.4]$$

Tratando-se dos métodos indiretos, Thybring et al. (2017) expõe uma série de técnicas que possibilitam estimar o teor de água através da medição de outro parâmetro correlacionável, como por exemplo o método da resistência elétrica, capacitância elétrica, micro-ondas, entre outros. Apesar possuírem menor precisão, os métodos indiretos são muito utilizados para medições do teor de água *in situ*, devido a sua praticidade, versatilidade, velocidade de medição e por serem métodos geralmente semi/não-destrutivos.

- Retração e estabilidade dimensional

A madeira pode sofrer variações dimensionais de acordo com a mudança de umidade e/ou temperatura do material. O processo de secagem da madeira, quando abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), resulta na retração do volume e redução da massa volúmica aparente, de forma aproximadamente linear. Devido à anisotropia do material, a retração terá comportamento diferente nas três direções principais, no qual a direção tangencial apresenta retração aproximadamente duas vezes superior à retração na direção radial e 20 vezes superior aquela apresentada na direção axial (Machado et al., 2009).

As variações nas dimensões podem ser obtidas através dos coeficientes de retração unitária, que variam de acordo com a espécie e correspondem, em cada direção, à variação da dimensão da peça (retração

ou inchamento). São expressos em %/%, pois traduzem a variação de dimensão na direção considerada para cada variação do teor de água de 1%.

Tratando-se das variações dimensionais resultantes da mudança de temperatura, essas são muito baixas quando comparadas com as variações ocasionadas pela variação do teor de água. Para madeiras com teor de água acima de 3%, a retração causada pela perda de humidade será maior do que a expansão causada pelo aumento da temperatura, fazendo com que um aumento de temperatura resulte em retração ao invés de dilatação. Sendo assim, a dilatação ou retração resultantes da variação da temperatura podem ser ignoradas na maioria dos casos, considerando-se apenas as variações dimensionais causadas pela perda ou ganho de humidade (Dinwoodie, 2000).

- Massa volúmica

A massa volúmica da madeira é uma das características físicas mais importantes da madeira, sendo correlacionável com grande parte das propriedades mecânicas. A massa volúmica não é apenas função da quantidade de madeira, devendo-se levar em conta o teor de água no qual o elemento se encontra, uma vez que um teor de água mais elevado implica em uma massa volúmica mais elevada (Dinwoodie, 2000). A massa volúmica da madeira ρ_H (kg/m³), referente a um teor de água H (%), é definida pela relação entre a massa m_H (kg), e o volume V_H (m³) (NP 616, 1973) (equação 2.5).

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [2.5]$$

Grande parte das referências normativas, incluindo o Eurocódigo 5 (EN 1995, 2004), considera que massa volúmica deve ser corrigida para um valor de teor de água de referência de 12% (ρ_{12}). O valor de ρ_{12} pode ser determinado através da equação 2.6.

$$\rho_{12} = \rho_w \times \frac{(100 + 12) \times (100 + w\alpha_v)}{(100 + w) \times (100 + 12\alpha_v)} \quad [2.6]$$

Onde α_v é o valor do coeficiente de retração volumétrica para a espécie.

A massa volúmica da madeira varia de espécie para espécie e dentro da própria espécie. Como exemplo da enorme variabilidade da massa volúmica entre espécies diferentes, pode-se citar os casos extremos da Balsa (*Ochroma pyramidale*) que pode variar entre 40 e 320 kg/m³ e o Guaiaco (*Guaiacum officinale*) que possui massa volúmica superior a 1200 kg/m³ (Dinwoodie, 2000). Por fim, a massa volúmica pode ser utilizada como indicador relevante para a qualidade da madeira, uma vez que uma massa volúmica maior, geralmente, corresponde a uma performance melhor em termos de resistência mecânica, durabilidade e impermeabilidade. Por outro lado, também conduz, em muitos casos, maior retração da madeira e maiores dificuldades de laboração (Cruz et al., 1994).

- Composição química

Tratando-se de um material orgânico, a madeira possui uma estrutura celular, com paredes celulares compostas por celulose e hemicelulose embebidas em uma matriz amorfa de lenhina. A celulose, componente mais abundante na madeira (presente em cerca de 40%-50% da sua composição), atua como substância esquelética e confere alta resistência à tração à madeira (Carvalho, 1996; Ridout, 2000; Pfeil & Pfeil, 2003). A hemicelulose constitui cerca de 20%-30% da composição das resinosas e 25%-40% da composição das folhosas e é responsável por conferir elasticidade à madeira, atuando como um ligante para a celulose (Pfeil & Pfeil, 2003). Por outro lado, a lenhina confere rigidez à madeira, atuando como aglutinante para a celulose e contribuindo para a integridade estrutural das fibras. A lenhina está presente em cerca de 20-25% da constituição das folhosas e 25-30% da constituição das resinosas (Carvalho, 1996).

2.5. Características mecânicas

A avaliação das propriedades mecânicas da madeira é uma tarefa complexa, uma vez que é função de diversos fatores como a espécie florestal, massa volúmica, dimensões/forma do elemento, teor de água, qualidade (defeitos e singularidades), duração da aplicação de carga, entre outros. Devendo-se sempre ter em conta a sua constituição com elevada heterogeneidade e anisotropia. Como consequência da sua anisotropia, torna-se necessário distinguir as propriedades resistentes em dois planos: o plano paralelo à direção das fibras (plano longitudinal) e o plano perpendicular à direção das fibras (plano radial e plano tangencial).

De acordo com Machado et al. (2009), quando livre de defeitos, a madeira apresenta uma elevada resistência à flexão paralela às fibras e boa resistência à compressão e à tração paralela às fibras (Machado et al., 2009). A boa performance mecânica da madeira é representada pela sua elevada relação resistência/massa volúmica, sendo geralmente superior aos materiais estruturais mais utilizados atualmente, nomeadamente o aço e o betão (Pfeil & Pfeil, 2003). Por outro lado, a madeira apresenta baixa resistência ao corte, baixa resistência à compressão perpendicular às fibras, baixo módulo de elasticidade e resistência à tração perpendicular às fibras quase nula (Machado et al., 2009).

A classificação da madeira com função estrutural é realizada atribuindo classes de resistências (definidas na EN 338 (2016), podendo ser feita através de dois métodos distintos: a classificação visual e a classificação mecânica.

Para a atribuição de uma classe de resistência a partir de ensaios mecânicos, é necessário obter-se três propriedades de referência: a tensão de rotura por flexão paralela às fibras, o módulo de elasticidade à

flexão e a massa volúmica. Portanto, é ensaiado um lote representativo do material para a realização dos ensaios e, de acordo com os resultados obtidos, são estabelecidos os valores característicos para as propriedades mecânicas de acordo com a EN 384 (2016) e, a partir dos valores característicos, é atribuída uma classe de resistência, conforme a EN 1912 (2012). Os ensaios para a determinação das propriedades mecânicas são descritos na EN 408 (2010).

Por outro lado, a classificação visual é baseada na avaliação das dimensões/frequência dos defeitos e de algumas características físicas, como nós, inclinação do fio, empenos, etc. Como mencionado anteriormente, os defeitos e as singularidades da madeira influenciam substancialmente a capacidade resistente da madeira onde, por razões de segurança são estabelecidos valores limites para as dimensões e frequência dos mesmos.

A grande densidade de defeitos numa determinada espécie, por vezes, leva a espécie a ser incluída numa classe de resistência inferior, desaproveitando do seu potencial. Portanto, foram criadas as classes de qualidade, atribuídas de acordo com a quantificação e avaliação dos defeitos e singularidades existentes, correlacionando-os com as capacidades resistentes do elemento (Cunha, 2017). Posteriormente, as classes de qualidade podem ser relacionadas com as classes de resistência, através da atribuição de diferentes valores característicos de resistência mecânica (Cunha, 2017).

Tratando-se da influência do teor de água nas propriedades mecânicas, verifica-se uma diminuição da resistência e do módulo de elasticidade com o seu aumento. Entretanto, a variação só é relevante para valores inferiores ao PSF, uma vez que para valores acima deste, não existem variações dimensionais consideráveis da peça e a variação do teor de água se dá simplesmente na forma de água livre. A EN 384 (2016) considera que, para a tensão de rotura à flexão e à tração paralela às fibras, não é necessário ajuste (para valores de teor de água entre 10% e 18%). Por outro lado, para a compressão paralela às fibras e para o módulo de elasticidade é recomendado um ajuste de 3% e 2%, respetivamente, para cada percentual de variação de teor de água (EN 384, 2016).

Em relação ao tempo de atuação das cargas, este tem uma influência determinante na capacidade resistente da madeira, constatando-se que um elemento pode ser conduzido à rotura, mesmo com valores de carga abaixo da sua resistência, caso aplicação de determinada carga decorra durante um maior período de tempo. O efeito da duração da carga nas estruturas é considerado pelo Eurocódigo 5 (EN 1995, 2004) através de fatores de modificação da resistência que variam de acordo com o tempo de duração (permanente, longa, média, curta ou instantânea).

Por fim, o efeito de escala (dimensão da peça) possui a capacidade de influenciar as propriedades mecânicas, uma vez que quanto maior for um elemento de madeira maior será a probabilidade de

existirem irregularidades (defeitos/singularidades relevantes) no material, fazendo com que a rotura ocorra mais facilmente nesses pontos críticos.

No dimensionamento de uma estrutura de madeira, o Eurocódigo 5 (EN 1995, 2004) considera dois fatores de modificação no cálculo da resistência de projeto de uma peça. O primeiro, K_{mod} , é o fator de modificação que leva em conta o efeito da duração da carga e o teor de água de acordo com as condições ambientais no qual a peça está inserida. A duração da carga é separada em 5 classes (Quadro 2.2), enquanto o teor de água é classificado em um sistema de três classes de serviço (Quadro 2.3). O segundo fator, γ_m , é o coeficiente de segurança tendo em conta a incerteza da resistência definida para o material, variando entre 1 e 1,3.

Quadro 2.2 - Classes de duração das ações.
(Eurocódigo 5, 2004)

Classes de duração das ações	Descrição
Permanente	Acima de 10 anos (peso próprio)
Longa duração	Entre 6 meses e 10 anos (Mobiliário, armazenamento)
Média duração	Entre 1 semana e 6 meses (Sobrecarga de pessoas, neve)
Curta duração	Menor que uma semana (Neve, vento)
Instantânea	- (Vento, carga acidental, sismos)

Quadro 2.3 - Classes de serviço.
(Eurocódigo 5, 2004)

Classes de serviço	Temperatura	Humidade relativa do ar
Classe de serviço 1	20°C	Acima de 65% por algumas semanas no ano
Classe de serviço 2	20°C	Acima de 85% por algumas semanas no ano
Classe de serviço 3	Condições ambientais que levem a um teor de água acima da Classe de serviço 2	

A equação utilizada para o cálculo da resistência de projeto segundo o Eurocódigo 5 (EN 1995, 2004) é representada pela equação 2.7.

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_m} \quad [2.7]$$

Onde, X_d é a resistência de projeto, k_{mod} é o fator de modificação tendo em conta a duração da ação e o teor de água, γ_m é o fator de segurança e X_k é a resistência característica do material.

2.6. Degradação

Assim como outros materiais orgânicos, a madeira pode ser afetada por diversos tipos de degradação quando exposta a condições ambientais favoráveis, como a degradação causada por agentes físicos, químicos e biológicos. Quando deteriorada, uma estrutura de madeira pode ter sua segurança comprometida, afetando a sua performance a longo prazo e reduzindo a sua vida útil. Portanto, o conhecimento acerca dos diferentes processos de degradação da madeira é de suma importância para prevenir a sua deterioração, uma vez que é comprovado que a madeira, quando utilizada corretamente, possui elevada durabilidade.

2.6.1. Degradação por agentes físicos e químicos

- Degradação química

Tratando-se de ataques químicos, a madeira é tida como um material com elevada resistência, tornando-a apropriada para a utilização em situações de exposição química como piscinas e estruturas similares, requerendo cuidados mínimos de manutenção (Cruz et al., 2015).

- Agentes atmosféricos

As principais formas de deterioração causada por agentes atmosféricos resultam de ações como precipitação, vento, incidência de radiação ultravioleta e variações de humidade relativa do ar e temperatura.

Sendo assim, as condições de exposição são fundamentais na velocidade e nível de degradação. Pode-se distinguir três situações para as condições de exposição: utilização da madeira em ambientes interiores, sendo exposta a variações das condições hidrotérmicas (temperatura e humidade relativa do ar); utilização em ambientes exteriores abrigados, onde se encontra exposta à radiação solar, mas não às ações da chuva; utilização em ambientes exteriores desabrigados, sendo exposta à radiação solar e precipitações.

No caso em que se utiliza a madeira em ambientes interiores, o comportamento higroscópico da madeira é o principal responsável pela deterioração, verificando-se que os ciclos de temperatura e humidade relativa conduzem a fenômenos de secagem e humidificação que, por sua vez, causam a variação

dimensional da madeira e podem levar a formação de defeitos como empenos e fendas de secagem (Machado et al. 2009).

Tratando-se da exposição à radiação solar, essa causa a decomposição química da lenhina, resultando na descoloração da madeira. De seguida, devido a ação de fungos cromogêneos (quando as condições ambientais são favoráveis, ver seção 2.6.2), observa-se o escurecimento da madeira, gerando um aspeto de “madeira velha”. Entretanto, esse efeito pode ser considerado meramente estético, uma vez que atinge apenas a camada superficial do elemento, sendo possível encontrar camadas de madeira sã a 1-2mm de profundidade (Cruz et al., 2015).

A exposição à precipitação tem o efeito de acelerar a degradação causada pela incidência de raios ultravioletas, uma vez que a camada superficial degradada pela ação da incidência solar será removida por lixiviação e a camada de madeira sã no interior do elemento será exposta às ações dos agentes atmosféricos (Cruz et al., 2015). Além disso, a exposição às ações de chuva seguida por incidência solar causa variações mais bruscas no teor de água da madeira, que também pode causar o aparecimento de empenos e abertura de fissuras, porém, na maioria dos casos, a deterioração causada por agentes atmosféricos é um processo lento e não gera consequências significativas na resistência mecânica da madeira, sendo um efeito maioritariamente estético e que pode ainda ser minimizado com a aplicação de proteções com produtos de revestimentos como tintas (Cruz et al., 2015)

- Fogo

Muitas das vezes, de forma errônea, a madeira é tida como um material que possui uma má resistência ao fogo. Esse engano é causado pelo seu mau desempenho sob o ponto de vista da reação ao fogo, uma vez que a madeira é um material combustível. Porém, apesar da sua combustão, a resistência ao fogo das estruturas de madeira, sem qualquer tipo de tratamento prévio, geralmente, é superior ao desempenho de estruturas metálicas (Negrão & Faria, 2009; Cruz et al., 2015).

Em situação de incêndio, a madeira começa a secar, em resposta ao aumento da temperatura, ocorrendo a carbonização da madeira em temperaturas próximas de 280-300°C. A carbonização inicia-se nas faces expostas da madeira, e a camada exterior carbonizada permanece aderida ao elemento ajudando a retardar a evolução da carbonização nas camadas interiores (que por sua vez permanece quase inalterada), e por vezes conseguindo extinguir totalmente a carbonização, agindo quase como uma camada protetora (Cruz et al., 2015).

O Eurocódigo 5 (2004) assume uma taxa constante de carbonização, que varia de acordo com a espécie e a densidade da madeira, entre 0,5mm e 0,8mm por minuto, que corresponde, em média, à uma taxa de aproximadamente 1cm a cada 15 minutos.

A resistência ao fogo de uma estrutura de madeira pode ser garantida a partir do sobredimensionamento da seção transversal do elemento ou a partir da proteção da madeira com materiais que possuem baixa reação ao fogo, como pinturas e revestimentos específicos.

2.6.2. Degradação por agentes biológicos

Assim como referido anteriormente, os principais agentes de degradação biológica da madeira são os fungos e insetos. Para que se inicie o processo de degradação biológica, é necessário que ocorra uma série de fatores que contribuam para a instalação e desenvolvimento dos agentes, como temperatura e humidade relativa do ar favoráveis, existência de oxigénio, teor de água adequado, nutrientes e a presença dos agentes de degradação (Figura 2.16). Quando combinados por um certo período de tempo, a deterioração biológica pode ser capaz de causar danos estéticos, estruturais e redução da qualidade do ar interior, representando um risco para a segurança e saúde humana, em adição aos custos elevados com reparações e substituições de elementos deteriorados. Apesar de ser um material tradicional, a durabilidade de estruturas de madeira continua a ser um desafio para os engenheiros e arquitetos. Em seguida, será abordado com maior detalhe a degradação da madeira por ação de fungos e insetos.

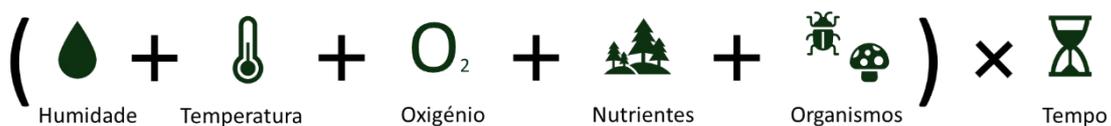


Figura 2.16 - Fatores condicionantes para a degradação biológica.

2.6.2.1. Fungos

Os fungos são organismos eucariotas, que podem ser unicelulares ou possuírem estruturas de células filamentosas (Eaton & Hale, 1993). A degradação por fungos na madeira pode ser causada por três grupos distintos de fungos: os fungos cromogéneos, os bolores e os fungos de podridão.

Independente do grupo (cromogéneos, bolores ou podridão), o desenvolvimento do fungo na madeira é dependente da espécie do fungo, da durabilidade natural da madeira, da presença de esporos de fungos (geralmente dispersos no ar), fonte de alimento (por exemplo celulose, lenhina, etc.), teor de água da madeira acima de 20%-30% (a depender da espécie do fungo), temperaturas favoráveis (acima de 0°C, com temperatura ótima a depender da espécie do fungo) e pH ácido (sendo capazes de se desenvolver em pH entre 2 e 8,5, com pH ótimo entre 4,5 e 5,5) (Teles & Do Valle, 2001; Milton, 1986).

- Bolores e fungos cromogéneos

Os bolores são fungos que crescem apenas superficialmente na madeira alimentando-se apenas dos açúcares livres, portanto, não são capazes de causar perdas de massa apreciáveis e nem danos estruturais à madeira conforme a infecção se desenvolve (Goodell, 2020).

A maioria dos bolores possui a capacidade de se desenvolver nas mais diversas superfícies, requerendo apenas uma certa quantidade de umidade e nutrientes para a sua instalação. Na madeira, os bolores só necessitam de água livre (teor de água acima do PSF) para se desenvolver. Porém, é comum encontrar madeiras com teores de água abaixo do PSF com presença de bolores, e isso se deve ao fato de que, com teores de água próximos dos 20%, os ciclos de temperatura geram condensações superficiais na madeira, fazendo com que exista água livre nestas regiões localizadas (Goodell, 2020).

Conforme dito anteriormente, os bolores não causam danos estruturais à madeira e, geralmente, a madeira com bolores é classificada como não defeituosa para usos estruturais. Entretanto, por razões estéticas e numa perspectiva de saúde humana, é desejável o controle, remediação e prevenção dos bolores em qualquer situação.

Tratando-se dos fungos cromogêneos, esses são capazes de penetrar no borne da madeira e se alimentam dos açúcares e amidos presentes nos parênquimas. A principal característica dos fungos cromogêneos é a coloração, com conseqüente mudança de cor, da madeira afetada. Em estágios iniciais, os fungos cromogêneos são comumente confundidos com bolores (Goodell, 2020). No geral, esses fungos causam perda de massa limitada na madeira e não são capazes de causar danos estruturais significativos (Zabel & Morrell 2020).

Os bolores e os fungos cromogêneos, apesar de não causarem danos estruturais, são um indício inicial de teores de água mais elevados na madeira, que podem contribuir para o desenvolvimento de fungos de podridão e outros agentes biológicos capazes de reduzir a capacidade mecânica.

- Fungos de podridão

Dos fungos que causam podridão na madeira, torna-se necessário distinguir os fungos que provocam podridão mole dos restantes, responsáveis pela podridão branca e podridão castanha (Cruz et al., 2015). Os fungos responsáveis pela podridão mole atuam a um ritmo mais lento que os outros fungos de podridão e são muitas vezes associados à degradação de madeiras de folhosas com elevada durabilidade e também a algumas madeiras que anteriormente foram sujeitas a tratamentos preservadores (Leicester, 2001).

Tratando-se dos fungos de podridão castanha, esses são geralmente associados à degradação de madeiras resinosas e de algumas madeiras de folhosas com baixa durabilidade (Goodell, 2020). A degradação causada por esses fungos é caracterizada por gerar um aspeto friável e quebradiço,

geralmente na direção das fibras (Figura 2.17a) (Goodell, 2020). Por outro lado, os fungos de podridão branca se encontram, de maneira geral, associados à degradação de espécies folhosas com média a alta durabilidade, gerando um aspeto esbranquiçado de maneira uniforme (Figura 2.17b) (Leicester, 2001; Goodell, 2020).

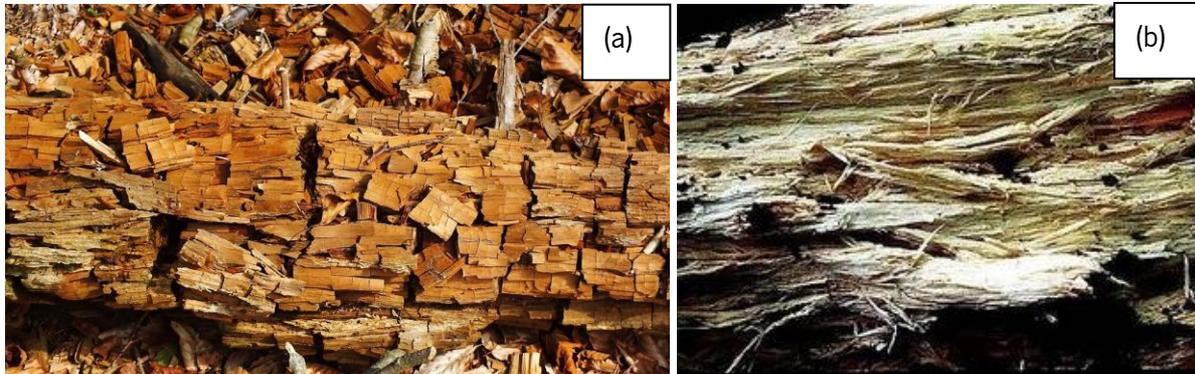


Figura 2.17 - Degradação causada por fungos de podridão. (a) Podridão castanha; (b) Podridão branca. (Project Noah, 2014; Gonçalves et al., 2020)

Os fungos de podridão utilizam componentes da parede celular da madeira como fonte de alimento, o que altera de forma significativa a sua estrutura lenhosa e, conseqüentemente, provoca redução da capacidade mecânica da madeira, podendo levar a sua completa destruição. A quantificação da perda de resistência mecânica da madeira devido ao ataque de fungos nem sempre é fácil, podendo-se constatar grandes níveis de perda de resistência, mesmo com perdas de massa relativamente baixas (Machado et al., 2009). Wilcox (1978), em sua revisão da literatura, constatou perdas de até 70% no módulo de elasticidade e no módulo de rotura para uma perda de massa, causada pela podridão castanha, de apenas 10%.

Conforme dito anteriormente, o teor de água e as condições de humidade da madeira são fatores preponderantes na degradação por fungos, não existindo um teor de água único que defina se o ataque irá ocorrer ou não, sendo esse fator variável de acordo com a espécie da madeira e do fungo (Berry, 1994). Entretanto, é possível afirmar que o ataque só deverá ter início caso a madeira alcance um teor de água por volta de 18%, com valores ótimos acima de 50% (Cruz & Nunes, 2012; Goodell, 2020).

Além disso, os fungos necessitam de quantidades adequadas de oxigénio para se desenvolverem, razão pela qual não atacam madeira saturada (Eaton & Hale, 1993) e desenvolvem-se em condições ideais de temperatura situadas entre os 10 e os 30°C, não sendo comum o seu desenvolvimento em temperaturas abaixo de 0°C e nem acima dos 40°C (Cruz & Nunes, 2012).

2.6.2.2. Insetos

Apesar da degradação por ação de fungos ser responsável por danos severos na madeira, esta tende a ser localizada. Em contraste, a ação dos insetos pode ser extensa, geralmente, levando a uma maior deterioração na estrutura (Gilfillan & Gilbert, 2001). Em Portugal, assim como em outros países com clima temperado, os insetos que mais causam a degradação da madeira são as térmitas e os carunchos.

- Térmitas

As térmitas (Blattodea: Isoptera) são caracterizadas pelo seu comportamento social, organizando-se em colónias e dividindo o trabalho através de um sistema de castas. O sistema de castas é formado pelo rei/rainha (reprodutores alados), os soldados (defensores da colónia) e as obreiras (construtoras do ninho e responsáveis por obter alimentos para a colónia).

As térmitas possuem um papel crucial nos ciclos de nutrientes e matéria orgânica, contribuindo para a decomposição de materiais celulósicos, como a madeira (Bignell & Eggleton, 2000). Apenas um pequeno número de espécies causa deterioração significativa na agricultura ou na construção, no entanto, algumas dessas espécies podem ser responsáveis por danos estruturais graves, causando um grande impacto económico em regiões nas quais estão presentes. Por exemplo, estima-se que as perdas causadas por térmitas na Austrália sejam por volta de 1,5 bilhão de dólares americanos por ano (Govorushko, 2018).

As espécies consideradas praga podem ser divididas em dois grupos distintos: as térmitas subterrâneas e as térmitas de madeira seca.

Geralmente, as térmitas subterrâneas constroem seu ninho no interior de solos com altos índices de humidade e pouca luz (Eaton & Hale, 1993), ou seja, estão dependentes da existência de uma fonte de humidade para que sobrevivam. O ataque das térmitas subterrâneas ocorre, preferencialmente, em elementos de madeira localizados no exterior dos edifícios que estão junto ao solo ou, no caso de elementos interiores, em pisos térreos (Machado et al., 2009).

A ação das térmitas apresenta alguma dificuldade de diagnóstico, uma vez que podem existir poucos sinais externos da sua atividade (Cruz & Nunes, 2012). Os poucos sinais da presença de térmitas subterrâneas são canais de terra sobre a madeira ou a presença de insetos adultos alados (Cruz & Nunes, 2012; Machado et al., 2009). A madeira degradada por térmitas subterrâneas aparenta estar intacta superficialmente, porém, com aspeto interior “lamelado”, devido aos túneis formados pelas térmitas. A consequência do seu ataque está relacionada a perda da secção transversal que os túneis causam e, quanto maior a perda de secção, maior a gravidade do ataque.

A espécie de térmita subterrânea endêmica em Portugal é a *Reticulitermes grassei* (Clément) encontrando-se com grande frequência em ambientes urbanos (Duarte et al., 2018).

Tratando-se das térmitas de madeira seca, como o próprio nome indica, atacam madeiras secas e sãs, mas, apesar disso, ainda necessitam de certa temperatura e humidade para que sobrevivam (Edwards & Mill 1986).

Em Portugal continental e nos Arquipélagos da Madeira e dos Açores, são conhecidas duas espécies, ambas com capacidade de infestar estruturas de madeira: a espécie a *Kaloterms flavicollis* Fabricius e a *Cryptotermes brevis* (Walker). A primeira é nativa do continente e foi introduzida em algumas ilhas, enquanto a segunda já foi introduzida em seis ilhas do Arquipélago dos açores, na Madeira, e mais recentemente, em Lisboa (Nunes et al., 2005; Ferreira et al., 2013).

Quando no interior da madeira, as térmitas de madeira seca, partilham algumas das características do ataque por caruncho pequeno. Entretanto, e particularmente no caso de *C. brevis*, podem causar um nível de degradação elevado em períodos de tempo relativamente curtos (Parracha et al., 2018).

- Caruncho

Os carunchos (Coleoptera) são insetos holometabólicos, em outras palavras, possuem metamorfose completa durante o seu desenvolvimento (ovo, larva, pupa e adulto). De todas as fases do desenvolvimento do caruncho, a larva é a única que utiliza a madeira como fonte de alimento, perfurando galerias no interior da madeira e, na maioria das espécies, consumindo a celulose, resultando em danos estruturais e reduzindo as suas propriedades mecânicas (Bravery et al., 1992). Quando atinge a sua fase adulta, o caruncho é capaz de causar apenas um dano reduzido à madeira, através da perfuração do orifício de saída.

Das muitas famílias de coleópteros xilófagos presentes em Portugal, três destacam-se em termos de ataques a elementos de madeira aplicada, são elas: Cerambycidae, que inclui os chamados carunchos grandes (por exemplo, a espécie *Hylotrupes bajulus* L.), Anobiidae (por exemplo, a espécie *Anobium punctatum*) e Lictidae (por exemplo, a espécie *Lyctus brunneus*) (Parracha et al., 2018).

Um dos grandes desafios no controlo de uma infestação por caruncho é a identificação correta da espécie. Esta tarefa não é simples, uma vez que é possível encontrar no mesmo elemento de madeira mais do que uma espécie de caruncho. Adicionalmente, é fundamental avaliar se a infestação continua ativa bem como a sua extensão e gravidade. Em teoria, o método mais simples para essa avaliação seria através de uma inspeção visual com ênfase na presença e número de orifícios de saída na superfície da madeira, de serrim recente e de insetos adultos.

Cada espécie de caruncho possui suas próprias características em termos de fonte de alimento, diâmetro das galerias, orifícios de saída, taxa de crescimento, formato e cor do serrim e severidade e extensão de infestação (Verbist et al, 2019) (Quadro 2.4).

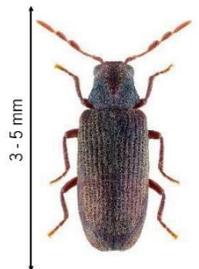
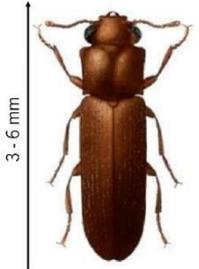
Quando é confirmada a presença de caruncho grande (*Hylotrupes bajulus*) em madeira de resinosas (as folhosas não são suscetíveis a esta espécie), deve existir um cuidado especial com as questões de segurança estrutural, pois as larvas deste inseto consomem, tipicamente, todo o borne. No caso de uma infestação grave por caruncho grande, é assim recomendado considerar apenas a fração correspondente ao cerne como a secção residual dos diferentes elementos da estrutura (Parracha et al., 2018).

No caso do ataque por carunchos pequenos, uma das grandes dificuldades é a quantificação da resistência das secções transversais dos elementos de madeira com danos devido à ação destes agentes biológicos (Cruz & Machado, 2013). Os efeitos desta ação podem ser considerados, de forma geral, assumindo uma redução da secção transversal ou adotando propriedades mecânicas inferiores para essas secções transversais (Cruz & Machado, 2013).

A maior parte das infestações causadas por caruncho pequeno parecem ter pouca importância estrutural, ainda que estejam ativas durante longos períodos de tempo. No entanto, desconhece-se o impacto real da ação do inseto em estruturas de madeira, influenciando as decisões acerca do nível de intervenção a ser adotada, geralmente, resultando em intervenções que podem ser desnecessárias, adotadas por questões de segurança (Parracha et al., 2018).

Quando uma infestação é localizada, a substituição da madeira infestada é uma opção exequível, se for economicamente vantajoso e estruturalmente viável. Entretanto, em muitos casos não existe necessidade de se substituir a estrutura, uma vez que a segurança estrutural não está comprometida. Nestes casos, a aplicação de um tratamento à madeira pode ser suficiente para que a infestação cesse e, dependendo da extensão dos danos, pode haver necessidade apenas de uma reparação da estrutura (Berry, 1994).

Quadro 2.4 - Características identificadoras dos ataques por carunchos.
(adaptado de Parracha, et al., 2018)

Família	Sintomas		
	Orifícios de saída	Serrim	Outros
<p>Cerambycidae</p>  <p>Ex: <i>Hylotrypes bajulus</i></p>	<p>Ovais (6 – 10 mm)</p>	<p>Granuloso, de cor creme que surge, quer junto aos orifícios de saída, quer compactado nas galerias formadas pelas larvas no interior da madeira</p>	<p>Empolamento da superfície quando existe um revestimento contínuo da madeira (pintura). Ruído gerado pela movimentação das larvas.</p>
<p>Anobiidae</p>  <p>Ex: <i>Anobium punctatum</i></p>	<p>Circulares (1 – 3 mm)</p>	<p>Montículos de serrim, cor creme, formados por pequenos grânulos elipsoidais. Túneis em direções aleatórias.</p>	<p>Muitas vezes associado a madeiras mais velhas e com ataque por fungos de podridão.</p>
<p>Lictidae</p>  <p>Ex: <i>Lyctus brunneus</i></p>	<p>Circulares (1 – 2 mm)</p>	<p>Muito fino, que forma pequenos montículos. Solta-se facilmente dos túneis.</p>	<p>Ataque restrito a madeiras de folhosas ricas em amido</p>

2.6.3. Normalização aplicável à durabilidade face à ação de agentes biológicos

As normas aplicáveis à durabilidade da madeira frente à ação de agentes biológicos abordam o assunto em termos da durabilidade natural da espécie, impregnabilidade e condições de gerias de exposição (classes de risco). A durabilidade natural de uma espécie é definida como a resistência natural que a espécie de madeira apresenta contra os agentes de degradação (fungos e insetos) (EN 350, 2016) e

varia de acordo com a espécie, localização geográfica e região do tronco (borne ou cerne) (Viitanen et al., 2002).

Em relação aos fungos, a EN 350 (2016) define um sistema de cinco classes de durabilidade (muito durável, durável, moderadamente durável, pouco durável e não durável). O sistema de classificação é utilizado para classificar apenas o cerne, enquanto o borne é sempre considerado não durável.

Tratando-se dos insetos, a mesma norma estabelece duas classes de resistência para classificar a durabilidade natural do borne contra carunchos (durável e suscetível) e uma classe extra para casos em que o cerne também é suscetível (suscetível no cerne). Por outro lado, define-se três classes de resistência contra o ataque de térmitas no cerne (durável, moderadamente durável e suscetível), enquanto o borne é considerado sempre suscetível.

Adicionalmente, a EN 350 (2016) estabelece um sistema de quatro classes relacionando a espécie e a sua impregnabilidade/tratabilidade (facilmente impregnável, medianamente impregnável, dificilmente impregnável e não impregnável).

As classificações de durabilidade natural e impregnabilidade estabelecidas na EN 350 (2016) são utilizadas para se definir se uma espécie é adequada para determinado uso de acordo com a sua classe de risco, definida na EN 335 (2013). A correlação entre a classificação de durabilidade natural/impregnabilidade e a classe de risco é estabelecida na EN 460 (1994). A EN 335 (2013) define um sistema de classificação com cinco níveis, que correlaciona as condições de exposição da madeira durante sua vida útil no edifício, a frequência em que a madeira possuiu um elevado teor de água (acima de 18-20%) e o risco da ocorrência de agentes biológicos. O Quadro 2.5 apresenta um resumo das classes de risco consideradas na EN 335 (2013).

Quadro 2.5 - Classes de risco.
Adaptado de EN 335 (2013) e Nunes (2013)

Classe de Risco	Condição de exposição	Teor de água	Ocorrência de agentes biológicos*			
			Fungos	Térmitas	Carunchos	Xilófagos marinhos
1	Interior seco	≤ 20%	Verde	Amarelo	Laranja	Verde
2	Interior ou coberto, sem exposição aos agentes atmosféricos. Possibilidade de condensação de água	Ocasionalmente > 20%	Laranja	Amarelo	Laranja	Verde
3	Exterior, sem contato com o solo, exposto aos agentes atmosféricos	Frequentemente > 20%	Vermelho	Laranja	Amarelo	Verde
4	Exterior, em contato com o solo e/ou água doce	Predominantemente /permanentemente > 20%	Vermelho	Vermelho	Amarelo	Verde
5	Permanentemente ou regularmente submerso em água salgada	Permanentemente > 20%	Laranja	Amarelo	Amarelo	Vermelho

*Referente à situação em Portugal; Risco: Vermelho – Muito alto; Laranja – Alto; Amarelo – Baixo; Verde – Sem risco.

2.7. Casquinha

A casquinha provém da espécie florestal resinosa *P. sylvestris*. Esta espécie de pinheiro possui forma florestal bastante alta, podendo atingir até 40m de altura, com fuste de até 25m (normalmente direito e sem ramificações). É uma espécie muito comum no continente europeu, cobrindo uma vasta área em todo o continente. É uma árvore de crescimento lento, explorada em rotações de 50 a 80 anos e cultivada, em geral, em povoamentos puros. A casquinha possui, em geral, borne abundante com coloração branco-amarelada e distinto do cerne, que por sua vez possui coloração castanho-pálida a castanho-

escura (Figura 2.18). Em Portugal, tem sido referenciada a sua presença na arborização das zonas serranas do Gerês, Estrela e Lousã (LNEC, 1997a).

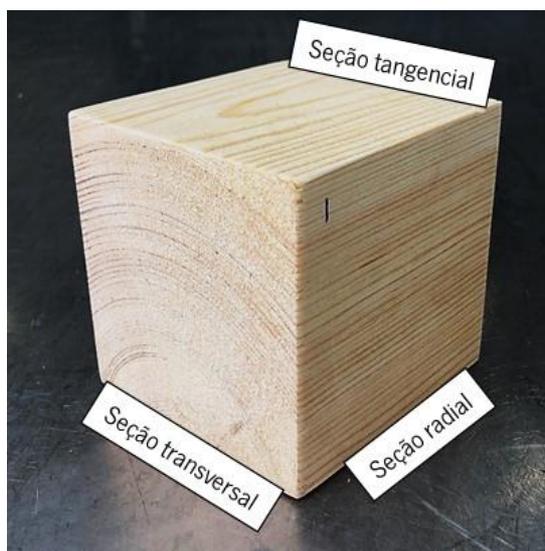


Figura 2.18 - Seções transversal, radial e tangencial de um provete cúbico de casquinha.

- Propriedades físicas e de durabilidade frente à ação de agentes biológicos

No Quadro 2.6 são apresentados valores médios das principais propriedades físicas da casquinha. Ressalta-se que a elevada heterogeneidade da madeira e a diversidade de regiões geográficas que se encontra a espécie torna difícil de se estabelecer um valor exato para as suas propriedades. Sendo assim, Tsoumis (1991) realiza a distinção da casquinha proveniente da Europa central/Reino Unido (*Scots Pine*) daquela proveniente do Norte/Nordeste da Europa (*Redwood*).

Adicionalmente, no Quadro 2.7 são apresentadas as classificações de durabilidade natural e impregnabilidade da casquinha, segundo a EN 350 (2016).

Quadro 2.6 - Propriedades físicas da casquinha para um teor de água de 12% (Tsoumis, 1991).

Propriedades físicas		Valores médios	
		Redwood	Scots Pine
Massa volúmica (kg/m ³)		400	530
Coeficiente de retração unitária (%/%)	Tangencial	0,19	0,33
	Radial	0,11	0,17
	Volumétrica	0,29	0,53
Fator de anisotropia		1,7	1,9

Quadro 2.7 - Durabilidade natural e impregnabilidade da casquinha.
(EN 350, 2016)

Durabilidade natural		
Fungos		Pouco/moderadamente durável
Térmitas		Suscetível
Carunchos	<i>Anobium punctatum</i>	Suscetível
	<i>Hylotrupes bajulus</i>	Suscetível
Impregnabilidade		
Borne		Facilmente impregnável
Cerne		Difícilmente/não impregnável

- Propriedades mecânicas

No Quadro 2.8 são apresentados os valores característicos de resistência mecânica da casquinha de acordo com a sua classe de qualidade e respetiva classe de resistência (EN 338, 2016).

Quadro 2.8 - Valores característicos de resistência mecânica da casquinha de acordo com a sua classe de qualidade e respetiva classe de resistência.
(LNEC, 1997a)

		Classe de Qualidade							
		T0	GS	T1	LT20	SS	LT30	T2	T3
		Classe de Resistência							
		C14	C16	C18	C24	C30			
Flexão estática (N/mm ²)	$f_{m,k}$	14	16	18	24	30			
Tração paralela às fibras (N/mm ²)	$f_{t,0,k}$	8	10	11	14	18			
Tração perpendicular às fibras (N/mm ²)	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4			
Compressão paralela às fibras (N/mm ²)	$f_{c,0,k}$	16	17	18	21	23			
Compressão perpendicular às fibras (N/mm ²)	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,5	2,7			
Corte (N/mm ²)	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	4,0	4,0			
Módulo de elasticidade (kN/mm ²)	-								
Paralelo às fibras	$E_{0,mean}$	7	8	9	11	12			
	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	7,4	8,0			
Perpendicular às fibras	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,37	0,40			
Módulo de distorção (kN/mm ²)	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,69	0,75			
Massa volúmica (kg/m)	ρ_{mean}	350	370	380	420	460			
	ρ_k	290	310	320	350	380			

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO DA CASQUINHA

Resumo: O propósito deste capítulo é apresentar a descrição da geometria, a caracterização das propriedades físicas e o processo de inspeção visual dos provetes que foram utilizados na campanha experimental deste estudo, abordada no capítulo 4. Portanto, apresenta-se todos os métodos utilizados no processo de inspeção visual dos provetes, de medição do teor de água e da massa volúmica, bem como a exposição dos resultados obtidos e a análise dos mesmos.

3.1. Considerações gerais

Conforme exposto nos capítulos 1 e 2, a casquinha é uma espécie florestal presente naturalmente numa vasta área do globo, sendo possível encontrá-la em quase todo o continente Europeu, com características particulares e uma grande amplitude de variação em seu comportamento. A madeira por si só é um material com elevada variabilidade e, tratando-se de casquinha, é necessária a correta caracterização do material uma vez que é uma espécie com grande variabilidade.

Neste capítulo, descreve-se o processo de caracterização dos provetes utilizados na campanha experimental exposta no capítulo 4, nomeadamente a descrição da sua geometria, a determinação da massa volúmica e do teor de água. A determinação destes dois parâmetros é imprescindível, uma vez que a massa volúmica é correlacionável com grande parte das propriedades mecânicas e é um forte indicativo da qualidade da madeira. Por sua vez, o teor de água tem impacto na maioria das propriedades físicas e mecânicas da madeira, condicionando a estabilidade dimensional e, em consequência, a abertura de fendas. Além disso, o teor de água deve ser levado em conta na determinação da massa volúmica de um elemento de madeira, uma vez que um teor de água mais elevado implica uma massa volúmica mais elevada.

Ainda neste capítulo, é descrito o procedimento para a inspeção visual dos provetes, de forma a se identificar possíveis defeitos e singularidades que podem influenciar a qualidade da madeira e, consequentemente, os resultados dos ensaios realizados no capítulo 4.

Por fim, são expostos os resultados obtidos, bem como a sua análise. Todos os procedimentos realizados para se atingir os objetivos do capítulo 3 foram executados no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST).

3.2. Métodos

3.2.1. Características e descrição dos provetes

Os provetes utilizados nos ensaios à compressão são provetes de Ligações de Carpintaria de dente simples (Perna-Linha), de casquinha, com dente frontal do entalhe perpendicular às fibras da madeira ($\alpha=0^\circ$), inclinação entre a Perna e a Linha de 30° ($\beta=30^\circ$) e dimensões estruturais (ver Figura 3.1).

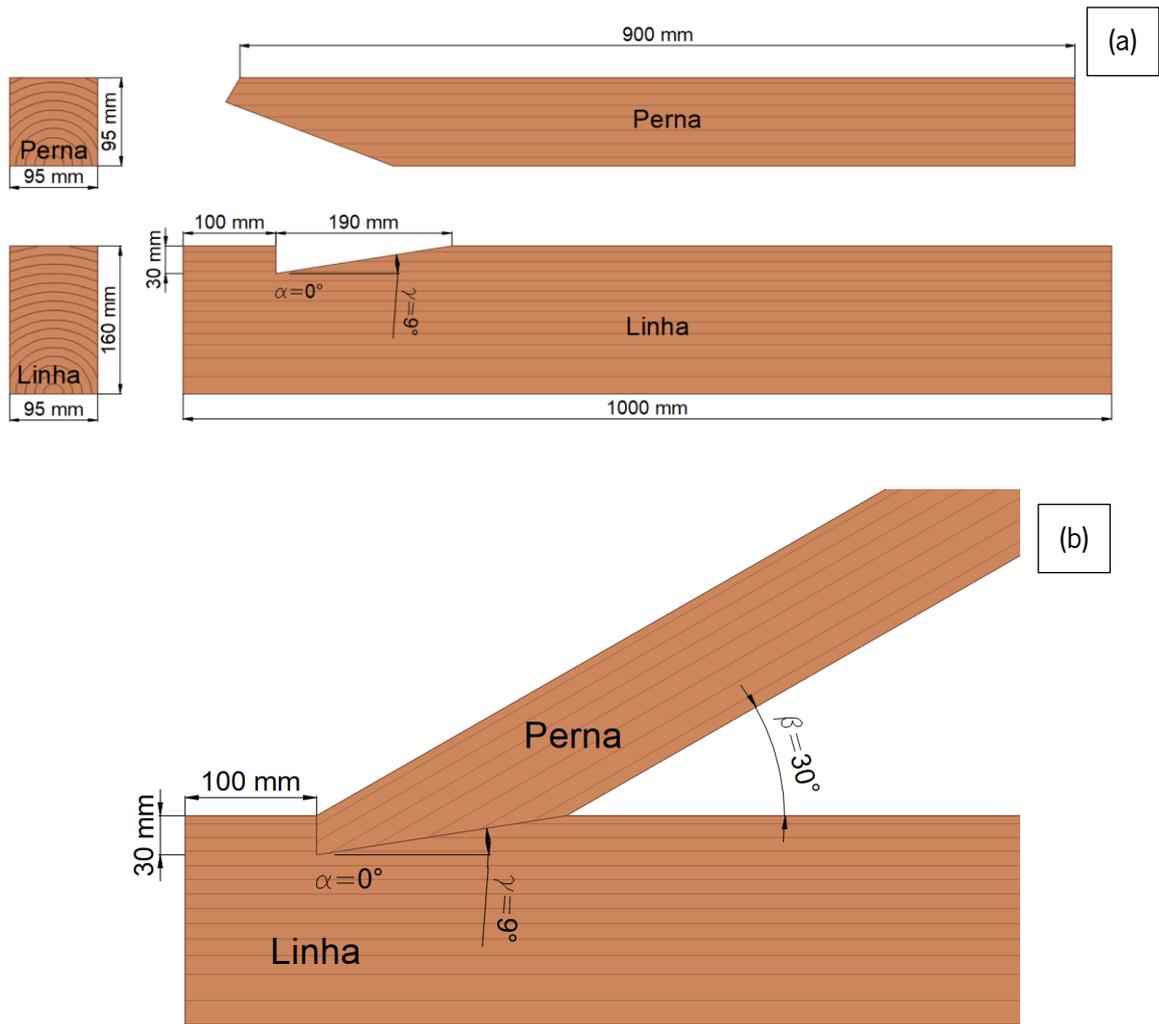


Figura 3.1 - Representação do provete de Ligação de Carpintaria de dente simples (Perna-Linha). (a) dimensões; (b) geometria.

No caso do ensaio de arrancamento perpendicular às fibras, foram utilizados provetes na forma de um paralelepípedo, com dimensões aproximadas de 95mm x 160mm x 100mm (Figura 3.2).

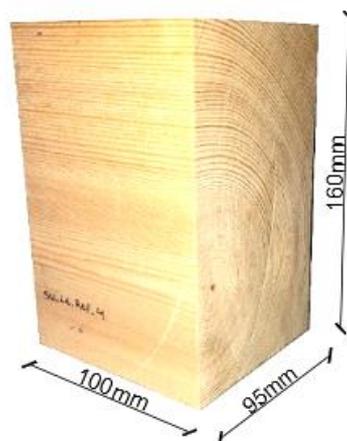


Figura 3.2 – Provette utilizado para o ensaio de arrancamento perpendicular às fibras.

Previamente à realização de todos os procedimentos da campanha experimental, os provetes após corte na carpintaria, foram armazenados na câmara climática em condições controladas, com temperatura de 20 ± 1 °C e humidade relativa de 60 ± 5 %, até serem considerados condicionados. De acordo com a EN 13183 (2002), um provete de madeira é considerado condicionado quando, em duas pesagens consecutivas com intervalo de 2 horas, a diferença entre os resultados for igual ou menor que 0,1%. Nestas condições climáticas, o teor de água de equilíbrio da madeira deve ser de aproximadamente 12% (Cruz & Nunes, 2012).

A determinação do teor de água e da massa volúmica foram realizadas segundo as normas EN 13183 (2002) e NP 616 (1973), respetivamente. O teor de água e a massa volúmica foram medidos logo após a realização dos ensaios destrutivos, de forma a obter os resultados dos parâmetros no momento do ensaio. As amostras para o teor de água foram retiradas da seção transversal mais próxima possível da fratura, conforme recomenda a EN 408 (2010).

A massa volúmica ρ_H em kg/m³, para um determinado valor H de teor de água, foi determinada utilizando-se a equação 3.1.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [3.1]$$

Onde, m_w é a sua massa, em kg, e V_w o seu volume, em m³, ambos para um valor w de teor de água. O teor de água w foi obtido a partir do método gravimétrico, realizando-se pesagens antes e após a secagem a 105°C de amostras retiradas do provete, com a utilização da equação 3.2.

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad [3.2]$$

Onde, m_1 é a massa da amostra antes da secagem e m_2 a massa após a secagem, ambos em g.

Ressalta-se a necessidade de correção dos valores de massa volúmica obtidos para um valor de teor de água de 12% (ρ_{12}), valor estabelecido como referência. A correção é realizada a partir da equação 3.3.

$$\rho_{12} = \rho_w \times \frac{(100 + 12) \times (100 + w\alpha_v)}{(100 + w) \times (100 + 12\alpha_v)} \quad [3.3]$$

Onde, α_v é o coeficiente de retração volumétrica para uma mudança de 1% de teor de água, neste estudo o valor α_v utilizado foi 0,53, recomendado por LNEC (1997a).

3.2.2. Inspeção visual

Com o objetivo de assegurar a qualidade material, procedeu-se à inspeção visual dos provetes, tendo por base um levantamento fotográfico seguido da aplicação do procedimento descrito pela UNE 56544

(2011). A escolha pela norma espanhola deve-se ao facto da madeira utilizada ser de origem espanhola, de Valência, de acordo com a Carpintaria responsável pela produção dos provetes.

A inspeção visual é um procedimento qualitativo de extrema importância para a análise dos resultados quantitativos, servindo como informação crucial para a identificação de *outliers* e na perceção de não conformidades.

Sendo assim, foram devidamente identificados e medidos todos os defeitos e singularidades referidos na norma aplicada, nomeadamente: nós, bolsas de resinas, fendas, inclinação do fio, descaio, empenos e largura dos anéis de crescimento, entre outros.

Para inspeções visuais em peças com as dimensões dos provetes utilizados neste estudo (seção retangular com largura superior a 70mm) a UNE 56544 (2011) define apenas uma classe de qualidade denominada MEG (*Madera Estructural de Gruesa escuadría*).

3.3. Apresentação e discussão dos resultados

3.3.1. Determinação do teor de água e massa volúmica

O teor de água e a massa volúmica foram medidos para todos os provetes submetidos aos ensaios mecânicos, nomeadamente o ensaio à compressão das ligações e o ensaio de arrancamento perpendicular às fibras. Para o ensaio à compressão das ligações, as medições foram realizadas tanto na Perna, como na Linha, totalizando 120 medições. No caso do ensaio de arrancamento, foram medidos os parâmetros para os 24 provetes ensaiados.

Obteve-se um valor médio de teor de água de 12,4% e 11,9% para os provetes submetidos ao ensaio à compressão e ao ensaio de arrancamento, respetivamente. O valor obtido está próximo dos 12% de referência esperados para as condições de armazenamento adotadas. O Quadro 3.1 apresenta o resumo dos resultados dos valores de teor de água.

Quadro 3.1 - Resumo dos valores de teor de água obtidos para os provetes submetidos ao ensaio à compressão e dos provetes submetidos ao ensaio de arrancamento.

Valor	Teor de água (w) - %	
	Provetes do Ensaio à Compressão	Provetes do Ensaio de arrancamento
Nº de provetes	120	24
Médio	12,4	11,9
Mínimo	11,4	11,5
Máximo	14,5	12,2
Desvio padrão (σ)	0,8	0,2
Variância (σ^2)	0,6	0,1
C.V. (%)	6,5	2,0

Em relação à massa volúmica, a média obtida foi de 529 kg/m³ e 553 kg/m³ (ρ_w) e, quando corrigidos para um teor de água de 12 % (ρ_{12}), os valores são 528 kg/m³ e 553 kg/m³ para os provetes submetidos ao ensaio à compressão e ao ensaio de arrancamento, respetivamente. Analisando-se separadamente os elementos de Perna e Linha das ligações, a massa volúmica obtida para os elementos de Perna apresentaram valor médio de 508 kg/m³ e, para os elementos de Linha, 548 kg/m³, ambos já corrigidos para um valor de teor de água de 12% (ρ_{12}). O Quadro 3.2 apresenta o resumo dos resultados dos valores de massa volúmica das ligações submetidas ao ensaio à compressão e dos provetes submetidos ao ensaio de arrancamento perpendicular às fibras, ambas corrigidas para um valor de teor de água de 12% (ρ_{12}).

A norma EN 384 (2016) considera o valor do quinto percentil da amostra como valor característico para a massa volúmica da madeira (ρ_k). No caso do presente estudo, a massa volúmica característica para os provetes submetidos ao ensaio à compressão é 426 kg/m³, enquanto para os provetes do ensaio de arrancamento é 516 kg/m³. De forma geral, considera-se que a casquinha é enquadrada na classe de resistência C24 (EN 338, 2016) e, segundo a EN 338 (2016), as madeiras enquadradas nesta classe de resistência devem possuir massa volúmica característica (ρ_k) igual ou superior a 350 kg/m³. O valor obtido neste estudo é consideravelmente superior ao sugerido pela norma EN 338 (2016), porém, a massa volúmica característica obtida para os provetes do ensaio à compressão vai de encontro aos valores observados por Aira et al. (2014) que, ao caracterizar provetes de casquinha provenientes de

três diferentes regiões da Espanha, obteve resultados iguais a 426,5 kg/m³, 423,3 kg/m³ e 457,2 kg/m³.

Nas Figuras 3.3 e 3.4, apresentam-se os histogramas de massa volúmica corrigida para um valor do teor de água de 12% (ρ_{12}). É possível inferir, através da análise dos histogramas e do Quadro 3.2, que a maior frequência para os provetes das ligações está no intervalo de massa volúmica entre os 530 kg/m³ e 549 kg/m³, apresentando um total de 21 peças, e o valor médio obtido foi 528 kg/m³. Os provetes submetidos aos ensaios de arrancamento apresentaram a maior frequência no intervalo entre os 560 kg/m³ e 569 kg/m³ e valor médio de 553 kg/m³. A Ficha Técnica M4 do LNEC (1997a) indica um valor de massa volúmica para a casquinha de 530 kg/m³, valor próximo ao obtido para os provetes submetidos ao ensaio à compressão e inferior ao dos provetes submetidos ao ensaio de arrancamento. Porém, é importante ressaltar que a massa volúmica da madeira é dependente das características de crescimento da árvore (taxa de crescimento) e apresenta grande variabilidade de acordo com a localização geográfica (Peltola et al., 2009).

Quadro 3.2 - Resumo dos valores de massa volúmica dos provetes submetidos ao ensaio à compressão e dos provetes submetidos ao ensaio de arrancamento, ambos para um teor de água de 12%.

Valor	Massa Volúmica (ρ_{12}) – kg/m ³			
	Provetes submetidos ao ensaio à Compressão			Provetes do ensaio de arrancamento
	Total	Perna	Linha	
Nº de provetes	120	60	60	24
Médio	528	508	548	553
Mínimo	409	409	426	509
Máximo	716	646	716	605
Desvio padrão (σ)	65,5	56,1	68,0	24,8
Variância (σ^2)	4291,5	3147,7	4627,0	612,6
C.V. (%)	12,4	11,0	12,4	4,5

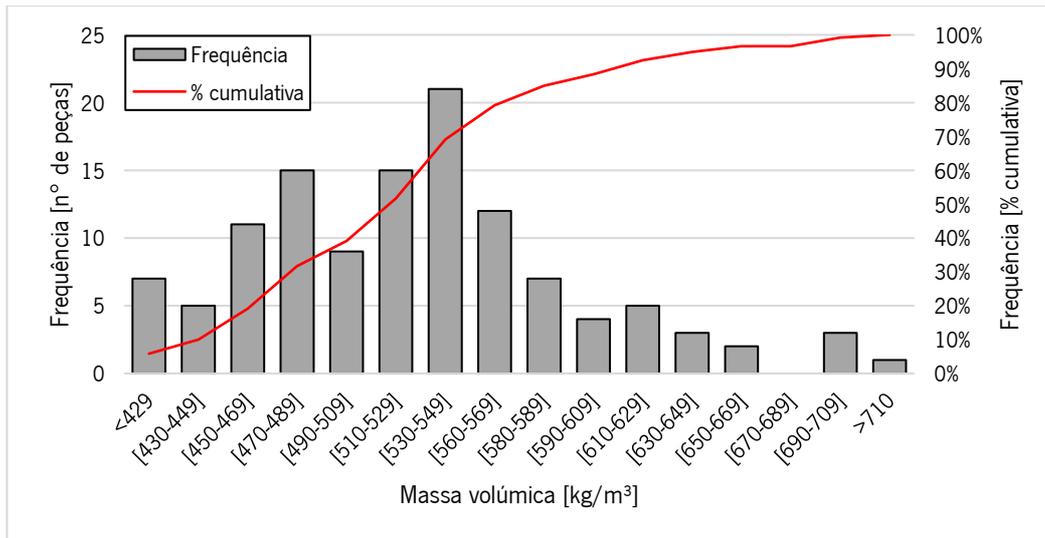


Figura 3.3 - Histograma da massa volúmica corrigida para um teor de água de 12% dos provetes submetidos ao ensaio à compressão.

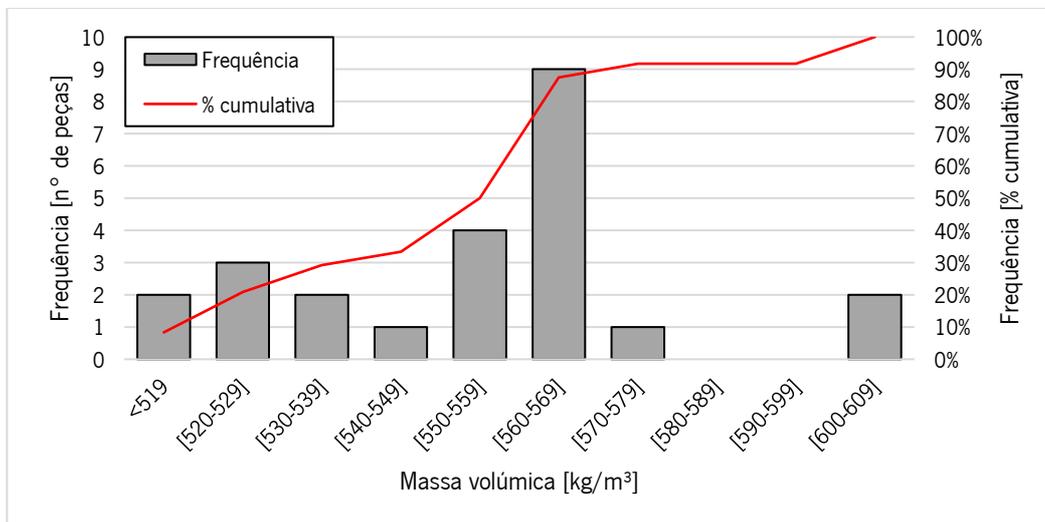


Figura 3.4 - Histograma da massa volúmica corrigida para um teor de água de 12% dos provetes submetidos ao ensaio de arrancamento.

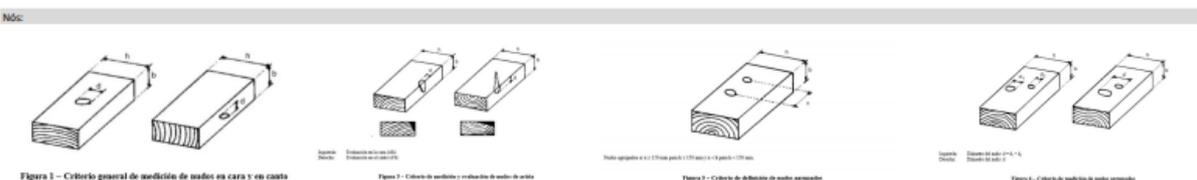
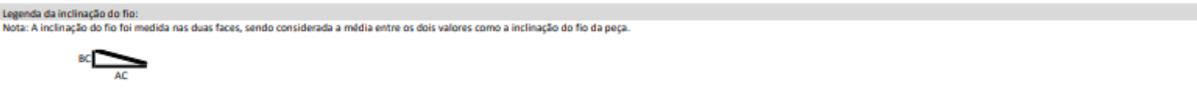
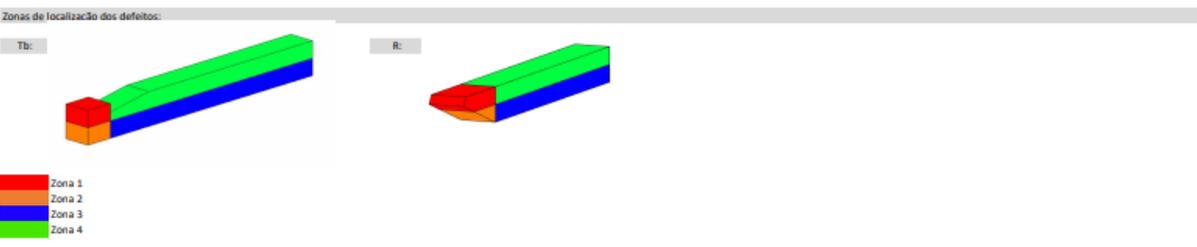
3.3.2. Inspeção visual

O processo de inspeção visual foi documentado em ficheiros Excel, utilizando-se um ficheiro para cada provete inspecionado. Cada ficheiro é subdividido em três folhas, onde a primeira folha contém a legenda das verificações realizadas e informações gerais da inspeção, como o local e data, a norma utilizada, a espécie da madeira e as condições ambientais do local de armazenamento dos provetes. A segunda e a terceira folhas contêm todas as medições e verificações realizadas para a Linha e a Perna, respetivamente. As Figuras 3.5 e 3.6 apresentam um exemplo do levantamento fotográfico e do ficheiro Excel de um dos provetes.



Figura 3.5 - Levantamento fotográfico de um dos provetes de ligação Perna-Linha.

Local: Universidade do Minho - Campus Azurém
 Data: 10/07/2020
 Norma utilizada: UNE 56544: 2011
 Espécie da madeira: *Pinus sylvestris* L.
 Temperatura ambiente (°C): 20 ± 1
 Humidade relativa (%): 60 ± 5



Empenos: não há
 Descalos: não há
 Ataques biológicos e humidade: não há

Ligação: SSJ7
 Elemento adequado para uso estrutural: SIM
 Classificação visual classe: MEG

Dimensões (cm):	Nós						Fendas						Bolsas de resina					
	ID nó	Diâmetro (mm)	Verificação	Zona	ID nó	∑ Diâmetros (mm)	Verificação	ID fenda	Tipo	Abertura (mm)	Comprimento (cm)	Profundidade (mm)	Repassada	Zona	Verificação	ID b. resina	Comprimento (cm)	Verificação
b = 9,5																		
h = 36,0	N _{nó1}	39,75	Verifica	4	N _{nó1} 1 (N _{nó1} 1-N _{nó1} 2)	49,75	Verifica	F _{nda} 1	S	0,68	23,50	11,50	Não	3	Desprezada	BR 1	2,00	Verifica
h1 = 3,0	N _{nó2}	10,00	Verifica	3	N _{nó2} 2 (N _{nó2} 3-N _{nó2} 5)	49,50	Verifica	F _{nda} 2	S	0,62	36,50	13,35	Não	3	Verifica			
L = 100,0	N _{nó3}	21,18	Verifica	3	N _{nó3} 3 (N _{nó3} 6-N _{nó3} 7)	38,23	Verifica	F _{nda} 3	S	0,80	26,00	19,00	Não	2 e 3	Verifica			
l1 = 10,0	N _{nó4}	11,30	Verifica	3														
l2 = 19,9	N _{nó5}	17,02	Verifica	4														
l3 = 70,1	N _{nó6}	20,40	Verifica	4														
Massa (kg):	N _{nó7}	17,83	Verifica	3														
7,31	N _{nó8}	15,00	Verifica	3														
Massa volumica (kg/m³):	N _{nó9}	8,00	Desprezado	3														
499,29	N _{nó10} 1	17,37	Verifica	3														
Teor de água (R):	N _{nó10} 2	23,35	Verifica	3														
13,3	N _{nó10} 3	20,35	Verifica	3														
Larg. anéis de cresc. (cm):																		
0,36																		
Inclinação do fio (cm):																		
Imáx = 16,7%																		
BC = 0,15																		
AC = 24,35																		
I = 0,6%																		
Verificação: Verifica																		

Figura 3.6 - Ficheiro com as verificações da inspeção visual para um dos provetes de ligação Perna-Linha, segundo a UNE56544:2011.

Com a realização da inspeção visual, foi possível identificar uma série de defeitos naturais inerentes à madeira serrada. Os defeitos mais frequentes foram nós e fendas de secagem, porém a maioria encontrava-se fora da região da ligação onde se concentram os esforços atuantes do ensaio. Os provetes que possuíam defeitos relevantes no entalhe foram substituídos, por considerar que tais defeitos impossibilitariam a interpretação dos resultados de forma fiável, enquanto os identificados fora desta região, não foram considerados como relevantes para os resultados. A Figura 3.7 (a) apresenta exemplos de defeitos considerados relevantes para os resultados dos ensaios, enquanto a Figura 3.7 (b) apresenta um exemplo de defeitos considerados não relevantes.

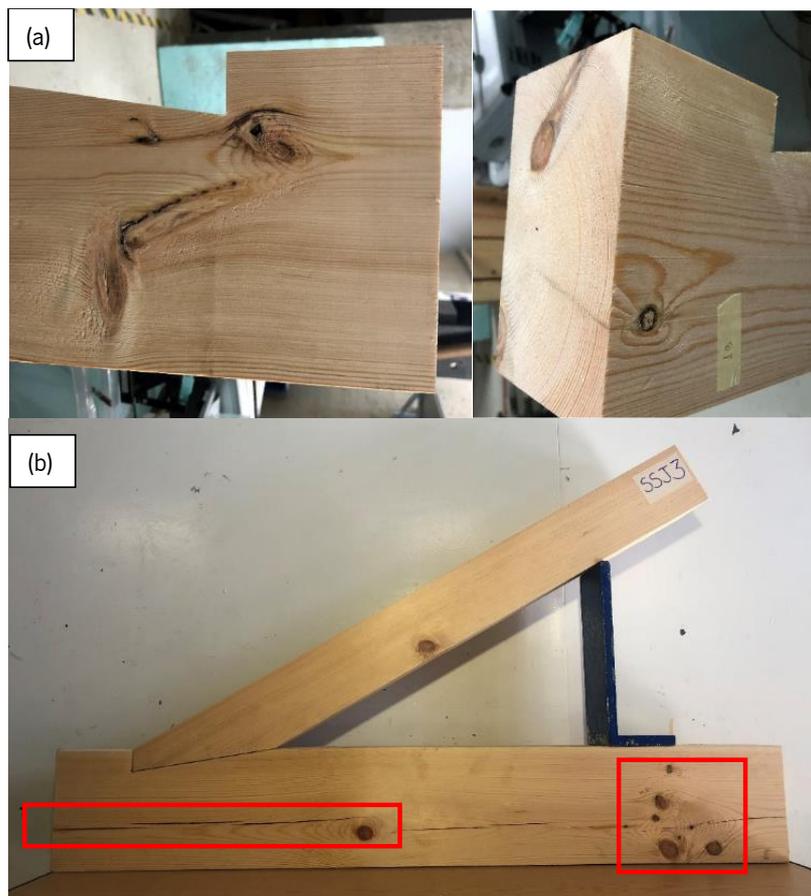


Figura 3.7 - Defeitos detetados durante a inspeção visual. (a) Nós na região do entalhe considerados relevantes para o resultado dos ensaios. (b) Nós e fendas de secagem considerados não relevantes para os resultados dos ensaios.

Todos os provetes submetidos aos ensaios cumprem as verificações estabelecidas na UNE 56544 (2011) e enquadram-se na classe de qualidade MEG (*Madera Estructural de Gruesa escuadría*).

3.4. Conclusões

O presente capítulo teve como objetivo principal a caracterização física e a inspeção visual dos provetes utilizados nos ensaios à compressão e nos ensaios de arrancamento perpendicular às fibras. Para isso,

foram adotados os procedimentos descritos nas normas EN 13183 (2002), NP 616 (1973) e UNE 56544 (2011) para a obtenção do teor de água, da massa volúmica e para a realização da inspeção visual, respetivamente.

No caso do teor de água, obteve-se valores médios de 12,4% e 11,9% para os provetes submetidos ao ensaio à compressão e para os provetes submetidos ao ensaio de arrancamento, respetivamente. Os valores demonstram a compatibilidade da curva higrométrica apresentada na Figura 2.15, que indica um teor de água próximo de 12% para as condições ambientais de armazenamento adotadas neste estudo.

Para a massa volúmica, obteve-se valores médios de 528 kg/m³ e 553 kg/m³, ligeiramente superiores aos observados na literatura, por exemplo em LNEC (1997a) e Aira et al. (2014), porém ainda compatíveis com o que se espera para a espécie de madeira. Ressalta-se neste estudo a elevada variabilidade da madeira, sendo possível observar valores de massa volúmica máxima de 716 kg/m³ e mínima de 409 kg/m³.

Em relação à inspeção visual, garantiu-se que todos os provetes utilizados se enquadrassem na classe de qualidade estabelecida pela UNE 56544 (2011) e que nenhum dos provetes possuíssem defeitos relevantes na região de atuação de esforços durante os ensaios mecânicos.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE LIGAÇÕES PERNA-LINHA DETERIORADAS POR SIMULAÇÃO ARTIFICIAL DE ATAQUE DE INSETOS

Resumo: Apesar de ser um agente biológico recorrente nas madeiras em serviço (tanto em estruturas, quanto em mobiliário), ainda pouco se sabe em relação aos reais efeitos da degradação causada pelo caruncho pequeno. Por outro lado, a espécie *Anobium punctatum* é muitas vezes relacionada com madeiras mais antigas, com sinais de presença de humidade e de fungos de podridão, resultando numa dificuldade ainda maior em quantificar seus danos.

Nesse contexto, o presente capítulo tem o propósito de avaliar a redução da resistência ao corte paralelo às fibras em ligações de carpintaria com dente simples (Perna-Linha) em resultado do ataque de caruncho pequeno, recorrendo-se à simulação artificial da degradação. Adicionalmente, procurou-se validar a utilização de dois métodos semi-destrutivos na avaliação da degradação. O primeiro é baseado na técnica de micro tomografia computadorizada de raios X (μ -XCT) e, o segundo, no ensaio de arrancamento perpendicular às fibras. Portanto, neste capítulo é descrito todo o processo de simulação da degradação por caruncho pequeno e todos os procedimentos de ensaios (métodos), nomeadamente o ensaio à compressão das ligações, a análise μ -XCT e o ensaio de arrancamento. Por fim, são expostos e analisados os resultados obtidos.

4.1. Considerações gerais

O objetivo principal do trabalho descrito neste capítulo é estimar a redução da resistência ao corte paralelo às fibras de Ligações de Carpintaria Perna-Linha (dente simples) resultante do ataque de caruncho pequeno (família Anobiidae) recorrendo à deterioração artificial. Como objetivo secundário, tem-se a quantificação do nível de deterioração a partir de ensaios semi-destrutivos, nomeadamente o ensaio de arrancamento perpendicular às fibras e a micro tomografia computadorizada de raios X (μ -XCT).

Apesar da relativa facilidade de se encontrar elementos estruturais de madeira com sinais de degradação biológica nas construções existentes, uma série de fatores dificulta a sua utilização para fins de investigação. Entre elas, a quantificação do nível de deterioração da peça, a logística envolvida no transporte do elemento até o laboratório e o fato de que, na sua grande maioria, deteta-se mais de um agente biológico, o que impossibilita a quantificação do impacto causado por cada agente isoladamente. Neste contexto, torna-se necessário recorrer a simulações artificiais de deterioração que representem da forma mais próxima possível a ação dos agentes biológicos encontrados *in situ*.

O ensaio de arrancamento é um ensaio semi-destrutivo com possibilidade de ser realizado *in situ*, que permite avaliar, de forma localizada, a massa volúmica da madeira, parâmetro correlacionável com grande parte de suas propriedades mecânicas (Tannert et al., 2014). Estudos como os de Gilfillan & Gilbert (2001) e Parracha et al. (2019) propuseram métodos para se avaliar a deterioração de estruturas de madeira afetadas por carunchos a partir de ensaios de arrancamento.

Sendo assim, é possível afirmar-se que estudos acerca da execução de ensaios de arrancamento *in situ* a partir de equipamentos que possam ser transportados até o local de aplicação são de elevada relevância no âmbito de avaliações de estruturas antigas de madeira. No caso particular do presente trabalho, analisa-se a viabilidade em utilizar-se um equipamento de testes de aderência entre materiais (MATEST Digital pull-off tester E142-01) na execução de ensaios de arrancamento de parafusos em madeiras *in situ*.

Além disso, a técnica de μ -XCT é uma metodologia não destrutiva que tem conquistado espaço no estudo dos materiais através da análise da sua microestrutura interna, tanto a nível qualitativo como a nível quantitativo, através da representação tridimensional de objetos não opacos aos raios-X (Rozenbaum et al., 2016; Maurício et al., 2012).

Estudos, como os desenvolvidos por Fuchs et al. (2004), Himmi et al. (2016) e Kigawa et al. (2009), aplicaram a técnica de μ -XCT na deteção de danos causados por térmitas ou carunchos na madeira,

enquanto Charles et al. (2018) e Parracha et al. (2021) utilizaram esta técnica para quantificar o dano causado por xilófagos marinhos e carunchos, respetivamente.

Em Parracha et al. (2021), observou-se que a avaliação visual de estruturas degradadas pelo ataque de carunchos a partir da quantificação dos furos de saída dos insetos não representa a real degradação no interior da estrutura, principalmente em níveis mais elevados de degradação, sendo a perda de material (consumida pelo caruncho) um parâmetro com melhor correlação com a densidade residual, evidenciando a importância de técnicas que permitem avaliar as condições no interior do elemento, como a μ -XCT. Adicionalmente, em Parracha et al. (2019), a partir de correlações entre a perda de densidade registada a partir da μ -XCT e propriedades mecânicas, como a resistência ao arrancamento perpendicular às fibras e a resistência ao corte paralelo às fibras, foi proposta uma metodologia para se estimar a resistência ao corte paralelo às fibras a partir do ensaio de arrancamento.

No presente estudo, para atingir os objetivos estabelecidos, realizaram-se ensaios mecânicos em provetes de madeira sã (provetes de referência) e em provetes deteriorados artificialmente (com três níveis de deterioração diferentes). Os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST), enquanto a análise com recurso a imagens μ -XCT foi feita no Laboratório de Mineralogia e Petrologia do Instituto Superior Técnico (LAMPIS) da universidade de Lisboa.

Neste capítulo, descreve-se o processo de simulação artificial da degradação causada pela ação de carunchos pequenos e todos os procedimentos e métodos aplicados nas campanhas experimentais. Por fim, os resultados são apresentados e analisados, estabelecendo correlações e comparações com estudos semelhantes.

4.2. Métodos

4.2.1. Simulação da degradação por caruncho pequeno

A simulação da degradação por caruncho pequeno foi realizada a partir de um processo de furação na direção paralela às fibras. As dimensões das galerias perfuradas foram de aproximadamente 2 mm de diâmetro e 100 mm de extensão, uma vez que o caruncho pequeno, normalmente, faz galerias circulares de 1 a 3 mm de diâmetro (Cruz & Nunes, 2012) e o comprimento do corte do entalhe é de 100 mm.

Duas configurações foram definidas para as zonas a serem degradadas: degradação tanto na Perna como na Linha e degradação apenas na Linha, conforme ilustra a Figura 4.1.

As configurações das zonas de degradação foram adotadas por duas razões. A primeira, pelo fato do caruncho atacar preferencialmente o borne e, a segunda, pelo objetivo do estudo, que visa analisar a perda de resistência ao corte da ligação. A última é, também, a justificativa para a configuração da simulação apenas na Linha, enquanto a configuração com simulação em ambos elementos foi adotada por ser aquela que mais se assemelha ao que ocorre na prática, em condições de obra.

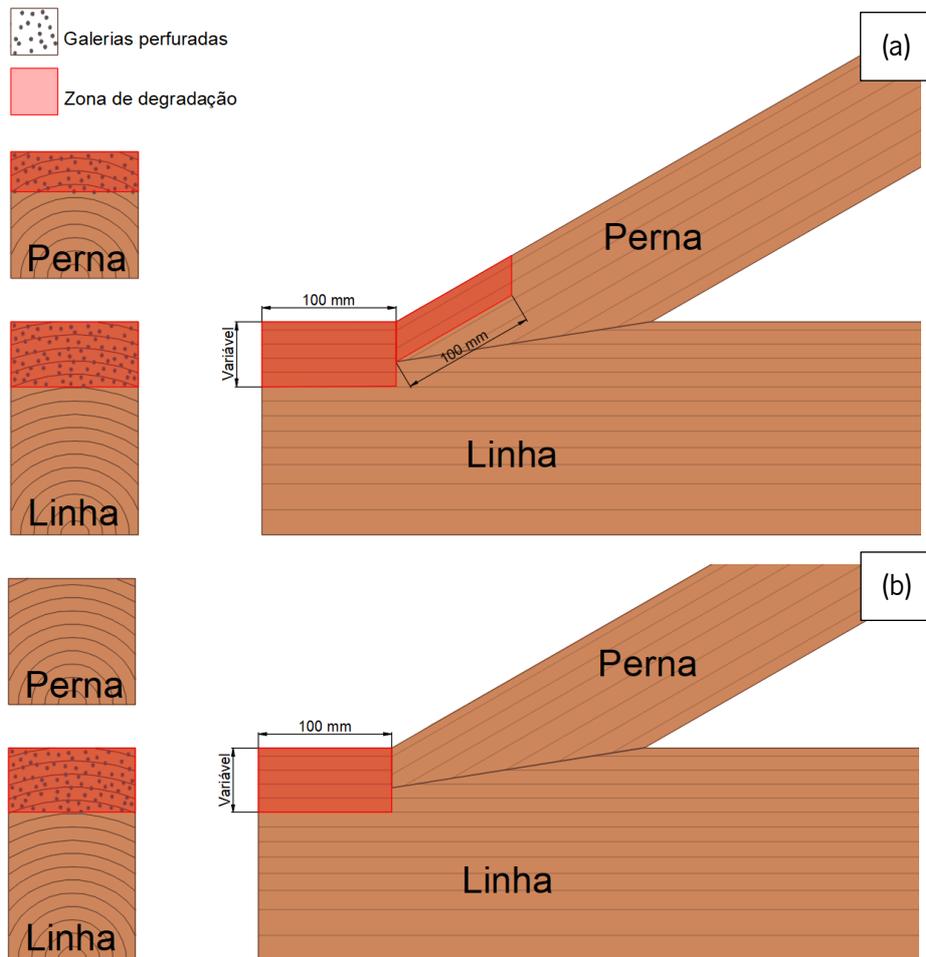


Figura 4.1 - Zonas de simulação da degradação. (a) degradação na Perna e na Linha; (b) degradação apenas na Linha.

Determinou-se que seriam realizados três níveis diferentes de degradação variando-se a densidade das galerias perfuradas (furos/cm²). A simulação procurou atingir níveis de degradação realistas e compatíveis com estruturas degradadas encontradas *in situ*. Verbist et al. (2020), ao realizar ensaios de compressão perpendicular às fibras em vigas de castanho (*Castanea sativa Mill.*) degradadas por caruncho, obteve valores de perda de densidade entre 2,44% e 14,69%. Enquanto, Parracha et al. (2021) ao quantificar a perda de densidade a partir da análise de imagens μ -XCT de amostras retiradas de vigas de pinho bravo (*Pinus pinaster Ait.*), obteve valores entre 9,2% e 21,9%. Portanto, para a determinação das densidades de galerias, recorreu-se a simulações prévias em provetes cúbicos com dimensões (100

x 100 x 100) mm³, procurando definir a maior densidade de furação possível de ser realizada, para assim, utilizá-la como o nível de degradação mais alto e, a partir dela, definir os outros dois níveis inferiores. Os três níveis de degradação adotados neste estudo têm densidades correspondentes a 1,67 furos/cm², 3,33 furos/cm² e 4 furos/cm², denominadas ML-I, ML-II e ML-III, e com perdas de massa esperadas de 5,2%, 10,5% e 12,6%, respectivamente. A perda de massa esperada foi calculada considerando-se o material perdido a partir das dimensões das galerias e a densidade de furação. A quantificação da degradação artificial foi realizada a partir de medições da massa do provete antes e após a perfuração das galerias, obtendo-se a perda de massa relativa à zona degradada.

4.2.2. Micro tomografia computadorizada de raios X (μ -XCT)

O procedimento padrão de uma Micro tomografia computadorizada de raios X segue, em geral, seis passos (Figura 4.2). São eles (Parracha et al., 2021): (1) Seleção/Preparação das amostras, (2) Aquisição, (3) Reconstrução, (4) Tratamento das imagens, (5) Análise, e (6) Interpretação. Neste estudo, o procedimento padrão foi aplicado com o objetivo de quantificar a perda de massa volúmica causada pelo processo de degradação artificial, procurando validar os resultados obtidos na pesagem dos provetes e reafirmar a técnica de μ -XCT na quantificação da degradação por insetos em estruturas de madeira.

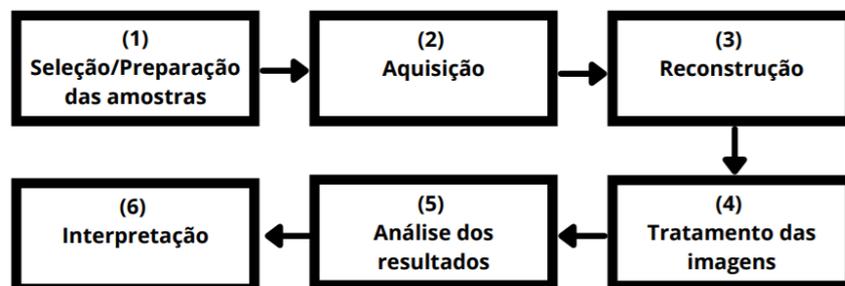


Figura 4.2 - Esquema do procedimento usual aplicado nos processos de micro tomografia computadorizada de raios-X (μ -XCT) (Parracha et al., 2021).

4.2.2.1. Seleção/Preparação das amostras

As amostras para a realização do estudo foram retiradas dos talões, degradados artificialmente, dos provetes de ligações Perna-Linha (descritos na seção 4.2.1), que foram submetidos ao ensaio à compressão (descrição do ensaio na seção 4.2.3 e resultados na seção 4.3.3). Após a realização dos ensaios à compressão, quatro talões de cada nível de degradação (ML-I, ML-II e ML-III) foram selecionados de forma aleatória, totalizando doze amostras, cada uma com dimensões aproximadas de (30x20x10) mm³ e extraídas do centro do talão. A Figura 4.3 apresenta um exemplo de um talão utilizado para a extração e as doze amostras utilizadas neste estudo.



Figura 4.3 - Seleção/preparação das amostras para a μ -XCT. (a) Talão resultante do ensaio à compressão (rotura por corte paralelo às fibras do talão); (b) Local de retirada da amostra no talão; (c) Amostras extraídas do centro do talão.

4.2.2.2. Aquisição

O equipamento utilizado para a aquisição das radiografias foi um scanner micro-CT Skyscan 1172 – 1.3 Mpix, (Brucker Instruments). O processo consiste em colocar-se a amostra num suporte, de forma que permaneça estática em relação ao suporte, enquanto o suporte faz um movimento de rotação em torno do seu eixo vertical fixo (Maurício et al., 2010). A qualidade das imagens geradas pelo equipamento é dependente de um conjunto de parâmetros que devem ser ajustados de acordo com o material/dimensões das amostras e os resultados desejados, por exemplo, a redução do ângulo de rotação e o aumento do número de imagens inevitavelmente aumentará a qualidade da aquisição,

porém, o tempo para que o processo seja concluído pode aumentar de tal forma que não justifique esse acréscimo na qualidade.

Os parâmetros que precisaram ser definidos são: Resolução máxima, Voltagem, Intensidade de corrente, Ângulo de rotação, Número de imagens, Filtros, Tamanho do Voxel e Tamanho do ficheiro. Para esse estudo, foram adotadas as definições utilizadas em Parracha et al. (2019), uma vez que se trata do mesmo equipamento, além das amostras serem do mesmo material e com dimensões semelhantes. O Quadro 4.1 apresenta as definições dos parâmetros adotados neste estudo.

Quadro 4.1 - Resumo dos parâmetros definidos para a aquisição.

Parâmetro	
Resolução máxima – 2 μm	Número de imagens – 288
Voltagem – 60 kV	Filtros – A1 0.5 mm
Intensidade de corrente – 165 μA	Tamanho do Voxel – 18.09 μm
Ângulo de rotação – 0.7°	Tamanho do ficheiro – 16-bit

4.2.2.3. Reconstrução

O principal objetivo da Reconstrução é transformar as radiografias (em formato 2D) num objeto 3D. Neste estudo, o software NRecon, fornecido pela empresa Brucker, foi utilizado para a realização deste processo.

Assim como no processo de aquisição, é necessário definir um conjunto de *settings* que influenciam diretamente na qualidade do objeto reconstruído. O *software* NRecon permite o ajuste de três parâmetros de reconstrução: *smoothing*, *beam-hardening factor correction* e *ring artefact reduction*. Assim como na aquisição, os *settings* para a Reconstrução foram definidos de acordo com o utilizado por Parracha et al. (2019) e são apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Resumo dos parâmetros definidos para a reconstrução.

Parâmetro
<i>Smoothing</i> – Width; 3 pixels
Beam-hardening factor correction – 30-50%
Ring artefact reduction – ≈ 20

Após a reconstrução, foi necessário realizar ajustes no alinhamento das imagens e escolher o plano de visualização que foi utilizado durante a análise do objeto. O software Data Viewer foi utilizado para essa função, e nele é possível escolher entre 3 eixos: coronal – plano x-y; sagital – plano x-z; transaxial – plano y-z (Figura 4.4).

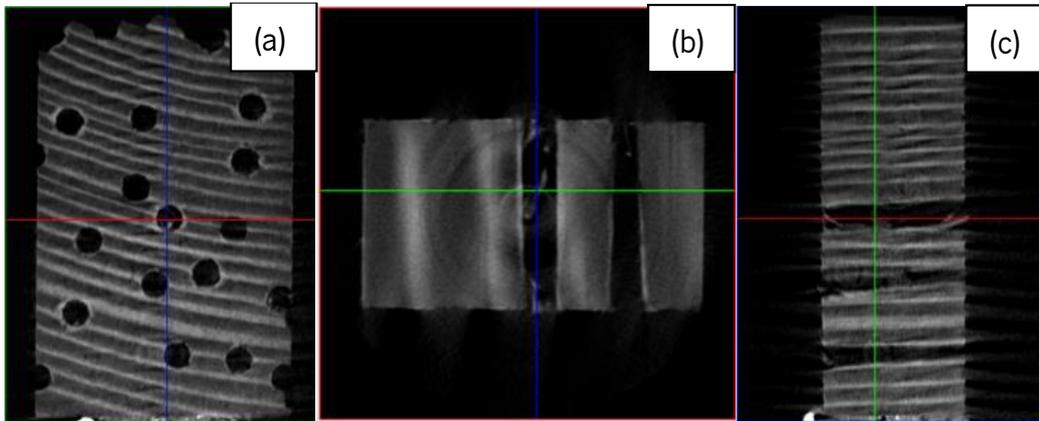


Figura 4.4 - Visualização das imagens 2D do objeto reconstruído através do programa Data Viewer. (a) Plano coronal; (b) Plano sagital; (c) Plano transaxial.

Além disso, o programa CTVox permite a visualização do objeto 3D reconstruído (Figura 4.5), permitindo detetar possíveis falhas nas etapas anteriores e servindo como material auxiliar no tratamento e análise das imagens, facilitando a identificação de ruídos e artefactos.

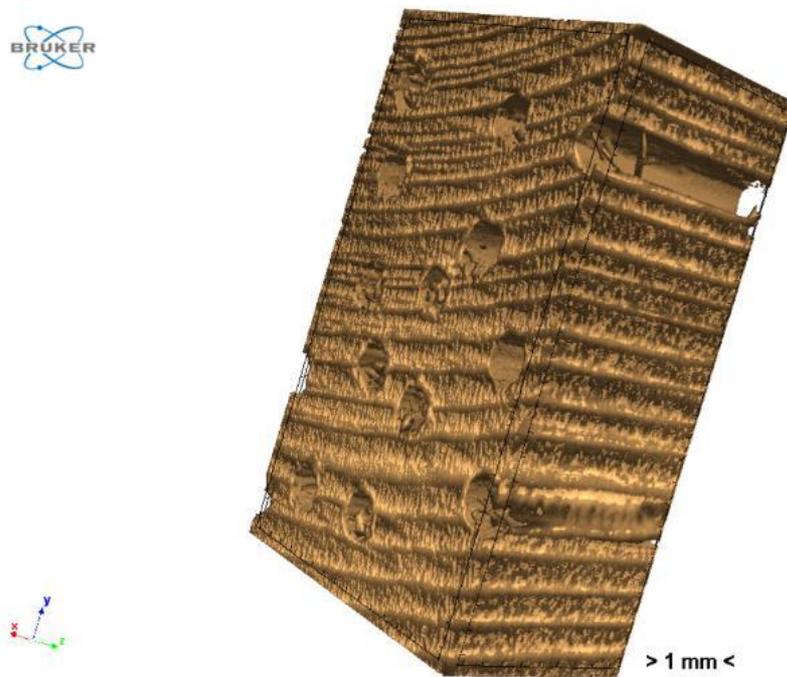


Figura 4.5 - Visualização 3D do objeto reconstruído através do programa CTVox.

4.2.2.4. Tratamento/Análise

Após a etapa de reconstrução, é necessário definir o Volume de Interesse (VOI) a ser analisado e transformar as imagens geradas em 256 escalas de cinza em imagens binárias mais simples, eliminando todos os ruídos e artefactos. O tratamento e a análise das imagens foram realizados através do programa CTan.

Para cada amostra, foi definido um VOI na forma de um paralelepípedo regular, procurando cobrir o máximo possível a superfície da amostra. Foi necessário eliminar uma porção das bordas dos objetos ao se definir o VOI por essa ser uma região que apresenta maior número de ruídos e artefactos, facilitando assim, o tratamento das imagens. Em relação ao tratamento, é importante ressaltar que, para eliminar os ruídos e artefactos remanescentes das etapas de aquisição e reconstrução, foi necessário definir o conjunto de tarefas que eliminassem a maior quantidade e interferissem o menos possível nas partes em que não é desejável eliminar, gerando o menor erro associado ao processo. Para isso, foi realizada uma análise por tentativa e erro, de forma a se definir o algoritmo a ser utilizado pelo programa. As tarefas realizadas pelo software CTan para obtenção das imagens a serem analisadas são resumidas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Algoritmo definido para o tratamento das imagens.

Parâmetro	Descrição	Setting utilizado
<i>Filtering</i>	Remove ruído das imagens, reduzindo-o.	Gaussian blur; 2D space; Kernel Round; Radius 1-2
<i>Thresholding</i>	Faz uma segmentação por forma a transformar imagens numa escala de cinzentos em imagens binárias.	Global; Variable
<i>Morphological operations</i>	Preenche os orifícios e fecha/abre poros existentes.	Opening; 2D space; Kernel hexagonal; Radius 2-4
<i>Despeckle</i>	Remove os <i>speckles</i> das imagens binárias.	Remove white speckles; 2D space; less than; 700 pixels

Por fim, duas análises distintas foram realizadas. A primeira está relacionada ao VOI, onde o objetivo é apenas obter o seu volume total (volume de madeira e vazios). A segunda análise foi realizada para obter o volume dos vazios (furos), o volume do serrim e das fibras partidas no interior dos furos. Para a segunda análise, foi necessário utilizar a função ROI shrink-wrap. Esta função limita a região de interesse (ROI) a um objeto binário, neste caso, um furo. Assim, o volume total da madeira, o volume de vazios e o volume

de madeira estrutural (desconsiderando o serrim e as fibras partidas dentro dos furos) são obtidos pela função de Análise 3D do software CTan. A Figura 4.6 ilustra o processo descrito acima.

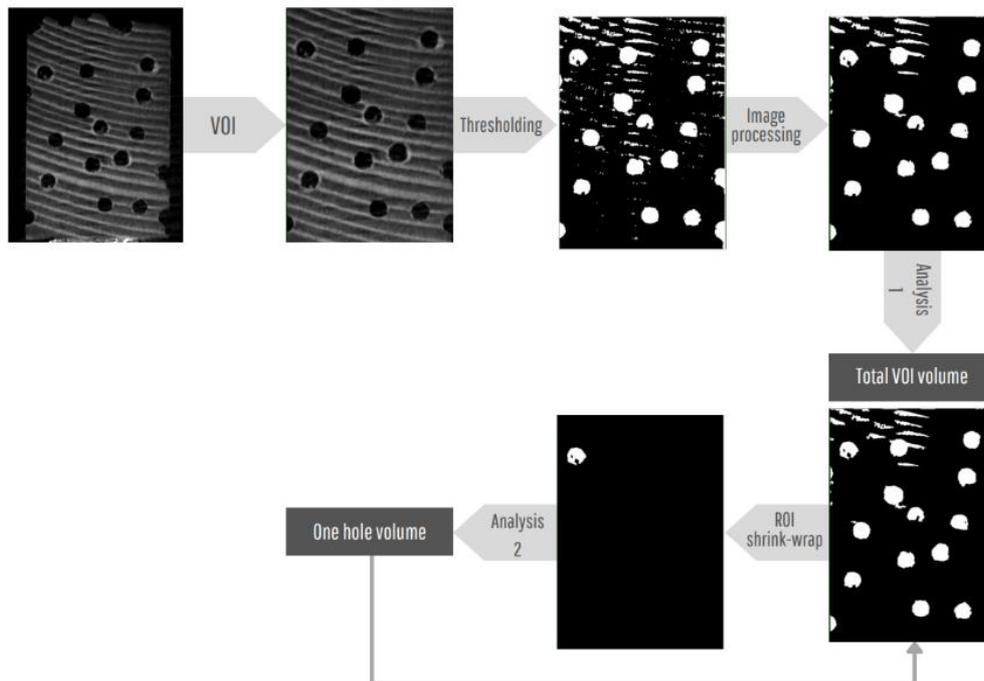


Figura 4.6 - Método de análise adotado no programa CTan para a quantificação do volume de madeira e vazios.

4.2.3. Ensaio à compressão das ligações

Após a realização da simulação artificial da degradação da madeira, os provetes das ligações foram ensaiados à compressão. Para roturas causadas por forças de compressão axial na Perna em ligações de carpintaria (Perna-Linha) são considerados dois possíveis modos: esmagamento por compressão paralelo às fibras na superfície frontal e falha por corte paralelo às fibras no entalhe (Verbist et al., 2017). Além disso, Branco et al. (2018) considera que, em casos específicos, a falha por esmagamento perpendicular às fibras na base linha que faz contato com a alvenaria de suporte e a falha por corte deslizante (*rolling shear*) na linha possam ocorrer. Verbist et al. (2017), ao conduzir ensaios de compressão em ligações de carpintaria com dente simples (Perna-Linha) com o intuito de se comparar resultados experimentais com as equações de projeto usualmente encontradas na literatura, concluiu que em ligações com ângulo de inclinação entre a Perna e a Linha baixo ($\beta=30^\circ$), com reduzida proporção entre a profundidade do dente e comprimento de corte do entalhe ($lv/tv \leq 6$) e com dente perpendicular às fibras da linha, a rotura tende a ocorrer por corte paralelo às fibras na Linha. Portanto, ao considerar a geometrias das ligações utilizadas nesta campanha experimental, é de esperar que os provetes rompam por corte paralelo às fibras.

O ensaio destrutivo consiste na aplicação de uma carga normal (N_{Rafter}) na Perna (compressão paralela às fibras), à uma velocidade de aplicação de 0,01 mm/s controlada pelo deslocamento do atuador, resultando em esforços de compressão nas superfícies do entalhe da ligação (compressão paralela às fibras na superfície frontal e perpendicular às fibras na superfície inferior) e esforços de corte no talão do entalhe (ver Figura 4.7).

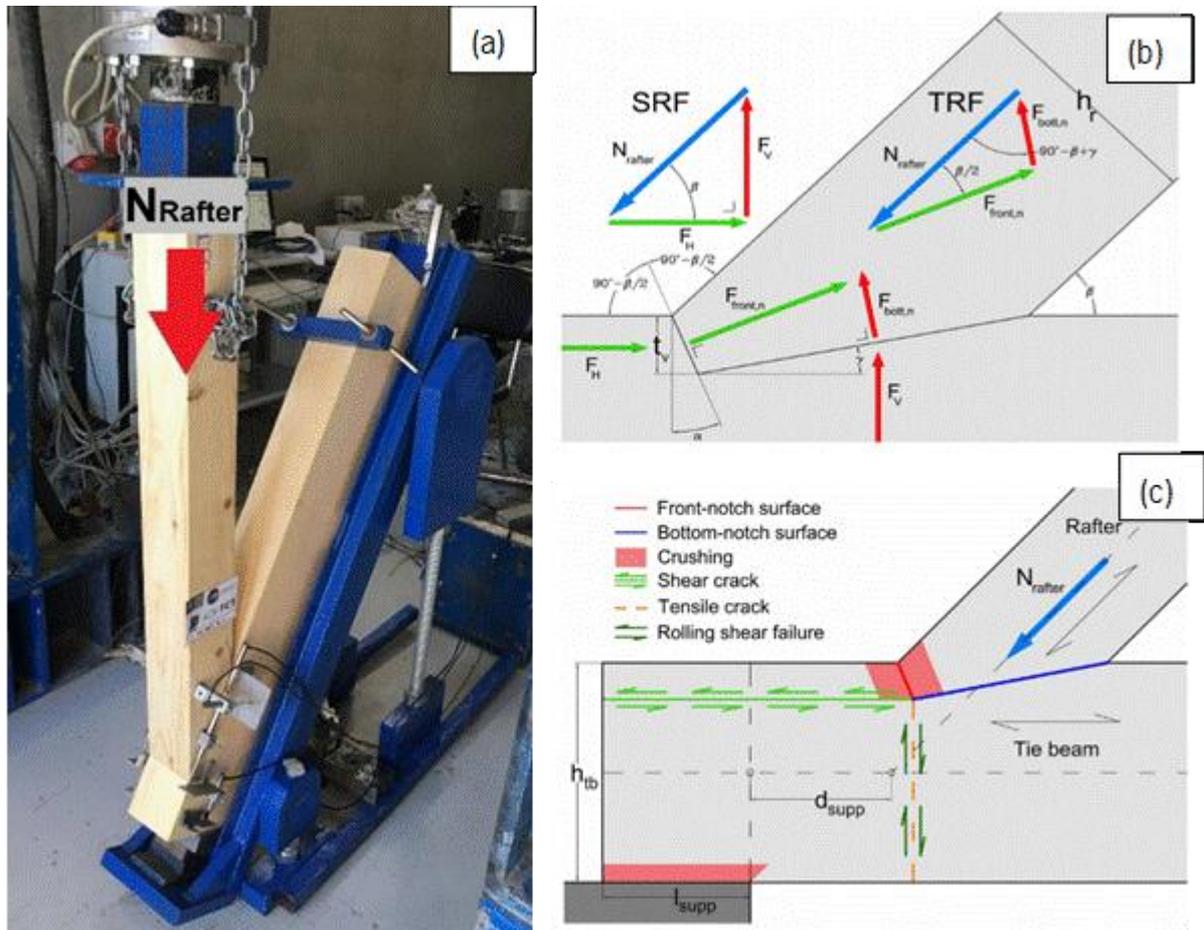


Figura 4.7 - Ensaio à compressão. (a) Aplicação da carga de compressão na perna (N_{Rafter}); (b) Esquema da distribuição dos esforços; (c) Ilustração dos possíveis modos de rotura da ligação (Verbist et al., 2017; Branco et al., 2018).

Para o registo dos deslocamentos, foram utilizados sete LVDTs (Linear Variable Displacement Transformer), conforme ilustra a Figura 4.8:

- um LVDT para o controle do deslocamento do atuador;
- dois LVDTs para o registo do deslocamento devido à compressão perpendicular às fibras (esmagamento na superfície inferior);
- dois LVDTs para o registo do deslocamento devido à compressão paralela às fibras (esmagamento na superfície frontal);
- dois LVDTs para o registo do deslocamento devido ao corte no talão do entalhe.

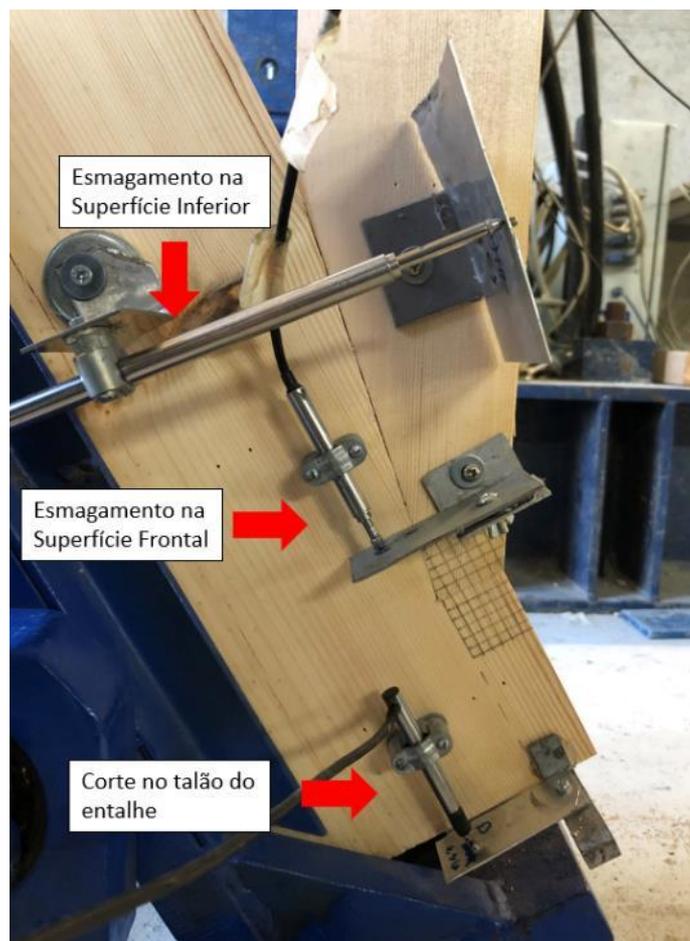


Figura 4.8 - Registo dos deslocamentos com recurso a LVDTs.

Ao todo, foram ensaiadas 60 ligações Perna-Linha, sendo 6 ligações de madeira sã (referência) e nove ligações de cada configuração de degradação (Figura 4.1) para os três níveis de degradação considerados, totalizando sete grupos distintos, conforme apresenta o Quadro 4.4. Além disso, devido a falta de espaço para armazenamento, os provetes foram entregues e ensaiados em três lotes separados, contendo 20 provetes em cada lote.

A partir dos resultados do ensaio à compressão das ligações, a resistência ao corte paralelo às fibras (τ) é calculada com a equação 4.1.

$$\tau = \frac{N_{rafter} \times \cos \beta}{l_v \times b} \quad [4.1]$$

Onde, N_{rafter} é a força de compressão registada pelo atuador no momento da rotura, β é o ângulo entre a Perna e a Linha, l_v é o comprimento de corte e b é a largura do provete.

Quadro 4.4 - Resumo da distribuição dos provetes nas diferentes localização e níveis da degradação para o ensaio à compressão.

Grupo de provetes	Quantidade por lote	Quantidade total	Localização da degradação	Nível de degradação (furos/cm ²)
SSJ_REF	2	6	-	-
SSJ_ML-I_Tb	3	9	Perna	1,67
SSJ_ML-II_Tb	3	9	Perna	3,33
SSJ_ML-III_Tb	3	9	Perna	4,00
SSJ_ML-I_Tb-R	3	9	Perna e Linha	1,67
SSJ_ML-II_Tb-R	3	9	Perna e Linha	3,33
SSJ_ML-III_Tb-R	3	9	Perna e Linha	4,00

Legenda: SSJ – *Single Step Joint*; REF – Referência; ML-I – *Mass Loss I* (nível de degradação I); ML-II – *Mass Loss II* (nível de degradação II); ML-III – *Mass Loss III* (nível de degradação III); Tb – *Tie Beam* (degradação na Perna); Tb-R – *Tie Beam -Rafter* (degradação na Perna e na Linha)

4.2.4. Ensaio de arrancamento perpendicular às fibras

O ensaio de arrancamento na direção perpendicular às fibras foi realizado conforme as recomendações da norma EN 1382 (2016). Neste ensaio foi utilizado um parafuso com diâmetro nominal de 6 mm e adotou-se uma penetração de 20 mm. Não se efetuou distinção entre os planos radial e tangencial, uma vez que não foram constatadas diferenças relevantes nos resultados obtidos por Gilfillan & Gilbert (2001). Foram realizados ensaios em provetes de madeira sã, e com dois níveis de degradação diferentes, denominados ML-I e ML-III, em referência à degradação descrita na seção 4.2.1. Além disso, foram realizados ensaios com dois equipamentos distintos. O primeiro, denominado Equipamento Fixo, que se refere ao pórtico de ensaios fixo (Lloyd LR50KPlus) no qual o macaco hidráulico está ligado a uma célula de carga com uma capacidade máxima de 50 kN, enquanto o segundo, denominado Equipamento Móvel, refere-se ao equipamento portátil MATEST Digital pull-off tester E142-01 (Figura 4.9). Optou-se por utilizar os dois métodos de forma a verificar a exequibilidade de ensaios *in situ* com o Equipamento Móvel, uma vez que se trata de um equipamento para realizar ensaios de *pull-off*, em diferentes materiais e em condições laboratoriais.

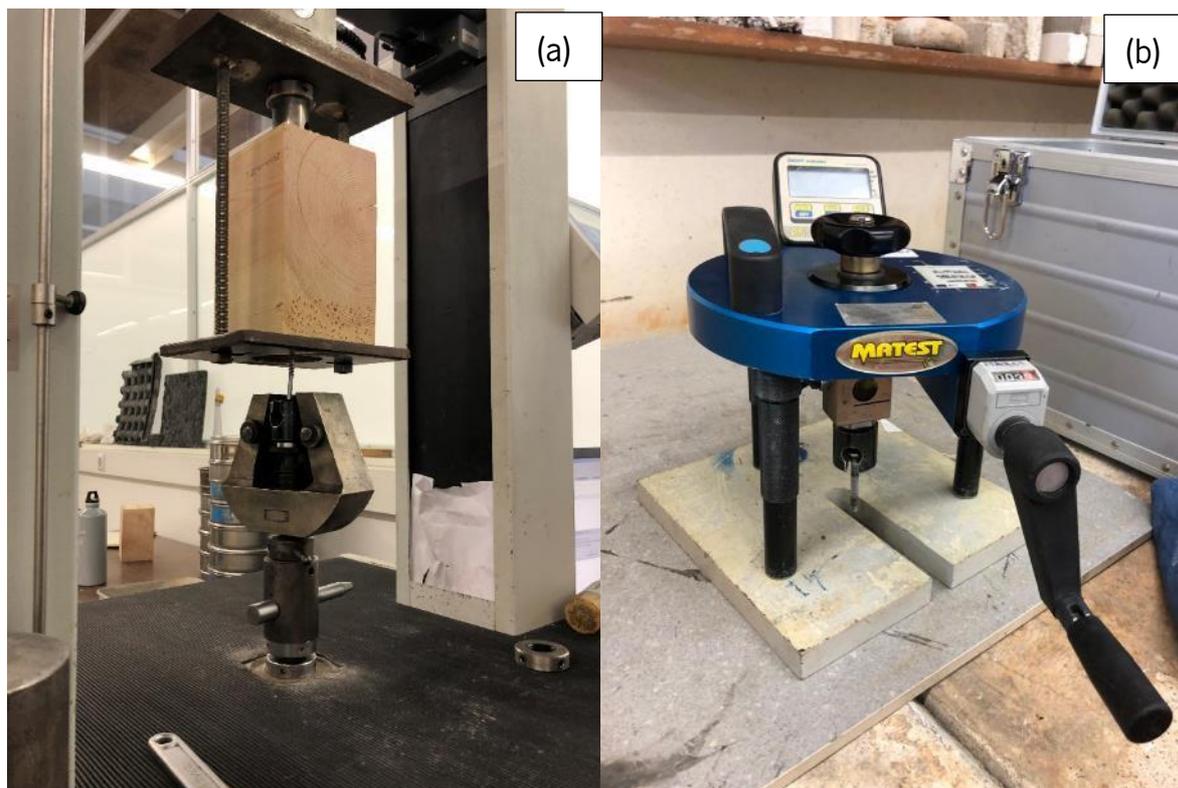


Figura 4.9 - Ensaio de arrancamento perpendicular às fibras. (a) Equipamento Fixo Lloyd LR50KPlus; (b) Equipamento móvel MATEST Digital pull-off tester E142-01.

O objetivo principal deste ensaio é obter correlações entre a resistência ao arrancamento perpendicular às fibras, a massa volúmica residual e o nível de degradação por ataque de caruncho pequeno, a partir de uma técnica simples, semi-destrutivo e aplicável *in situ*.

Ao todo, foram realizados 84 ensaios em 24 provetes, sendo 36 utilizando o Equipamento Fixo e 48 usando o Equipamento Móvel. A maior flexibilidade proporcionada pelo Equipamento Móvel permitiu a realização de 4 arrancamentos por provetes, enquanto no Equipamento Fixo foram realizados 3 arrancamentos por provete. O Quadro 4.5 apresenta a nomenclatura adotada durante os ensaios, bem como a quantidade de ensaios realizados, o equipamento utilizado e o nível de degradação. O cálculo da resistência ao arrancamento foi realizado a partir da equação 4.2 (EN 1382, 2016).

$$f = \frac{F_{m\acute{a}x}}{d_i \times l_p} \quad [4.2]$$

Onde, $F_{m\acute{a}x}$ é o valor da força máxima de arrancamento do parafuso, l_p a profundidade de penetração do parafuso no elemento de madeira e d_i o diâmetro interno do parafuso.

Quadro 4.5 - Resumo da distribuição dos provetes para os diferentes níveis de degradação e equipamento usado no ensaio de arrancamento perpendicular às fibras.

Provete	N.º de provetes	N.º de arrancamentos	Equipamento	Nível de degradação (furos/cm ²)
SW_LE_REF	4	12	Fixo	-
SW_LE_ML-I	4	12	Fixo	1,67
SW_LE_ML-III	4	12	Fixo	4,00
SW_ME_REF	4	16	Móvel	-
SW_ME_ML-I	4	16	Móvel	1,67
SW_ME_ML-III	4	16	Móvel	4,00

Legenda: SW – *Screw Withdrawal*; LE – *Laboratory Equipment* (Equipamento Fixo); ME – *Manual Equipment* (Equipamento Móvel); REF – Referência; ML-I – *Mass Loss I* (nível de degradação I); ML-III – *Mass Loss III* (nível de degradação III);

4.3. Apresentação e discussão dos resultados

4.3.1. Simulação da degradação

Tal como referido anteriormente na seção 4.2.1, foram realizados furos com uma broca de diâmetro de 2 mm e 100 mm de extensão com 3 densidades de furação nos provetes submetidos ao ensaio à compressão e 2 densidades nos submetidos ao ensaio de arrancamento. O Quadro 4.6 apresenta a perda de massa relativa à área degradada para cada nível de degradação.

Quadro 4.6 - Resumo da perda de massa dos provetes relativa à área degradada artificialmente.

Valor	Perda de massa dos provetes (%)				
	Provetes do Ensaio à Compressão			Provetes do Ensaio de arrancamento	
	ML-I	ML-II	ML-III	ML-I	ML-III
Nº de provetes	18	18	18	8	8
Médio	4,4%	8,1%	8,6%	3,1%	6,7%
Mínimo	2,4%	4,6%	5,7%	2,8%	6,2%
Máximo	8,2%	15,8%	16,1%	3,3%	7,2%
Desvio padrão (σ)	1,83%	3,02%	3,05%	0,2%	0,3%
Variância (σ^2)	0,03%	0,09%	0,09%	0,0003%	0,001%
C.V. (%)	41,7%	37,1%	35,6%	5,5%	5,1%

Ao considerar as densidades de furos e a dimensão dos mesmos (seção 4.2.1.), era espectável uma perda de massa de 5,2% para o nível ML-I, 10,5% para o nível ML-II e 12,6% para o nível ML-III. É possível inferir através da análise do Quadro 4.6 que os valores médios obtidos no processo de simulação da degradação foram abaixo do esperado. Porém, é importante ressaltar que os valores esperados para a perda de massa foram calculados considerando-se um material homogêneo, com furos regulares (dimensão e direção) e desconsiderando-se a presença de serrim no interior dos furos. A Figura 4.10 apresenta os furos de entrada e os furos de saída de seis dos provetes submetidos ao ensaio à compressão, que ilustra os desvios sofridos pelos furos ao longo de sua extensão apresentando uma distribuição aleatória na face de saída.



Figura 4.10 - Simulação da degradação por caruncho. (a) Furos de entrada; (b) Furos de saída.

Sendo assim, a análise da perda de massa através da micro tomografia computadorizada de raios X será utilizada para a verificação da fiabilidade da perda de massa apresentada nos provetes submetidos ao ensaio a compressão, uma vez que a dimensão estrutural do provete, assim como a presença de serrim e fibras partidas no interior dos furos podem ter tido influência nos valores obtidos a partir da pesagem dos provetes.

4.3.2. Micro tomografia computadorizada de raios X (μ -XCT)

Após todo o processo inerente à μ -XCT, descrito na seção 4.2.2, foi possível exportar do programa CTan os resultados de cada amostra. Neste estudo, os parâmetros de interesse a serem extraídos do relatório do programa são o volume total da amostra, o volume dos furos e o volume de madeira remanescente no interior dos furos em forma de serrim e fibras partidas (volume de madeira não estrutural). A partir destes parâmetros, torna-se possível calcular a proporção em volume de madeira estrutural, madeira não estrutural e vazios em relação ao volume de interesse total da amostra.

Neste estudo, considerou-se a madeira como um material homogêneo, o que leva a assumir que as proporções calculadas em volume refletem as mesmas proporções em massa volúmica.

Além disso, foi calculada a perda de massa teórica de cada amostra a partir da quantidade de furos presente na mesma. Para a perda de massa teórica, foram considerados furos homogêneos de 2 mm de diâmetro e com a extensão total da amostra. A perda de massa teórica foi calculada a partir da equação 4.3.

$$ML_t = \frac{\pi d_f^2}{4} \times l_f \times n_f \times 100 \quad [4.3]$$

Onde, d_f é o diâmetro do furo (2 mm), l_f é a espessura da amostra, n_f é o número de furos na amostra e V_t é o volume total da amostra.

O Quadro 4.7 apresenta os resultados de perda de massa obtidos na análise μ -XCT ($ML_{\mu-XCT}$), a perda de massa teórica de cada amostra ($ML_{t,a}$) obtida a partir da equação 4.3, a perda de massa obtida a partir da pesagem dos provetes antes e após a perfuração das galerias (ML_g) e, por fim, a perda de massa teórica para o provete considerando as densidades de furação (1,66 furos/cm², 3,33 furos/cm² e 4,00 furos/cm²) ($ML_{t,p}$).

Quadro 4.7 - Valores de perdas me massa.

Amostra	$ML_{\mu-XCT}$	$ML_{t,a}$	ML_g	$ML_{t,p}$
ML-I_Tb_4	4,4%	5,2%	3,0%	5,2%
ML-I_Tb-R_1	3,5%	3,7%	7,7%	5,2%
ML-I_Tb-R_3	5,0%	4,9%	7,5%	5,2%
ML-I_Tb-R_5	5,4%	5,7%	2,8%	5,2%
ML-II_Tb_1	9,0%	10,2%	15,8%	10,5%
ML-II_Tb_6	10,8%	10,9%	7,6%	10,5%
ML-II_Tb-R_2	9,2%	9,3%	9,5%	10,5%
ML-II_Tb-R_5	8,0%	8,7%	5,1%	10,5%
ML-III_Tb_2	12,0%	12,4%	12,1%	12,6%
ML-III_Tb_3	11,5%	11,6%	9,6%	12,6%
ML-III_Tb_6	10,5%	10,2%	6,7%	12,6%
ML-III_Tb-R_4	10,5%	10,8%	6,0%	12,6%

Primeiramente, estabeleceram-se os coeficientes de determinação entre a perda de massa obtida na análise μ -XCT ($ML_{\mu-XCT}$), a perda de massa teórica da amostra ($ML_{t,a}$) e a perda de massa obtida através da pesagem dos provetes (ML_g). Os valores obtidos são apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12. A interpretação dos coeficientes de determinação (R^2) é uma tarefa complexa, principalmente ao analisar-se um material com grande variabilidade, como é a madeira (Machado & Palma, 2011). Neste estudo, adotou-se a seguinte interpretação para os coeficientes de determinação: $0,7 \leq R^2$, alta correlação; $0,4 \leq R^2 < 0,7$, correlação média; $0,1 \leq R^2 < 0,4$, correlação baixa; $R^2 < 0,1$, sem correlação.

É possível inferir através da análise do Quadro 4.7 e das Figuras 4.11 e 4.12 que os resultados obtidos a partir das imagens μ -XCT ($ML_{\mu-XCT}$) apresentam correlação alta ($r^2=0,98$) com a perda de massa teórica da amostra ($ML_{t,a}$), sendo um indicativo que a técnica apresenta resultados fiáveis para a amostra. Porém, ao comparar os resultados com a perda de massa obtida a partir da pesagem dos provetes (ML_g), observa-se uma correlação baixa ($r^2=0,22$).

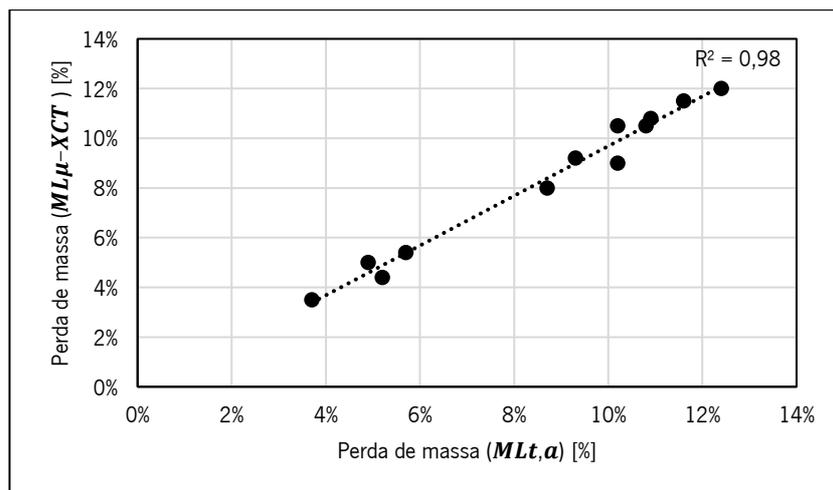


Figura 4.11 - Gráfico de dispersão e correlação entre a perda de massa obtida na análise μ -XCT ($ML_{\mu-XCT}$) e a perda de massa teórica da amostra ($ML_{t,a}$).

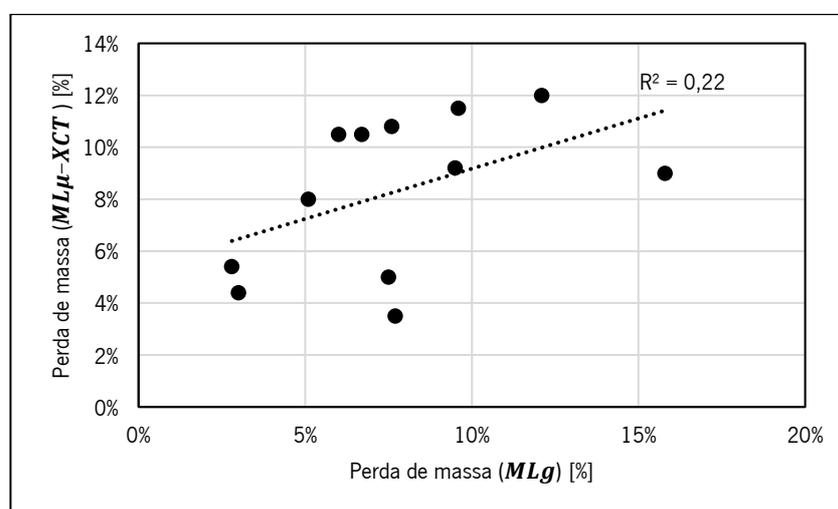


Figura 4.12 - Gráfico de dispersão e correlação entre a perda de massa obtida na análise μ -XCT ($ML_{\mu-XCT}$) e a perda de massa obtida pela pesagem dos provetes de tamanho estrutural (ML_g).

Sendo assim, são levantadas duas hipóteses. A primeira é a não representatividade da amostra em relação ao volume total do provete degradado artificialmente, no qual é questionado se a utilização de apenas uma amostra para cada provete é o suficiente para garantir a representatividade da amostra. A segunda hipótese é a não representatividade da perda de massa estimada a partir da pesagem para os provetes de tamanho estrutural (apresentada na seção 4.3.1).

Nas Figuras 4.13 e 4.14 são apresentadas as correlações da perda de massa obtida na análise μ -XCT ($ML_{\mu-XCT}$) e da perda de massa obtida a partir da pesagem dos provetes (ML_g) com a perda de massa teórica para o provete considerando as densidades de furação ($ML_{t,p}$). Novamente, os resultados obtidos a partir das imagens μ -XCT ($ML_{\mu-XCT}$) apresentam correlação alta ($r^2=0,92$), enquanto os

resultados com a perda de massa obtida a partir da pesagem dos provetes (ML_g) apresentam uma correlação baixa ($r^2=0,21$).

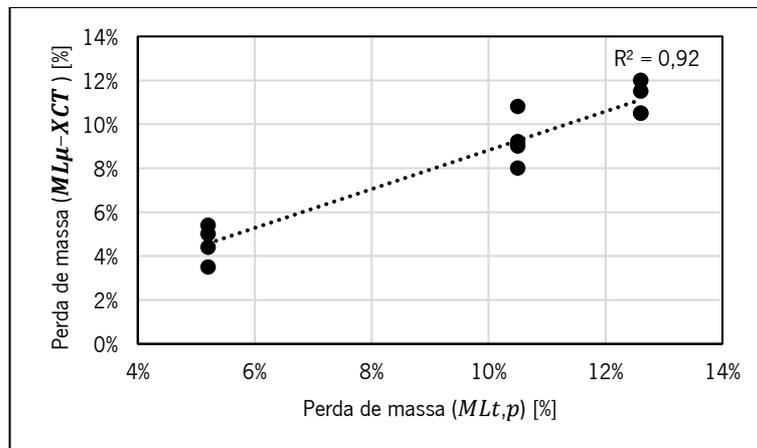


Figura 4.13 - Gráfico de dispersão e correlação entre a perda de massa obtida na análise μ -XCT ($ML_{\mu-XCT}$) e a perda de massa teórica calculada com base na densidade de furação ($ML_{t,p}$).

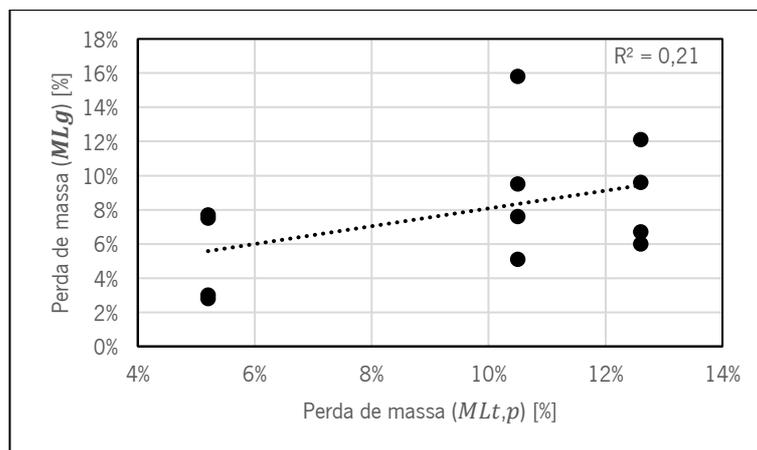


Figura 4.14 - Gráfico de dispersão e correlação entre perda de massa obtida pela pesagem dos provetes de tamanho estrutural (ML_g) e a perda de massa teórica calculada com base na densidade de furação ($ML_{t,p}$).

As correlações obtidas levam a inferir que a segunda hipótese, de que a estimativa da perda de massa a partir da pesagem nos provetes de tamanho estrutural não represente a realidade, seja a mais provável.

4.3.3. Ensaio à compressão das ligações

A geometria das ligações analisadas foi escolhida de forma a promover a rotura por corte paralelo às fibras na zona do entalhe. O ângulo da abertura Perna-Linha ($\beta=30^\circ$), a profundidade do dente simples ($t_v=30$ mm) e o reduzido comprimento do talão ($l_v=100$ mm) foram selecionados baseados nos resultados experimentais obtidos em Verbist. et al. (2017), para que a rotura da ligação quando submetida à compressão da Perna ocorra por corte paralelo às fibras na Linha. Tal como esperado,

todas as 60 ligações romperam por corte paralelo às fibras no entalhe. A Figura 4.15 apresenta um exemplo de um provete após a rotura.



Figura 4.15 - Linha com rotura por corte paralelo às fibras após o ensaio a compressão.

- Análise qualitativa

Realizando-se uma análise qualitativa dos resultados, é possível supor que a furação realizada tem influência no valor da capacidade resistente à compressão da ligação, seja pela redução da massa volúmica na região ou pela redução da superfície resistente ao corte. Na Figura 4.16, é possível observar a redução área resistente ao corte em cada um dos níveis de degradação em comparação com um provete de referência, ou seja, sem degradação.

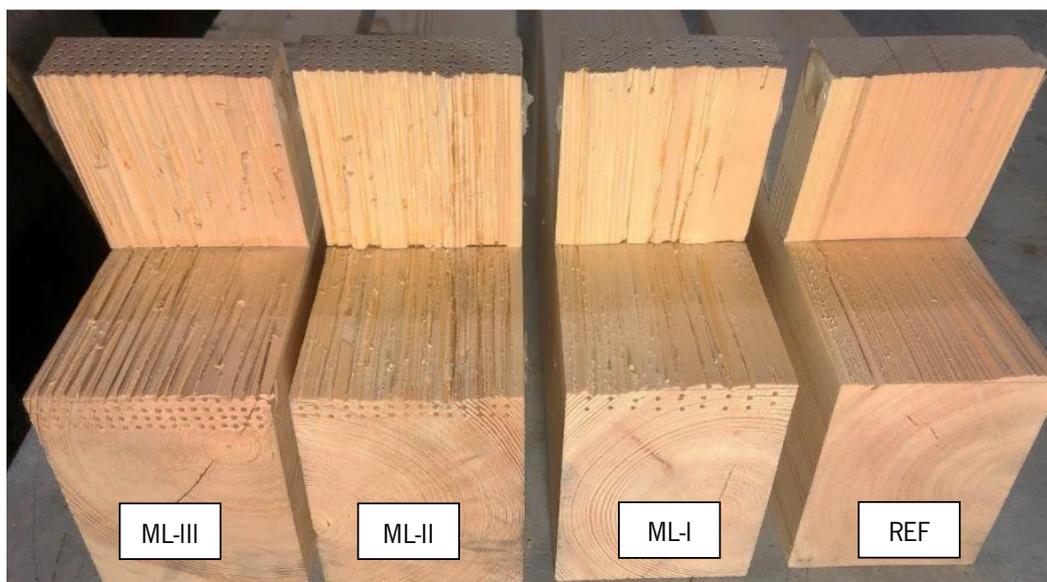


Figura 4.16 - Seções resistentes ao corte paralelo às fibras das Ligações Perna-Linha após a rotura.

- Apresentação dos resultados

Em termos quantitativos, primeiramente foi observado que os provetes pertencentes ao primeiro lote de ensaios (ver Quadro 4.4) apresentaram resultados consideravelmente inferiores aos obtidos nos dois lotes subsequentes. O Quadro 4.8 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de cada lote, a Figura 4.17 apresenta os valores médios de resistência ao corte paralelo às fibras, com seus respectivos desvios-padrão, e a Figura 4.18 apresenta o gráfico de dispersão dos resultados de cada lote. A partir da análise do Quadro 4.8, é possível aferir que os resultados do Lote 1 são (em média) 45,6% inferiores ao Lote 2 e 52,0% inferiores ao Lote 3. Por outro lado, a diferença entre os resultados dos Lotes 2 e 3 é de apenas 11,8%, dentro do esperado para um material com elevada variabilidade, como é a madeira.

Quadro 4.8 - Valores de força máxima e resistência ao corte paralelo às fibras de cada Lote submetido ao ensaio à compressão.

Valor	Lote 1		Lote 2		Lote 3	
	F _{máx} (kN)	τ (MPa)	F _{máx} (kN)	τ (MPa)	F _{máx} (kN)	τ (MPa)
Médio	21,1	1,9	38,8	3,5	44,0	4,0
Mínimo	12,0	1,1	30,3	2,8	36,2	3,3
Máximo	30,7	2,8	53,0	4,8	59,8	5,5
Desvio padrão (σ)	5,4	0,5	5,5	0,5	6,0	0,5
Variância (σ^2)	28,9	0,2	30,0	0,3	35,7	0,3
C.V. (%)	25,4%	25,4%	14,1%	14,1%	13,6%	13,6%

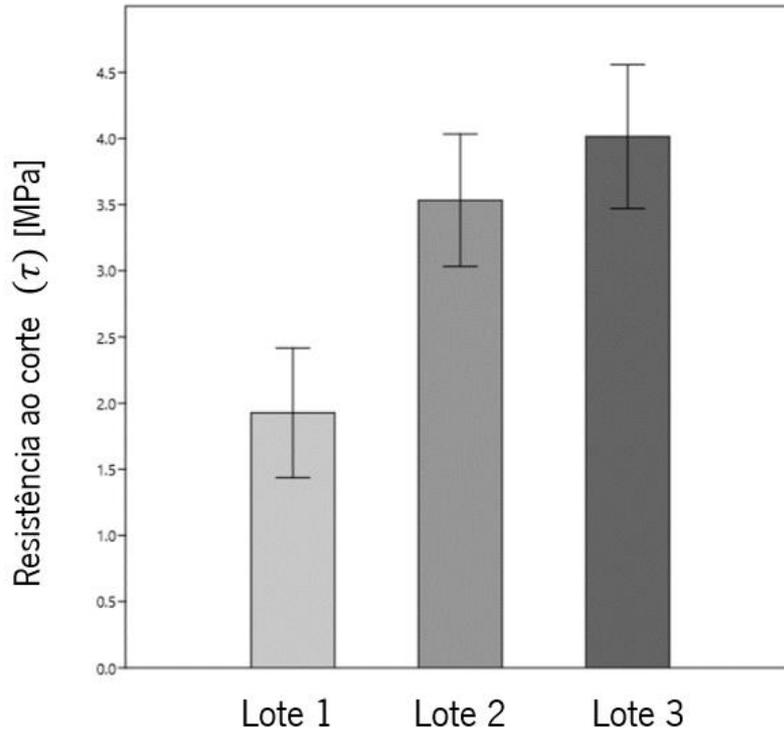


Figura 4.17 - Valores médios e desvios-padrão da resistência ao corte paralelo às fibras obtidos através do ensaio à compressão.

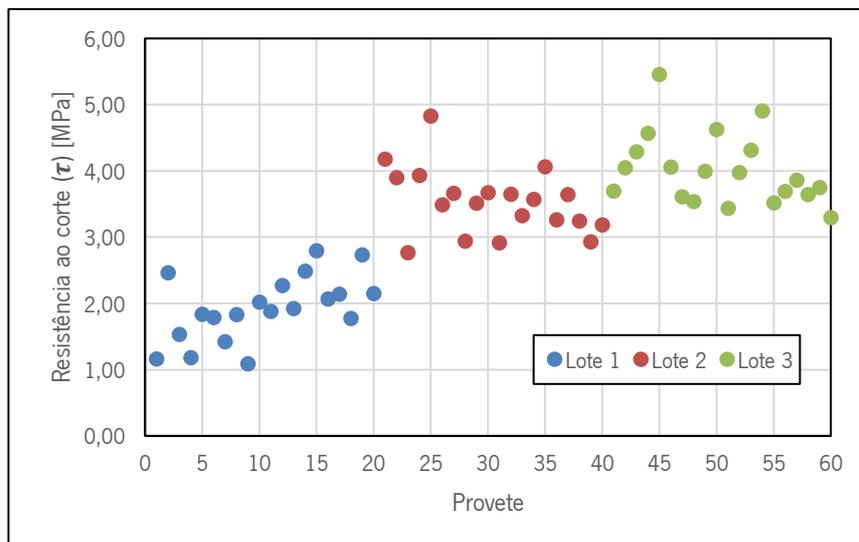


Figura 4.18 - Gráfico de dispersão dos resultados do ensaio à compressão, separado por lotes.

A elevada discrepância entre os resultados do Lote 1 com os demais Lotes pode ser explicada ou pela qualidade inferior da madeira utilizada nos ensaios do Lote 1 ou por um eventual erro sistêmico durante a realização dos ensaios do primeiro lote. Sendo assim, realizaram-se ensaios de caracterização da resistência ao corte paralelo às fibras em provetes pequenos extraídos dos provetes de tamanho estrutural ensaiados à compressão. O método de ensaio foi adotado segundo as recomendações da norma americana ASTM D143 (2021), conforme apresenta a Figura 4.19.

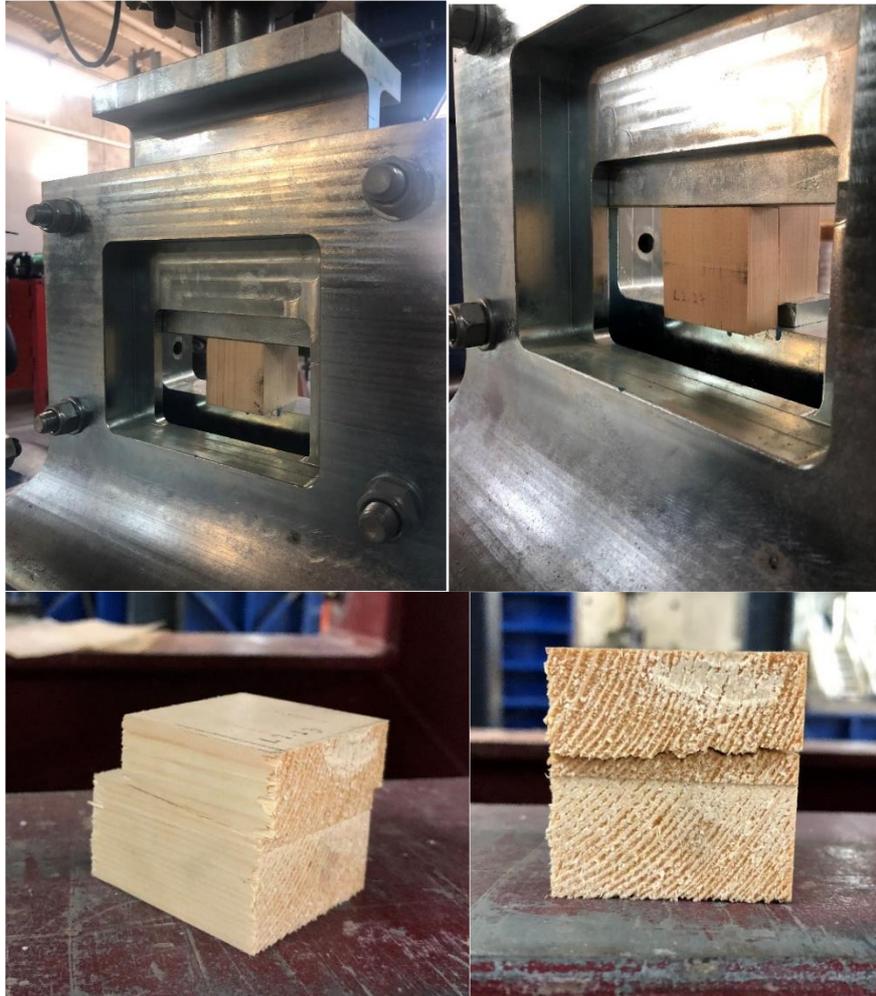


Figura 4.19 - Ensaio de caracterização da resistência ao corte paralelo às fibras em provetes pequenos, segundo a ASTM D143 (2021).

O Quadro 4.9 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de cada lote, a Figura 4.20 apresenta os valores médios de resistência ao corte paralelo às fibras, com seus respectivos desvios-padrão, e a Figura 4.21 apresenta o gráfico de dispersão dos resultados de cada lote. Analisando-se o Quadro 4.9 e as Figuras 4.20 e 4.21 é possível aferir que os resultados do Lote 1 são (em média) 10,9% inferiores ao Lote 2 e 12,3% inferiores ao Lote 3. Por outro lado, a diferença entre os resultados dos Lotes 2 e 3 é de apenas 1,5%. Além disso, é possível observar através do gráfico de dispersão da Figura 4.22 que, apesar do valor médio de resistência ao corte paralelo às fibras do Lote 1 ser inferior aos outros lotes, quando correlacionado com a massa volúmica dos provetes, os resultados estão dentro do esperado para o material. Portanto, é possível observar que a madeira utilizada no Lote 1 é de qualidade levemente inferior à madeira dos outros lotes, entretanto, a diferença não justifica os resultados discrepantes obtidos nos ensaios à compressão com provetes de dimensões estruturais.

Quadro 4.9 - Valores de resistência ao corte paralelo às fibras de cada Lote submetido ao ensaio de caracterização ao corte paralelo às fibras em provetes pequenos.

Valor	Lote 1 τ (MPa)	Lote 2 τ (MPa)	Lote 3 τ (MPa)
Médio	5,7	6,4	6,5
Mínimo	4,4	4,9	5,6
Máximo	7,6	7,8	7,5
Desvio padrão (σ)	0,9	0,7	0,5
Variância (σ^2)	0,9	0,5	0,3
C.V. (%)	16,4%	11,4%	7,7%

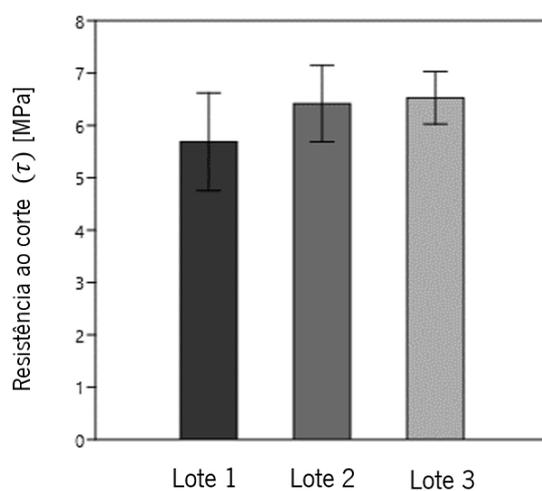


Figura 4.20 - Valores médios e desvios-padrão da resistência ao corte paralelo às fibras obtidos através do ensaio de caracterização em provetes pequenos.

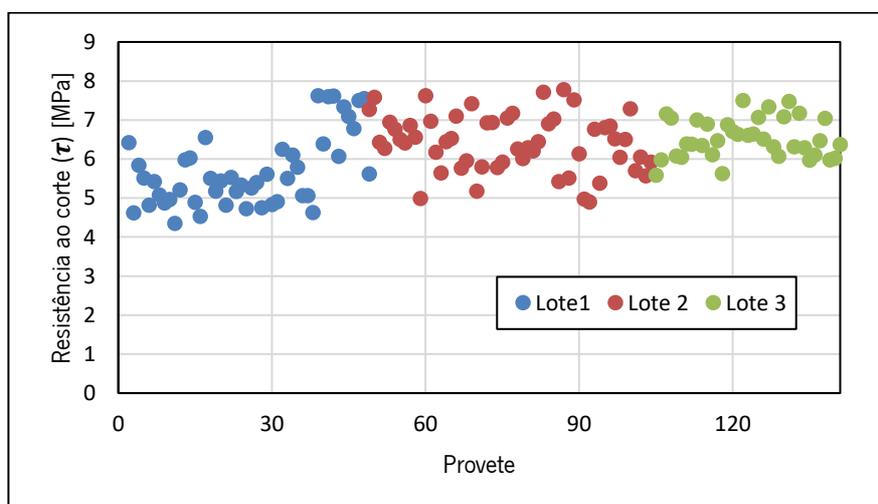


Figura 4.21 - Gráfico de dispersão dos resultados do ensaio de caracterização em provetes pequenos, separado por lotes.

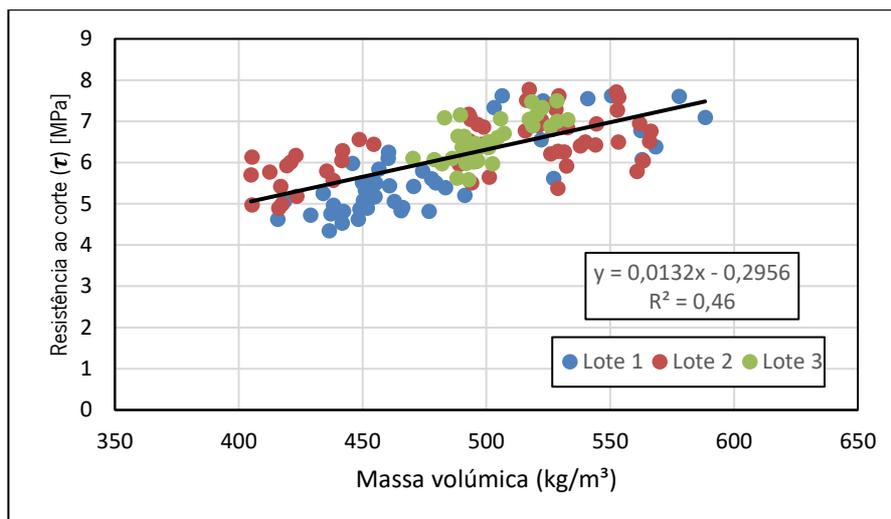


Figura 4.22 - Gráfico de dispersão dos resultados do ensaio de caracterização em provetes pequenos e correlação com a massa volúmica.

Uma vez que não foram identificados defeitos ou singularidades relevantes durante a inspeção visual dos provetes, que foi utilizado o mesmo procedimento de ensaio, a mesma espécie de madeira, e os resultados dos ensaios de caracterização com provetes pequenos não apresentaram discrepância na mesma ordem de grandeza que os ensaios à compressão com dimensões estruturais, considerou-se que ocorreu um erro sistémico na realização dos ensaios do Lote 1. Não sendo possível identificar o erro que resultou em tal discrepância de resultados entre lotes, tomou-se a decisão de desconsiderar os provetes do Lote 1 na análise realizada neste capítulo.

Portanto, considerando-se apenas os Lotes 2 e 3 (40 provetes), o Quadro 4.10 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios à compressão das ligações.

Quadro 4.10 - Valores de força máxima e resistência ao corte paralelo às fibras dos provetes pertencentes aos Lotes 1 e 2 submetidos ao ensaio à compressão.

Valor	F _{máx} (kN)	τ (MPa)
Médio	41,4	3,8
Mínimo	30,3	2,8
Máximo	59,8	5,5
Desvio padrão (σ)	6,3	0,6
Variância (σ^2)	39,2	0,3
C.V. (%)	15,1%	15,1%

- Teste de normalidade

Foi verificado que a distribuição dos resultados se ajustam à distribuição normal através do teste de Shapiro-Wilk. O teste de Shapiro-Wilk é baseado em um valor de prova (p-value) e, quanto mais próximo da unidade se encontrar valor de prova, melhor a qualidade do ajuste, sendo a hipótese rejeitada em termos estatísticos quando o p-value é inferior a 0,05, assumindo-se uma confiança de 95%. Obteve-se um valor de prova de 0,14. Por este valor ser superior a 0,05, não se se rejeita a hipótese dos resultados provirem de uma distribuição Normal com uma confiança de 95%.

O resultado do teste está de acordo com o observado no histograma da Figura 4.23. O histograma é utilizado para verificar se as faixas de densidade dos resultados se assemelha à curva em forma de sino (característica da distribuição normal). As análises estatísticas foram todas realizadas com recurso ao software PAST (versão 4.04), desenvolvido na Universidade de Oslo, Noruega.

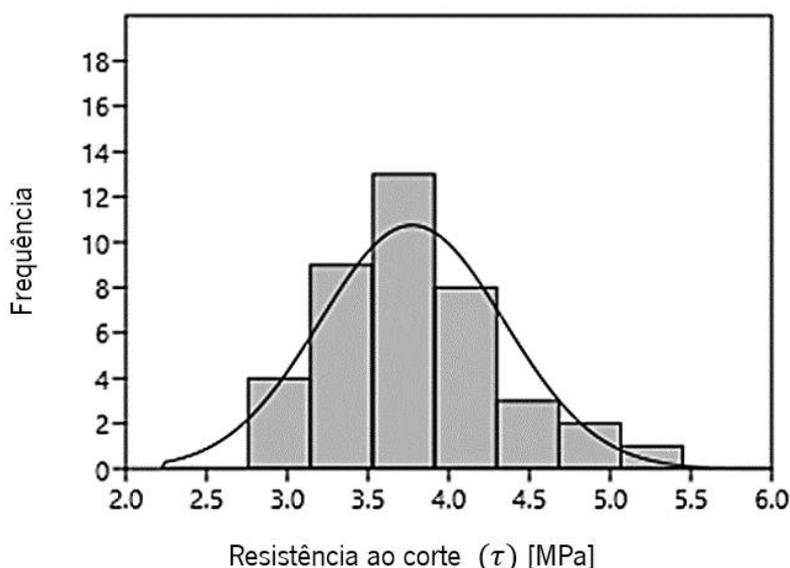


Figura 4.23 - Histograma dos valores obtidos para a resistência ao corte, com sobreposição da curva de densidade com distribuição normal.

- Análise comparativa entre zonas de degradação

A Figura 4.24 e o Quadro 4.11 apresentam os valores médios de resistência ao corte paralelo às fibras, com seus respectivos desvios-padrão, dos diferentes grupos de degradação. A partir da análise do Quadro 4.11, é possível observar que, para os níveis de degradação ML-I e ML-III, o grupo com degradação tanto na Perna quanto na Linha apresentou resistência ao corte paralelo às fibras inferior ao seu respetivo grupo com degradação apenas na Linha (redução de 8% para o nível de degradação ML-I e 10% para o nível ML-III, ambos em média). Por outro lado, o grupo ML-II_Tb-R apresentou resistência superior ao grupo ML-II_Tb (incremento de 3%, em média).

Quadro 4.11 - Valores médios (absolutos e relativos) e desvios-padrão da resistência ao corte paralelo às fibras obtidos através do ensaio à compressão.

Valor	τ (MPa)	τ Relativo (%)
ML-I_Tb	4,3 ± 0,9	100%
ML-I_Tb-R	4,0 ± 0,6	92% (-8%)
ML-II_Tb	3,5 ± 0,4	100%
ML-II_Tb-R	3,7 ± 0,3	103% (+3%)
ML-III_Tb	3,7 ± 0,6	100%
ML-III_Tb-R	3,3 ± 0,3	90% (-10%)

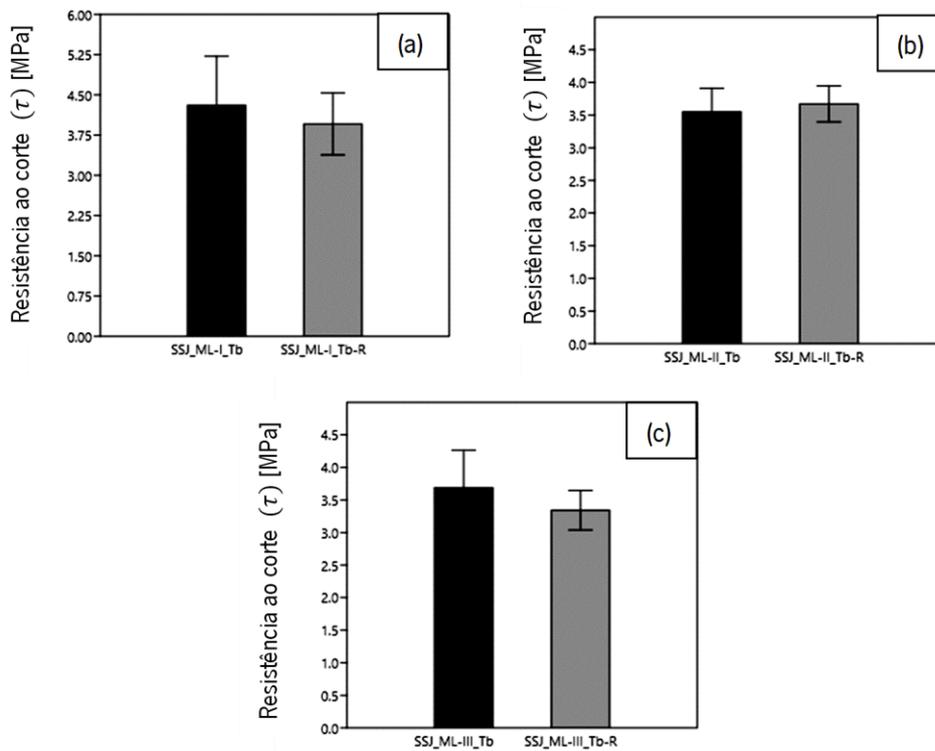


Figura 4.24 - Valores médios e desvios-padrão da resistência ao corte paralelo às fibras obtidos através do ensaio à compressão. (a) Grupos SSJ_ML-I_Tb e SSJ_ML-I_Tb-R (1,67 furos/cm²); (b) Grupos SSJ_ML-II_Tb e SSJ_ML-II_Tb-R (3,33 furos/cm²); (c) Grupos SSJ_ML-III_Tb e SSJ_ML-III_Tb-R (4,00 furos/cm²).

A Figura 4.25 apresenta os gráficos de força por deslocamento da superfície frontal da ligação de cada ensaio (ver Figura 4.8). A partir dos gráficos de força por deslocamentos e da análise visual do provete após a rotura (Figura 4.15), é possível afirmar que a degradação realizada na Perna não foi suficiente para induzir a rotura por esmagamento paralelo às fibras na Superfície Frontal. Apenas para efeitos comparativos, as Figuras 4.26 (a) e 4.26 (b) apresentam um provete com rotura por corte paralelo às fibras e um gráfico de força por deslocamento da superfície frontal típico de uma rotura por corte,

enquanto as Figuras 4.26 (c) e 4.26 (d) apresentam um provete com rotura por esmagamento da superfície frontal, ensaiado por Verbist et al. (2017), e um gráfico de força por deslocamento da superfície frontal típico de uma rotura por esmagamento, onde é possível observar a presença de um patamar plástico na rotura por esmagamento, o que não ocorre na rotura por corte paralelo às fibras, que por sua vez, é um modo de falha frágil.

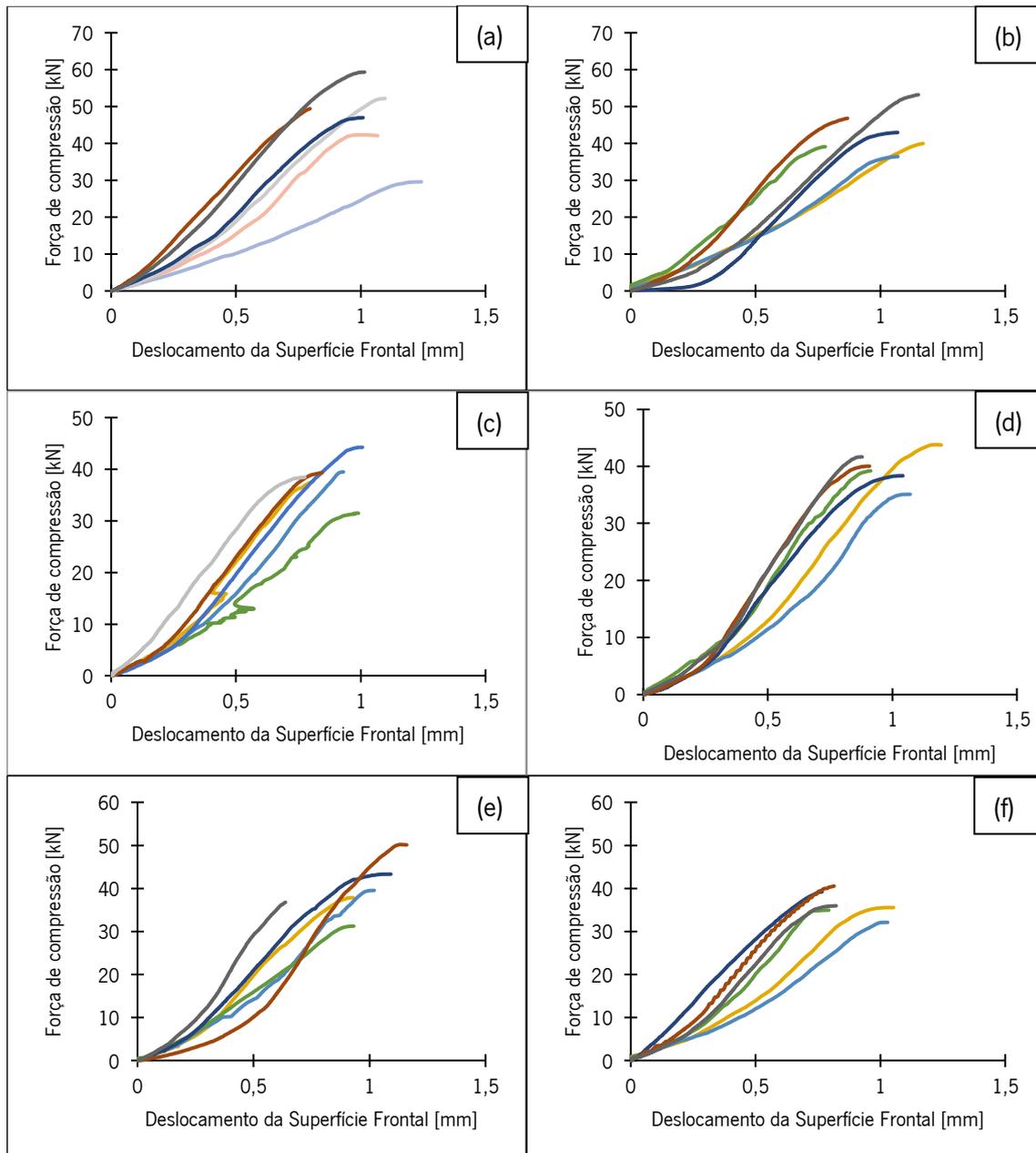


Figura 4.25 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal. (a) SSJ_ML-I_Tb; (b) SSJ_ML-I_Tb-R; (c) SSJ_ML-II_Tb; (d) SSJ_ML-II_Tb-R; (e) SSJ_ML-III_Tb; (f) SSJ_ML-III_Tb-R.

Sendo assim, ao realizar uma análise comparativa entre as diferentes localizações da degradação (degradação tanto na Perna quanto na Linha e degradação apenas na Linha), não foi possível notar diferenças significativas nos resultados dos ensaios, uma vez que a degradação na Perna teria influência

ao induzir o esmagamento da Superfície Frontal, o que não ocorreu. Tratando-se da diferença entre resistências ao corte paralelo às fibras, entende-se que estas tenham sido causadas pela elevada variabilidade da madeira e não por influência da degradação realizada na Perna, uma vez que a rotura ocorreu apenas por corte no talão do entalhe.

Portanto, as análises serão realizadas considerando-se apenas as características físicas e mecânicas, bem como a degradação, apenas da Linha.

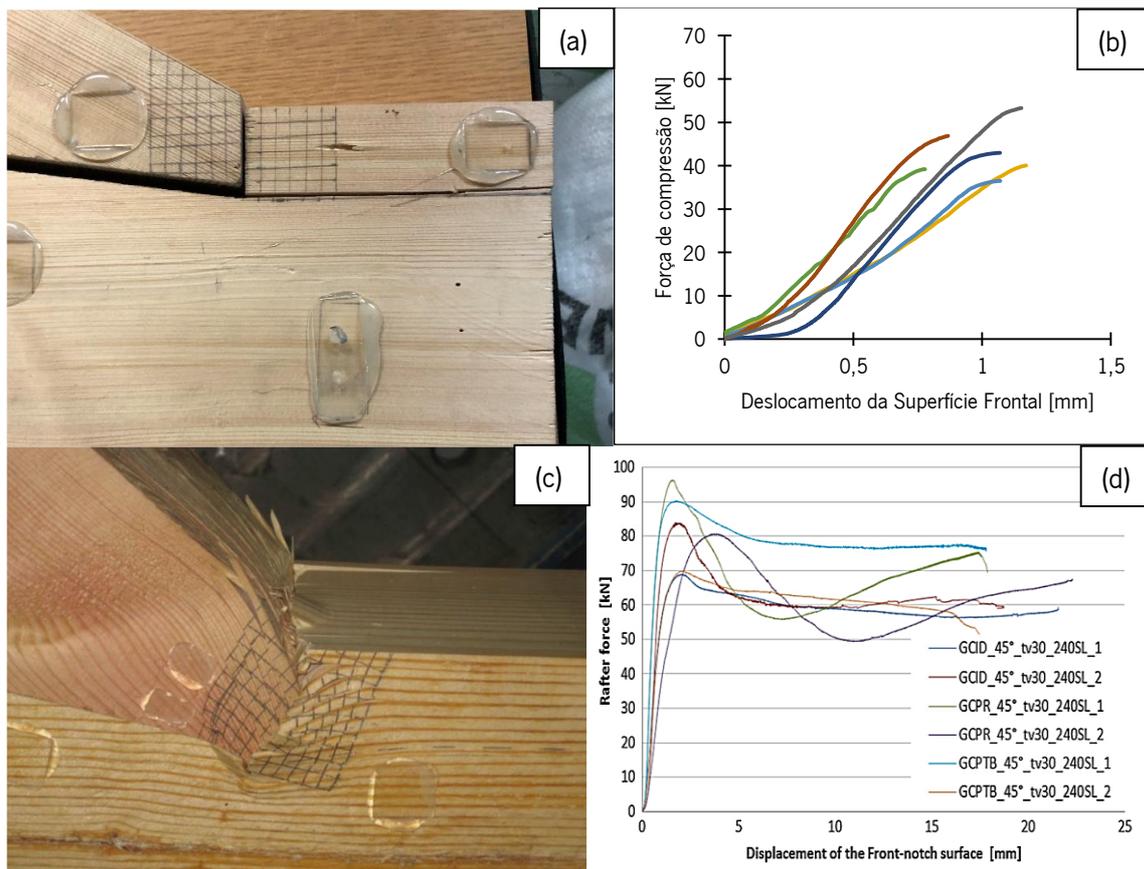


Figura 4.26 - Modos de rotura e gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal típicos do ensaio à compressão em Ligações Perna-Lina. (a) Rotura por corte paralelo às fibras na Linha. (b) Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal em roturas por corte paralelo às fibras; (c) Rotura por esmagamento da superfície frontal (Verbist et al., 2017); (d) Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal em roturas por esmagamento da superfície frontal (Verbist et al., 2017).

- Análise comparativa entre níveis de degradação

O Quadro 4.12 apresenta os valores médios, com os respetivos desvios-padrão, de perda de massa, massa volúmica e resistência ao corte paralelo às fibras dos diferentes grupos de degradação (considerando-se a degradação apenas da Linha). A Figura 4.27 apresenta os valores médios, com os respetivos desvios-padrão, da resistência ao corte paralelo às fibras de forma gráfica. A partir da análise do Quadro 4.12, é possível identificar que o grupo com menor nível de degradação (ML-I) apresentou resultados superiores (+4%, em média) relativamente ao grupo de referência. Portanto, é possível concluir

que este nível de degradação não foi suficiente para causar danos significativos à madeira, e que, neste grupo, outras propriedades como densidade e qualidade da madeira foram mais determinantes na resistência ao corte paralelo às fibras. Por outro lado, os outros dois níveis de degradação apresentaram resultados inferiores ao grupo de referência (-10% e -11%, em média), sendo um indicativo da influência das galerias perfuradas.

Quadro 4.12 - Distribuição dos provetes por densidades de furação e respectivos valores e desvios-padrão de perda de massa (%), massa volúmica original (kg/m^3), massa volúmica residual (kg/m^3) e resistência ao corte paralelo às fibras (MPa).

Grupos	REF	ML-I	ML-II	ML-III
Quantidade	4	12	12	12
Perda de massa (%)	-	$3,2 \pm 0,6$	$6,6 \pm 1,2$	$6,7 \pm 0,6$
Massa volúmica original (kg/m^3)	529 ± 26	514 ± 50	511 ± 41	493 ± 52
Resistência ao corte Absoluta (MPa)	$4,0 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,8$	$3,6 \pm 0,3$	$3,5 \pm 0,5$
Resistência ao corte Relativa (MPa)	100%	104% (+4%)	90% (-10%)	89% (-11%)

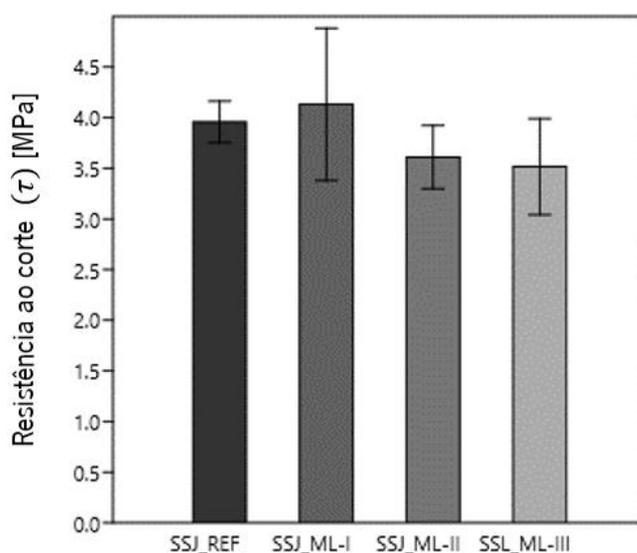


Figura 4.27 - Valores médios e desvios-padrão da resistência ao corte paralelo às fibras obtidos através do ensaio à compressão.

Para verificar se existem diferenças estatísticas entre os diferentes grupos de degradação, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) seguida de um teste de Tukey. A ANOVA permite comparar as médias de populações, realizando a verificação da existência de diferenças significativas entre as populações. Já

o teste de Tukey é utilizado para se aferir quais destas populações se diferem, em termos estatísticos (Driscoll, 1996). Em outras palavras, a ANOVA será utilizada para verificar se a variação de níveis de degradação foi estatisticamente relevante na redução da resistência ao corte paralelo às fibras, enquanto o teste de Tukey será utilizado para aferir quais grupos se diferem. Tanto a ANOVA quanto o Teste de Tukey foram realizados a partir do software PAST 4.0.

O valor-p obtido na ANOVA foi de 0,0286 (valor-p \leq 0,05), ou seja, a ANOVA indica que, entre os grupos analisados, existem pelo menos 2 deles que se diferem. O Quadro 4.13 expõe os resultados obtidos no Teste de Tukey, onde é possível identificar que os grupos que se diferem são os grupos SSJ_ML-I e SSJ_ML-III (valor-p \leq 0,05). No Quadro 4.13, os valores à direita da diagonal principal representam os valores-p obtidos no Teste de Tuckey, por outro lado, os valores à esquerda representam o contraste obtidos entre as médias dos grupos analisados.

Quadro 4.13 - Resultado do Teste de Tuckey realizado com recurso ao software PAST.

Grupos	REF	ML-I	ML-II	ML-III
REF		0,9389	0,6647	0,4724
ML-I	0,8134		0,0889	0,03254
ML-II	1,619	3,44		0,9704
ML-III	2,063	4,068	0,6275	

Conforme exposto na seção 4.3.1, a simulação da degradação não atingiu os níveis de perda de massa esperados inicialmente, obtendo perdas de massa inferiores. Entretanto, apesar da baixa perda de massa observada nos provetes ensaiados, já é possível observar estatisticamente a redução da resistência ao corte no grupo ML-III.

Adicionalmente, estabeleceu-se a correlação entre a perda de massa e a resistência ao corte, conforme apresenta a Figura 4.28. Obteve-se um coeficiente de determinação $r^2=0,11$ entre a resistência ao corte e a perda de massa. Apesar de ser um valor relativamente baixo, é necessário considerar que a madeira é um material de elevada variabilidade. Além disso, é importante ressaltar que, conforme dito na seção 4.3.1, a estimativa da perda de massa dos provetes pode não representar a perda de massa real. Sendo assim, de forma a se obter correlações com a resistência ao corte de forma mais fiável, a seguir será realizada uma análise da correlação entre a redução da área de corte e a resistência ao corte.

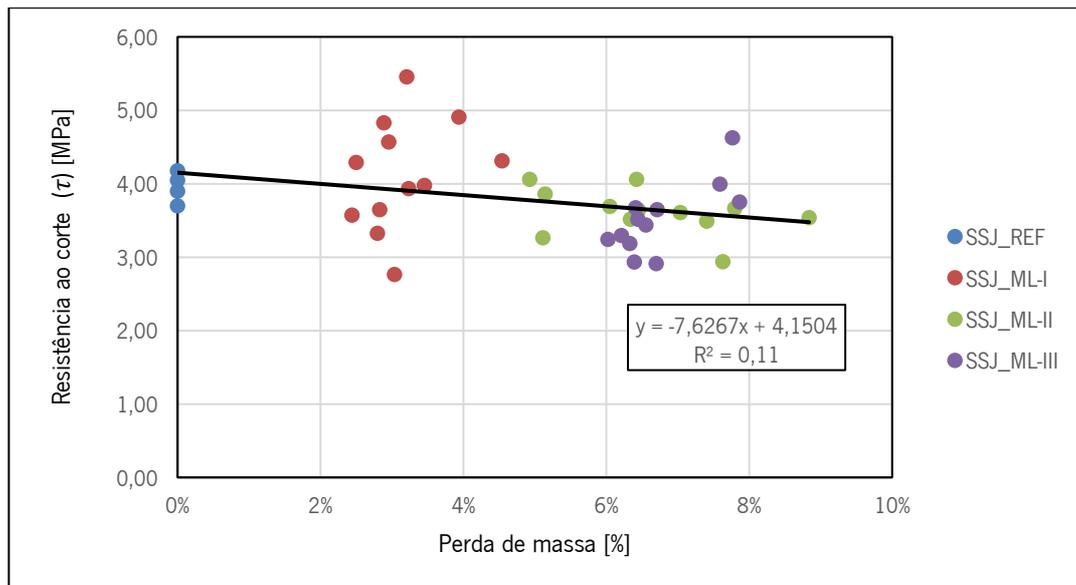


Figura 4.28 - Correlação obtida entre a resistência ao

Quadro 4.14 - Grupos e valores limites para a distribuição dos provetes por redução da área de corte.

Grupos	Redução da área de corte (%)
SSJ_REF	0%
SSJ_AR-I	0% < AR ≤ 10%
SSJ_AR-II	10% < AR ≤ 20%
SSJ_AR-III	20% < AR

Legenda: REF – Referência; AR – Redução da área (*Area reduction*).

O Quadro 4.15 apresenta os valores médios, com os respectivos desvios-padrão, da redução da área de corte, massa volúmica e resistência ao corte paralelo às fibras dos diferentes grupos. A partir da análise do Quadro 4.15, é possível identificar que o grupo com a menor perda de área (AR-I) apresentou resultados ligeiramente superiores ao grupo de referência (+2%, em média). Portanto, novamente é possível concluir que este nível de degradação não foi suficiente para causar danos significativos à madeira e que, neste grupo, outras propriedades como densidade e qualidade da madeira foram mais determinantes na resistência ao corte paralelo às fibras. Por outro lado, os outros dois níveis de degradação apresentaram resultados inferiores ao grupo de referência (-6% e -14%, em média).

Quadro 4.15 - Distribuição dos provetes por redução da área de corte e respectivos valores médios e desvios-padrão de redução da área resistente (%), massa volúmica original (kg/m³) e resistência ao corte paralelo às fibras (MPa).

Grupos	REF	AR-I	AR-II	AR-III
Quantidade	4	11	18	7
Redução da área de corte (%)	-	7,1 ± 2,6	15,5 ± 2,6	22,5 ± 2,2
Massa volúmica original (kg/m ³)	529 ± 26	514 ± 53	501 ± 48	507 ± 42
Resistência ao corte Absoluta (MPa)	4,0 ± 0,2	4,0 ± 0,8	3,7 ± 0,5	3,4 ± 0,3
Resistência ao corte Relativa (MPa)	100%	102% (+2%)	94% (-6%)	86% (-14%)

A Figura 4.30 apresenta o gráfico de dispersão dos resultados em relação à sua perda de área, bem como a correlação entre a resistência ao corte e a redução da área resistente. Primeiramente, é

necessário ressaltar que, assim como nos níveis de perda de massa, a redução da área de corte não atingiu os valores que se esperava para a densidade de furação aplicada. Eram expectáveis reduções na área resistente de 18,9%, 31,6% e 37,9% para os níveis de densidade de furação ML-I, ML-II e ML-III, respetivamente. Entretanto, é possível perceber que apenas um provete apresentou redução acima de 25% (27,2%).

Assim como ocorreu quando correlacionado com a perda de massa, é possível notar uma linha de tendência descendente, ou seja, a resistência ao corte tende a reduzir de acordo com o aumento da degradação. O coeficiente de determinação obtido foi de $R^2=0,21$, quase o dobro da correlação obtida para a perda de massa ($R^2=0,11$).

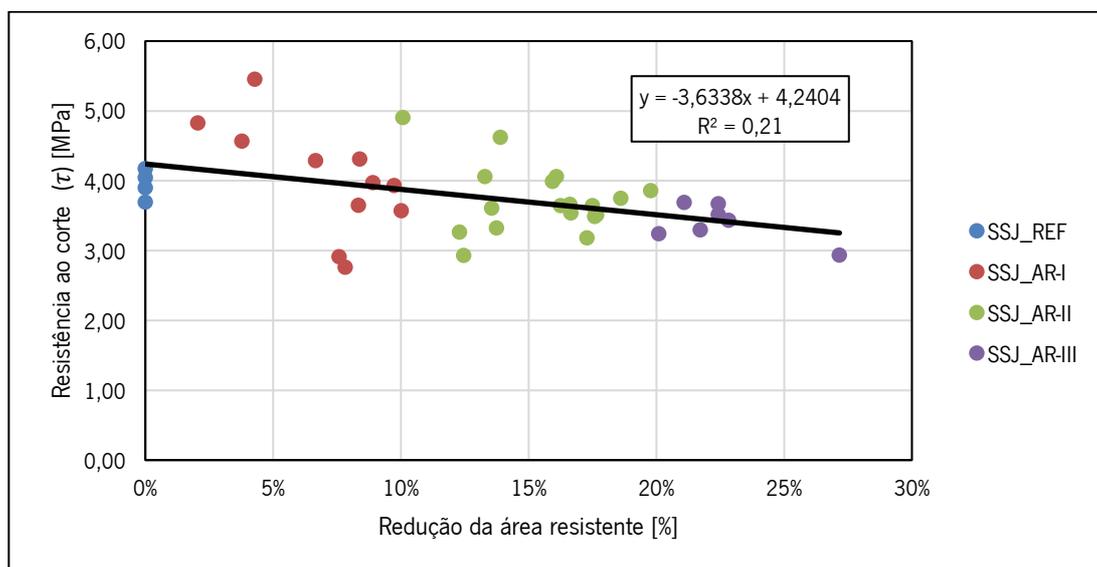


Figura 4.30 - Correlação obtida entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a redução da área resistente.

A resistência ao corte paralelo às fibras (τ) foi calculada a partir da equação 4.1 e, assim, é possível inferir que, em teoria, a resistência ao corte varia linearmente com a variação da área resistente, onde 100% de perda de área resistente resultaria em uma resistência ao corte nula e 0% de perda de área resistente resultaria na resistência ao corte máxima.

A representação da curva teórica de redução da resistência a partir da redução da área resistente foi inserida na Figura 4.31 ($y = -4,2404x+4,2404$). É possível observar na Figura 4.31 que a linha de tendência dos resultados e a curva de redução teórica são semelhantes, apresentando apenas uma leve diferença em sua inclinação.

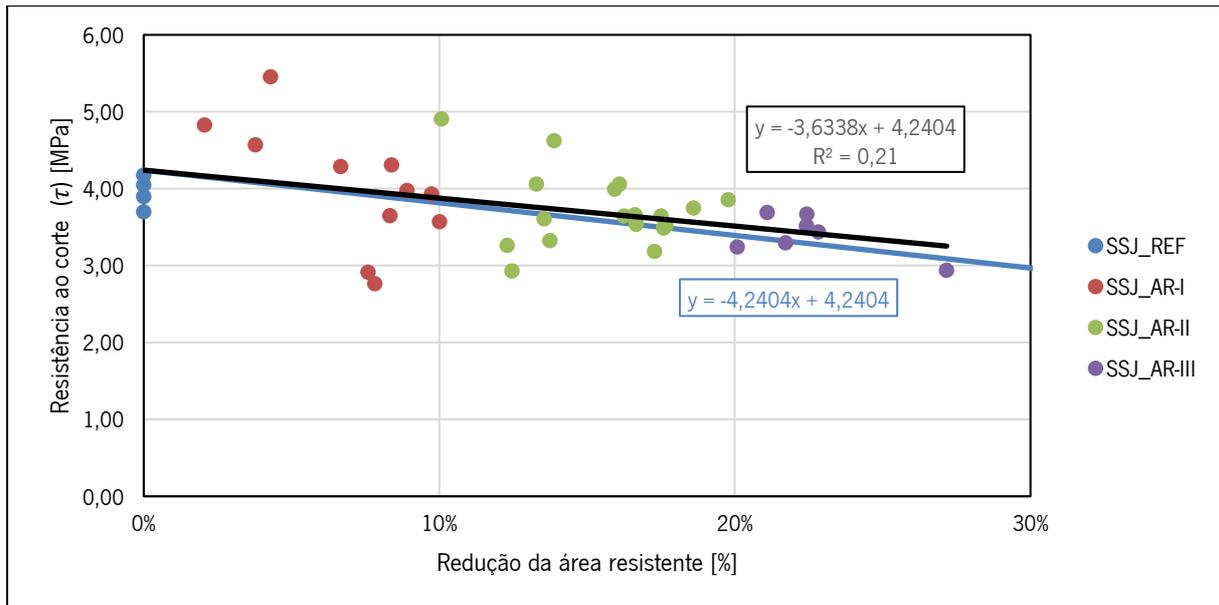


Figura 4.31 - Correlação obtida entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a redução da área resistente e equação de redução da resistência ao corte por redução de área resistente.

De acordo com o Eurocódigo 5 (EN 1995, 2004), a resistência de projeto de estruturas de madeira deve ser calculada utilizando-se a equação 4.4.

$$f_{v,d} = k_{mod} \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \quad [4.4]$$

Onde $f_{v,k}$ é a resistência característica do material, γ_m é o fator de redução parcial do material e k_{mod} é o fator de modificação tendo em conta o efeito da duração do carregamento e do teor de água.

Tendo como base as recomendações do Eurocódigo 5 (EN 1995, 2004), considerou-se os fatores 1,3 para o γ_m , e 0,9 para o k_{mod} . Neste estudo, enquadrou-se a casquinha na classe de resistência C24, com resistência ao corte característica ($f_{v,k}$) de 4,0 MPa (EN338:2009).

Sendo assim, ao aplicar a equação 4.4, é calculada a resistência de projeto de 2,8 MPa, representada na Figura 4.32 por $f_{v,d}$ (EC5). Ao analisar a Figura 4.32, observa-se que nenhum provete apresentou resistência abaixo da resistência de projeto. Além disso, a partir da análise das equações da linha de tendência dos resultados e da equação teórica de redução de resistência, é possível inferir que a ligação Perna-Linha com dente simples deixaria de atender à resistência de projeto com uma redução da área resistente de (34,7% - 40,5%), valores acima dos obtidos neste estudo.

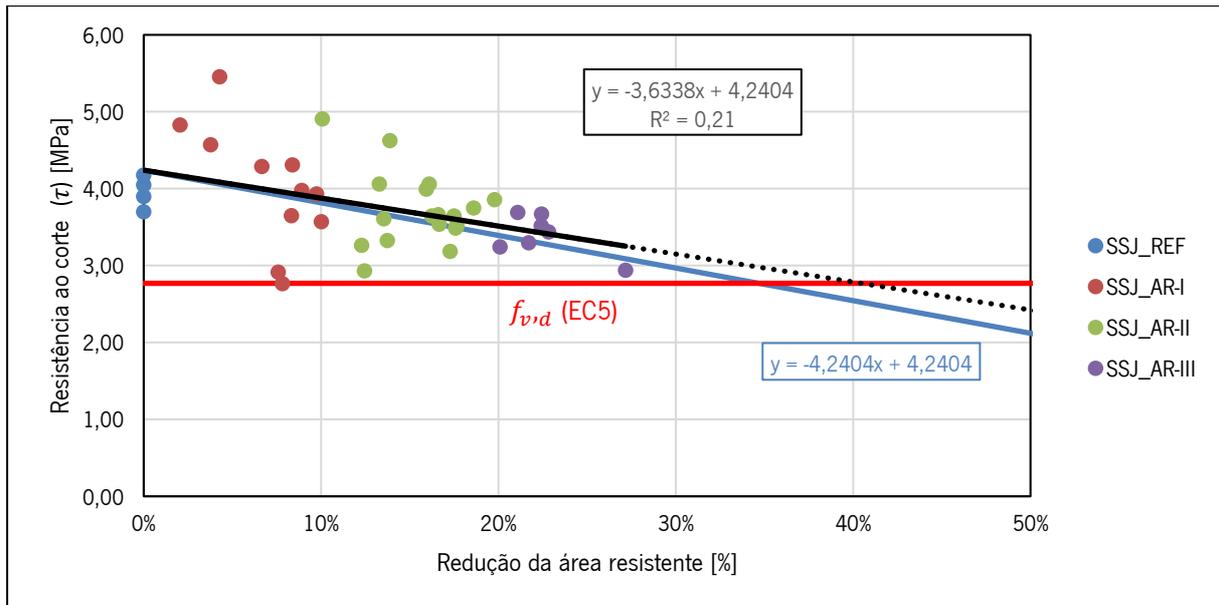


Figura 4.32 - Correlação obtida entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a redução da área resistente, equação de redução da resistência ao corte por redução de área resistente e resistência de projeto, segundo o Eurocódigo 5.

- Correlação entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a massa volúmica

Estabeleceu-se ainda a correlação entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a massa volúmica (Figuras 4.33 e 4.34). A correlação obtida pode ser considerada nula ($R^2=0,019$), entretanto, este é um resultado que não representa a real correlação entre a resistência ao corte da madeira e a sua massa volúmica. A interpretação do coeficiente de determinação torna-se uma tarefa muitas vezes complexa quando se trata de materiais com alta variabilidade, como é a madeira (Machado & Palma, 2011). Ao observar a Figura 4.34, é possível notar que, com o aumento do nível de degradação, o coeficiente de correlação reduz, e que a correlação obtida para os provetes de referência (sem degradação) foi $R^2=0,16$. Entretanto, é necessário ressaltar que foram analisados apenas quatro provetes de referência, quantidade insuficiente para se estabelecer uma correlação fiável. Em estudo semelhante, Parracha (2018) realizou ensaios de resistência ao corte paralelo às fibras em provetes pequenos de pinho bravo e obteve coeficientes de determinação com a massa volúmica $R^2=0,75$. Neste estudo, um coeficiente de determinação $R^2=0,46$ foi obtido nos ensaios de caracterização em provetes pequenos. É importante ressaltar que, em ambos, os ensaios foram realizados em provetes de dimensões menores. Conforme dito anteriormente, a madeira como um material natural, anisotrópico e extremamente heterogêneo sofre do fenômeno de efeito de escala, o que torna a interpretação de ensaios realizados em escala reduzida e a sua comparação com ensaios realizados em escalas reais uma tarefa muitas vezes complexa (Masaeli et al, 2020).

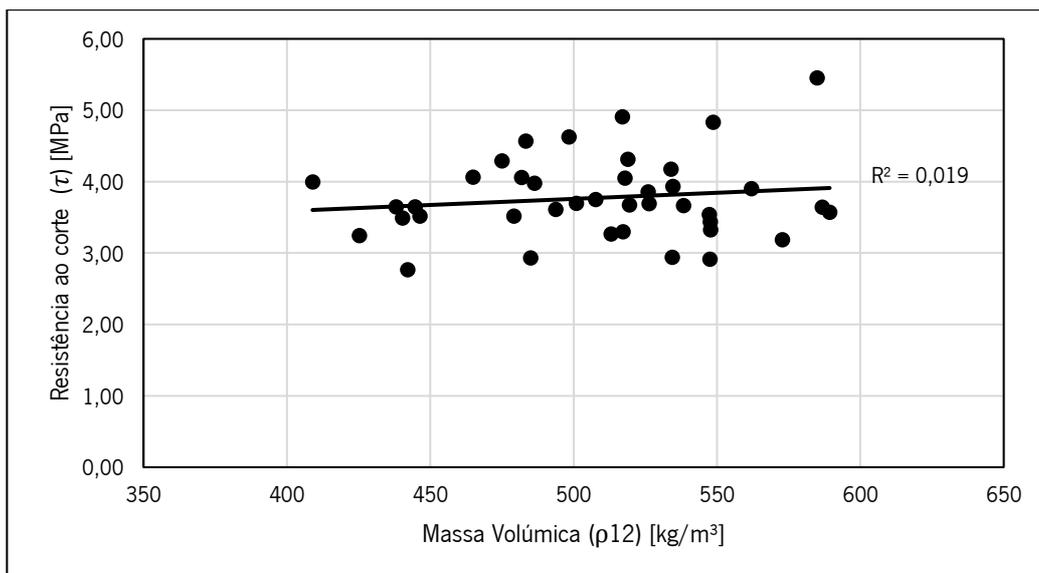


Figura 4.33 - Correlação obtida entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a massa volúmica dos provetes submetido ao ensaio à compressão.

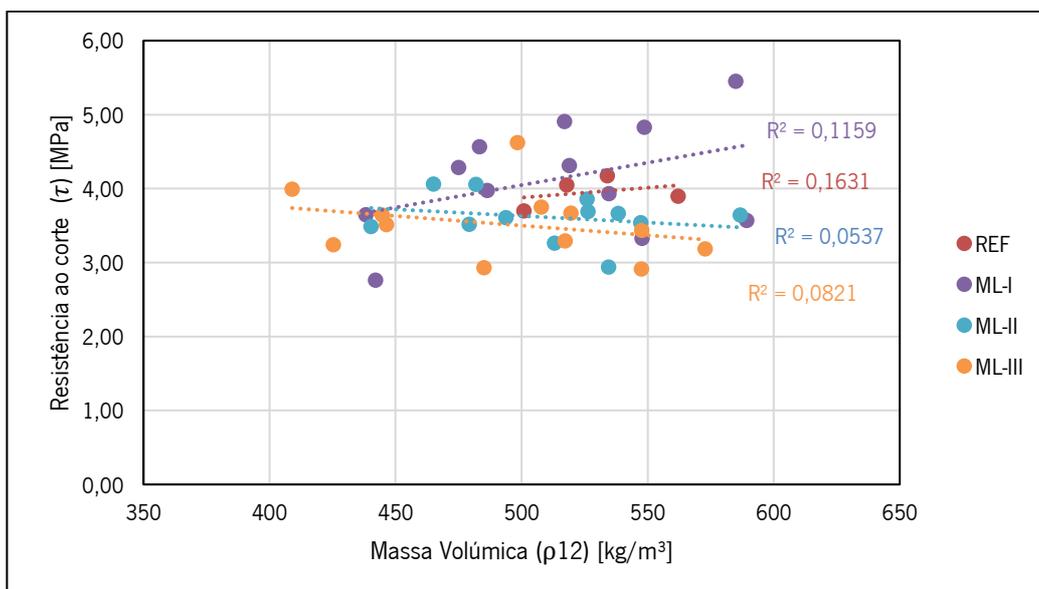


Figura 4.34 - Correlação obtida entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a massa volúmica, separada por grupos de degradação.

4.3.4. Ensaio de arrancamento perpendicular às fibras

Conforme dito na seção 4.2.4, foram ensaiados 12 provetes para cada um dos equipamentos, denominados neste estudo como Equipamento Fixo e Equipamento Móvel. Para cada provete ensaiado no Equipamento Fixo, foram realizados 3 arrancamentos, enquanto, para o Equipamento Móvel, foram realizados 4 arrancamentos por provete. A resistência ao arrancamento perpendicular às fibras de cada provete foi considerada como a média dos arrancamentos realizados no mesmo. No Quadro 4.16 apresentam-se os resultados dos ensaios de arrancamento.

Quadro 4.16 - Valores de força máxima e resistência ao arrancamento perpendicular às fibras.

Valor	Equipamento Fixo		Equipamento Móvel	
	F _{máx} (N)	f (MPa)	F _{máx} (N)	f (MPa)
Médio (μ)	2404,9	30,1	2934,8	36,7
Máximo	3028,5	37,9	3419,9	42,7
Mínimo	1924,4	24,1	2465,7	30,8
Desvio padrão (σ)	322,0	4,0	276,5	3,5
Variância (σ^2)	103678,9	16,2	76452,2	11,9
C.V. (%)	13,4	13,4	9,4	9,4

Assim como nos resultados do ensaio à compressão das ligações, verificou-se a adequação dos resultados à distribuição normal através do teste de normalidade de Shapiro-Wilk realizado no *software* PAST. Para os arrancamentos realizados no Equipamento Fixo, obteve-se um valor de prova (p-value) de 0,948, enquanto um p-value de 0,978 foi obtido para o Equipamento Móvel. Sendo assim, por estes valores serem superiores a 0,05, não se rejeita a hipótese dos resultados provirem de uma distribuição normal com uma confiança de 95%.

A Figura 4.35 apresenta os valores médios e desvios-padrão da resistência ao arrancamento perpendicular às fibras por grupo ensaiado, enquanto o Quadro 4.17 e o Quadro 4.18 apresentam o resumo dos resultados (valores médios e desvios-padrão) dos parâmetros medidos para cada grupo.

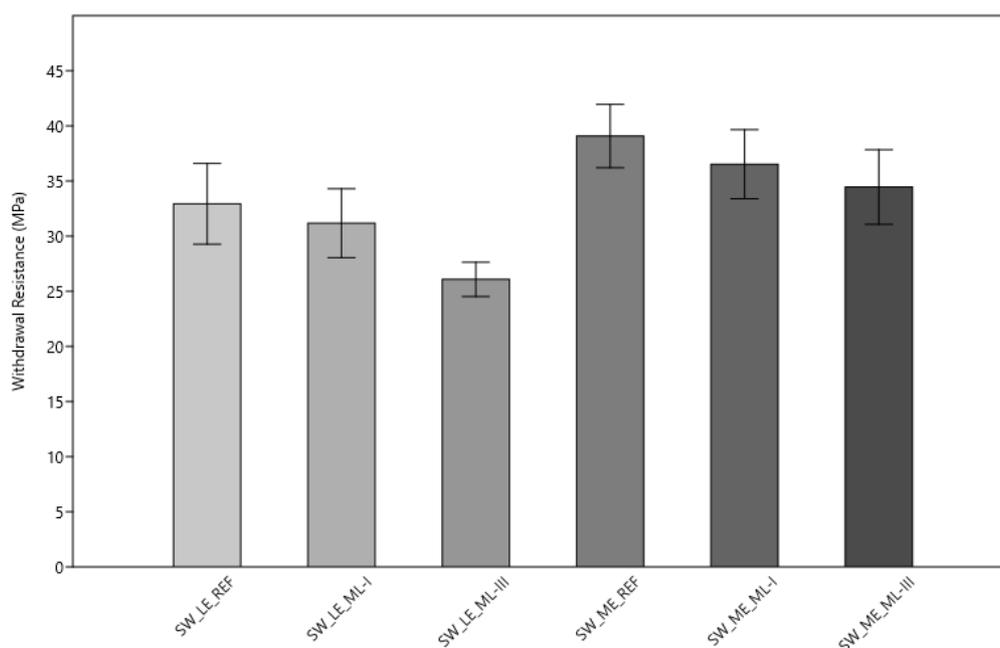


Figura 4.35 - Valores médios e desvios-padrão de arrancamento perpendicular às fibras obtidos para cada grupo.

Quadro 4.17 - Valores médios e desvios-padrão de perda de massa (%), massa volúmica original (kg/m³), massa volúmica residual (kg/m³) e resistência ao arrancamento perpendicular às fibras (MPa) dos grupos ensaiados no Equipamento Fixo.

Grupos	SW_LE_REF	SW_LE_ML-I	SW_LE_ML-III
Quantidade	4	4	4
Perda de massa (%)	0	3,0 ± 0,1	6,8 ± 0,3
Massa volúmica original (kg/m ³)	549 ± 24	564 ± 30	543 ± 25
Massa volúmica residual (kg/m ³)	549 ± 24	547 ± 30	506 ± 25
Resistência ao arrancamento (MPa)	32,9 ± 3,7	31,2 ± 3,1	26,1 ± 1,6

Quadro 4.18 - Valores médios e desvios-padrão de perda de massa (%), massa volúmica original (kg/m³), massa volúmica residual (kg/m³) e resistência ao arrancamento perpendicular às fibras (MPa) dos grupos ensaiados no Equipamento Móvel.

Grupos	SW_ME_REF	SW_ME_ML-I	SW_ME_ML-III
Quantidade	4	4	4
Perda de massa (%)	0	3,1 ± 0,2	6,6 ± 0,3
Massa volúmica original (kg/m ³)	563 ± 32	551 ± 19	549 ± 27
Massa volúmica residual (kg/m ³)	563 ± 32	533 ± 19	513 ± 26
Resistência ao arrancamento (MPa)	39,1 ± 2,9	36,5 ± 3,1	34,5 ± 3,4

Tal como aconteceu para os resultados obtidos para os ensaios à compressão das ligações, é possível inferir através da Figura 4.35, Quadro 4.17 e Quadro 4.18 que a diferença entre os resultados do grupo de referência e o grupo com menor perda de massa (valores médios de 3,0% e 3,1%) não são relevantes, apesar de apresentarem uma pequena redução da resistência ao arrancamento. Porém, ao aumentar a percentagem em perda de massa, os valores médios de resistência apresentam um decréscimo.

Além disso, através da análise da Figura 4.35, é possível verificar que os resultados obtidos nos ensaios realizados no Equipamento Móvel apresentaram resultados superiores aos obtidos nos ensaios realizados no Equipamento Fixo.

De acordo com o Eurocódigo 5 (EN 1995, 2004), a resistência característica para o arrancamento perpendicular às fibras pode ser calculada a partir da equação 4.5.

$$f_{ax,90,k} = 0,52 \times d^{-0,5} \times l_{ef}^{-0,1} \times \rho_k^{0,8} \quad [4.5]$$

Onde, d corresponde ao diâmetro exterior do parafuso (mm), l_{ef} ao comprimento de penetração do parafuso (mm) e ρ_k à massa volúmica característica da madeira (kg/m³).

Estabeleceram-se as correlações da resistência ao arrancamento com a massa volúmica original, a massa volúmica residual e a perda de massa. Os resultados são apresentados nas Figuras 4.36, 4.37 e 4.38.

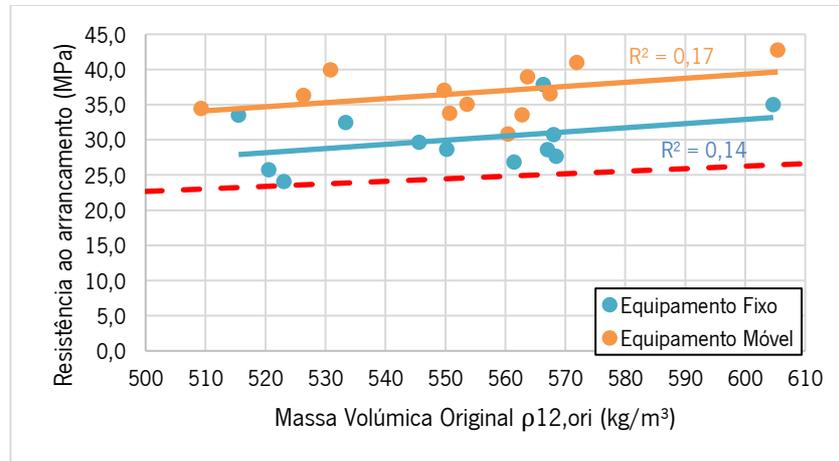


Figura 4.36 - Correlações obtidas entre a resistência ao arrancamento perpendicular às fibras e a massa volúmica original.

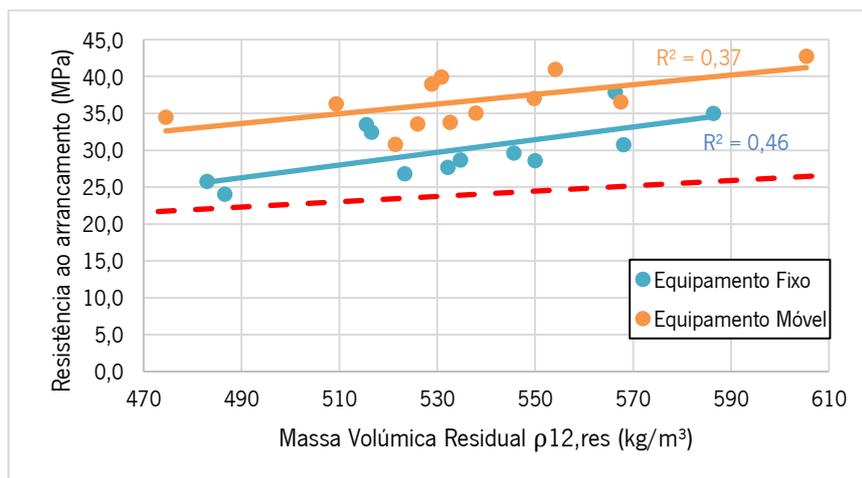


Figura 4.37 - Correlações obtidas entre a resistência ao arrancamento perpendicular às fibras e a massa volúmica residual.

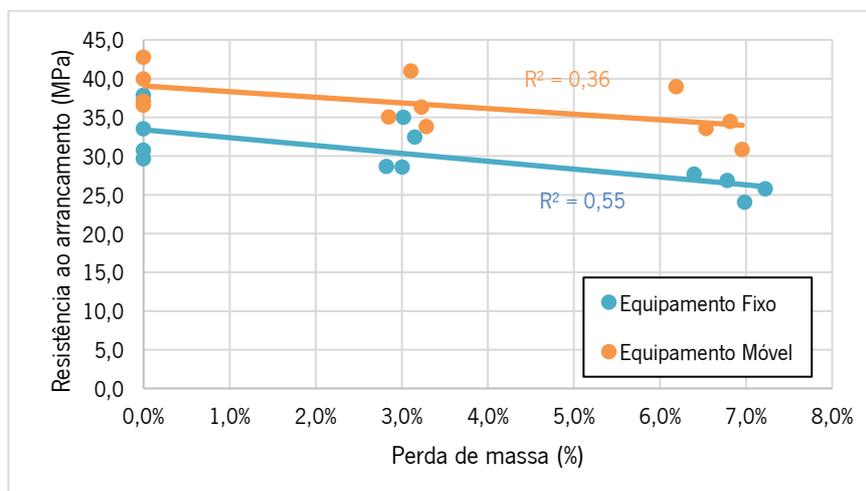


Figura 4.38 - Correlações obtidas entre a resistência ao arrancamento perpendicular às fibras e a perda de massa.

É possível observar que, para o Equipamento Fixo, o parâmetro que melhor se correlaciona com a resistência ao arrancamento é a perda de massa ($R^2=0,55$), em seguida a massa volúmica residual ($R^2=0,46$) e a menor correlação foi obtida para a massa volúmica original ($R^2=0,17$). Enquanto para o Equipamento Móvel, a perda de massa e massa volúmica residual apresentaram valores sem diferenças relevantes ($R^2=0,36$ e $R^2=0,37$) e a massa volúmica original apresentou a menor correlação ($R^2=0,14$). É de se ressaltar que o pequeno número de provetes ensaiados (12 para cada equipamento) faz com que cada valor tenha uma elevada influência na correlação obtida a partir da regressão linear dos resultados. Estudos como o de Parracha (2018) e Maldonado et al. (2007) obtiveram correlações entre a resistência ao arrancamento perpendicular às fibras e a massa volúmica iguais a 0,75 e 0,50 ensaiando-se provetes de madeira sã, levando a acreditar que a realização de um maior número de ensaios com massas volúmicas variadas levaria a uma melhor adequação da reta de regressão linear aos resultados.

Comparando-se os resultados obtidos para cada equipamento, apesar do Equipamento Móvel ter apresentado valores (em média) superiores ao Equipamento Fixo, as retas obtidas pela regressão linear dos resultados assemelham-se e, ao serem comparadas com a reta obtida a partir da equação 4.5 sugerida pelo Eurocódigo 5 (EN 1995, 2004), é possível inferir que, apesar de resultados absolutos diferentes, a inclinação da reta indica que o comportamento da madeira ao ser submetido ao ensaio de arrancamento foi conforme o esperado.

4.4. Conclusões

O presente capítulo teve como objetivo principal a avaliação do impacto da degradação devido à ação de caruncho pequeno na resistência ao corte paralelo às fibras de ligações de carpintaria de dente simples (Perna-Linha). Para isso, recorreu-se à simulação da degradação a partir de galerias perfuradas manualmente com três níveis de degradação diferentes, duas configurações de zonas degradadas e ensaios à compressão das ligações. Adicionalmente, o capítulo teve como objetivos secundários a validação da técnica de quantificação da degradação por ação de caruncho pequeno através de imagens μ -XCT, além da análise da viabilidade da utilização do equipamento MATEST Digital pull-off tester E142-01 na execução de ensaios de arrancamento de parafusos em madeiras *in situ*.

As principais conclusões deste estudo são:

- A simulação da degradação por meio da perfuração manual de galerias não atingiu os valores de perda de massa e de redução da área resistente esperados, obtendo-se valores consideravelmente inferiores. Adicionalmente, a quantificação da degradação

pela perda de massa a partir de pesagens em provetes de dimensões estruturais mostrou-se imprecisa e inconsistente;

- A quantificação da degradação a partir da análise visual dos furos superficiais mostrou-se pouco fiável, não se devendo generalizar o nível de degradação a partir da densidade de furos visíveis na madeira;
- A utilização de imagens μ -XCT para se estimar a quantidade de material lenhoso consumido pelo caruncho pequeno apresentou resultados precisos e adequados para o uso. Por outro lado, ainda é preciso estabelecer a quantidade de amostras necessárias para se obter a representatividade do dano numa peça de dimensões estruturais;
- Comparando-se as duas configurações de degradação adotadas (degradação tanto na Perna quanto na Linha e degradação apenas na Linha) constatou-se que, nos níveis de degradação simulados, a degradação na Perna não teve influência nas propriedades mecânicas da ligação;
- Apesar de não se ter atingido os níveis de perda de massa esperados inicialmente, foi possível observar a redução da resistência ao corte paralelo às fibras com o aumento do nível de degradação, indicando que, caso a degradação desejada inicialmente fosse alcançada, reduções mais significativas na resistência ao corte paralelo às fibras seriam observadas;
- Assim como para a perda de massa, apesar de não se ter atingido os níveis de degradação esperados inicialmente, foi possível observar uma relação inversa entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a redução da área resistente. Adicionalmente, obteve-se melhor correlação entre a resistência ao corte paralelo às fibras e a redução da área resistente do que a perda de massa;
- Os resultados obtidos nos ensaios à compressão das ligações indicam que, para que a ligação não cumprisse a resistência de projeto calculada de acordo com o Eurocódigo 5 (EN 1995, 2004), seria necessária uma redução da área resistente mínima na faixa de 34,7% a 40,5%;

Obteve-se boa correlação entre a resistência ao arrancamento perpendicular às fibras, a massa volúmica e a perda de massa tanto para o equipamento fixo, quanto para o equipamento móvel, sendo um indicativo da viabilidade da utilização do equipamento móvel *in situ*.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Resumo: Neste último capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho. As principais descobertas são evidenciadas, bem como o seu valor para a comunidade de pesquisa. Por fim, são apresentadas propostas para futuros desenvolvimentos, baseadas nas limitações e sucessos do presente estudo.

5.1. Considerações finais

O objetivo principal do trabalho apresentado nesta dissertação envolve a avaliação da resistência mecânica de ligações de carpintaria com dente simples (Perna-Linha) deterioradas por ação de caruncho pequeno. Além disso, o trabalho procurou avaliar a utilização de métodos semi-destrutivos, que possam ser aplicados in situ ou a partir de amostras retiradas de elementos estruturais degradados, para a quantificação da deterioração. Seguidamente, são abordadas as principais conclusões de cada capítulo da dissertação.

- Capítulo 1 – Introdução

No capítulo 1 (Introdução), fez-se referência ao alarmante cenário climático mundial, no qual o setor da construção possuiu grande responsabilidade sendo um dos maiores emissores de gases do efeito estufa, um dos maiores consumidores de energia e matéria-prima, além de gerar um terço de todo o resíduo a nível mundial. Foi possível observar um aumento no esforço de reabilitação do edificado, procurando-se melhorar o desempenho funcional dos edifícios, e na demanda por materiais com baixas emissões de carbono, como a madeira. Entretanto, o ressurgimento da madeira como material de construção vem acompanhado de uma série de barreiras de conhecimento a serem vencidas, sendo a durabilidade da madeira uma delas.

- Capítulo 2 - A madeira como material de construção, o caso da casquinha

A revisão do estado da arte, realizada no Capítulo 2, expõe a elevada dificuldade de avaliação de estruturas existentes de madeira, uma vez que se trata de um material natural, anisotrópico, com elevada heterogeneidade e sujeito a diversas formas de degradação, entre elas a degradação biológica. Portanto, apesar de ser um material de construção tradicional, a madeira continua a possuir um comportamento desconhecido para grande parte dos intervenientes da construção (engenheiros e arquitetos), seja em relação às suas propriedades físicas e mecânicas, mas principalmente em relação à sua durabilidade. O desafio torna-se ainda maior no caso de estruturas antigas com interesse histórico, nas quais a remoção de amostras não é normalmente uma opção exequível. Torna-se assim necessário adotar uma abordagem baseada na avaliação visual ou na utilização de métodos que causem o mínimo possível de danos na estrutura (não/semi-destrutivos), atribuindo-se valores médios para as propriedades mecânicas, o que, muitas vezes, introduz um elevado grau de incerteza na análise estrutural.

Ressalta-se ainda a grande influência que parâmetros como a massa volúmica, o teor de água, a frequência/dimensões dos defeitos e singularidades possuem no comportamento mecânico e na durabilidade do material.

Tratando-se da casaquinha, destaca-se a sua difusão no mercado da construção, estando presente em quase todo o continente europeu. Além disso, a sua elevada trabalhabilidade que permite a sua utilização para diversos fins (de madeiras de toscos até madeira de limpos). Entretanto, a sua baixa performance em relação à resistência aos fungos e aos insetos, a presença frequente de nós com grandes dimensões e a sua elevada variabilidade (em consequência das diversas regiões em que a espécie existe naturalmente) são inconvenientes da sua utilização.

- Capítulo 3 – Caracterização da casquinha

Devido à elevada relevância dos defeitos/singularidades e de parâmetros como a massa volúmica e o teor água nas propriedades mecânicas e de durabilidade da madeira, principalmente ao se considerar uma espécie com grande variabilidade como a casquinha, procedeu-se à apresentação da geometria, medição da massa volúmica e do teor de água dos provetes utilizados nas campanhas experimentais do Capítulo 4. Foi ainda caracterizada por inspeção visual dos provetes, a classe de qualidade da madeira de acordo com a norma UNE 56544 (2011).

Tratando-se da massa volúmica, foi possível observar valores entre 409 kg/m³ e 716 kg/m³, evidenciando a variabilidade que a madeira pode apresentar dentro de uma mesma espécie e origem. Porém, os valores característicos e médios apresentados são compatíveis com os observados na literatura.

Por outro lado, o teor de água apresentou valores sem diferenças consideráveis. O armazenamento dos provetes em câmara climática com temperatura e humidade relativa constantes (20±1 °C e 60±5%, respetivamente) e os valores de teor de água próximos de 12% demonstraram o comportamento higroscópico da madeira e a compatibilidade da espécie com a curva higrométrica apresentada na Figura 2.15.

Por fim, a inspeção visual foi realizada em todos os provetes de ligações Perna-Linha, garantindo que todos os provetes ensaiados se enquadravam na classe de qualidade estabelecida pela norma UNE 56544 (2011). Constatou-se que os defeitos mais frequentes apresentados foram nós e fendas de secagem, sendo necessária a troca de alguns provetes que apresentaram defeitos nas zonas de esforços atuantes para que estes não interferissem nos resultados dos ensaios.

- Capítulo 4 - Caracterização mecânica de ligações perna-linha deterioradas por simulação artificial de ataque de insetos

Em relação à campanha experimental adotada neste estudo, devido à escassez de estruturas com as condições desejadas para a realização dos ensaios, procurou-se produzir a degradação biológica a partir

de uma simulação. A degradação artificial foi realizada a partir da perfuração de galerias com dimensões aproximadas daquelas observadas em madeiras degradadas por caruncho pequeno, procurando-se atingir níveis de perda de material condizentes com os observados em estudos que utilizaram madeiras deterioradas naturalmente, por exemplo Parracha (2018) e Verbist (2020). Entretanto, os níveis de degradação produzidos ficaram abaixo do esperado, tanto em relação à perda de massa, quanto em relação à redução da área resistente. O fato de não se obter os níveis de degradação desejados ressalta a conclusão obtida em estudos semelhantes de que a avaliação do nível de degradação é uma tarefa de extrema complexidade e a sua quantificação a partir da degradação superficial (densidade de furos de saída) não corresponde à real degradação no interior do elemento.

Tratando-se do modo de falha, conclui-se que, para esta geometria/tipo de ligação e para esforços axiais na Perna, a degradação causada pela simulação não influenciou no modo de rotura, em outras palavras, a degradação da Perna não induziu à rotura por esmagamento paralelo às fibras na superfície frontal e todos os provetes apresentaram rotura por corte paralelo às fibras no entalhe. Já em relação a resistência mecânica, não foram observadas reduções com elevada significância nos níveis de degradação atingidos (redução de 11%, em média, comparando-se os provetes de referência com o nível de degradação mais elevado, ML-III) e ainda foi observada uma resistência média do grupo de referência inferior ao grupo com nível de degradação mais baixo (ML-I), indicando que, para este nível de degradação, a qualidade da madeira é mais relevante que a degradação. Conclui-se ainda que, neste estudo, o parâmetro que apresentou melhor correlação com a resistência mecânica foi a redução da área de corte ($R^2=0,21$) e que uma redução da área de corte entre 34,7% - 40,5% poderia levar a ligação a apresentar valores de resistência abaixo do valor de resistência de projeto, calculado de acordo com o Eurocódigo 5 (EN 1995, 2004).

Adicionalmente, validou-se a utilização da micro tomografia computadorizada de raios X (μ -XCT) para a quantificação da perda de massa volumica decorrente do processo de degradação da madeira por caruncho pequeno. A partir da técnica semi-destrutiva para uma dada amostra com pequenas dimensões, foi possível conhecer a quantidade de material perdido (teoricamente consumida pelos carunchos), obtendo-se boa correlação com a perda de material teórica (calculadas a partir da dimensão e quantidade das galerias). Entretanto, ressalta-se que a dimensão da amostra é reduzida e deve-se estabelecer de forma mais precisa a quantidade de amostras necessárias para se obter um valor representativo para a estrutura como um todo.

Por fim, foi possível observar que a realização do ensaio de arrancamento de parafusos perpendicular às fibras com o equipamento MATEST Digital pull-off tester E142-01 (equipamento destinado para testes

de aderência entre materiais) possui grande potencial para ser utilizado *in situ*. Os valores obtidos nos ensaios realizados com o Equipamento Móvel foram (em média) acima daqueles obtidos pelo Equipamento Fixo, entretanto, apresentaram boa correlação com a massa volúmica original e a massa volúmica residual, indicando que o equipamento pode ser utilizado para avaliar a massa volúmica de madeiras degradadas *in situ*. Porém, é necessário ressaltar que os ensaios foram realizados em provetes com degradação artificial e em ambiente controlado, necessitando de validação em casos de estudos reais.

5.2. Estudos futuros

O estudo desenvolvido na presente dissertação de mestrado procurou avaliar a redução da resistência de ligações de carpintaria com dente simples (Perna-Linha) degradadas artificialmente por infestação de caruncho pequeno. Entretanto, percebeu-se a necessidade de se estudar formas mais eficientes de simulação da degradação para que se torne possível atingir níveis mais elevados e compatíveis com as estruturas encontradas *in situ*. O fato da redução da área de corte apresentar a melhor correlação com a resistência ao corte levanta a possibilidade de se estudar métodos não/semi-destrutivos para estimar essa redução de seção *in situ*, uma vez que é evidente a necessidade de estudos acerca de avaliação estrutural *in situ* a partir de testes não/semi-destrutivos que forneçam valores de referência para diferentes espécies e que possam levar a otimização das técnicas existentes.

Por fim, é proposto uma validação da utilização do equipamento MATEST Digital pull-off tester E142-01 para estimar a massa volúmica de madeiras degradadas, realizando testes *in situ* e comparando os resultados com testes realizados em laboratório. Pode-se, ainda, obter correlações para a aplicação da técnica em outras espécies de madeira e também degradadas por outros agentes biológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aira, J. R., Arriaga, F., & Íñiguez-González, G.** (2014). Determination of the elastic constants of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood by means of compression tests. *Biosystems Engineering*, *126*, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.008>
- Appleton, J.** (2003). *Reabilitação de edifícios antigos: patologias e tecnologias de intervenção*. Edições Orion.
- ASTM D143** (2021). *Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber*. ASTM Annual Book of Standards. West Conshohocken, Pa.
- Berry, R. W.** (1994). *Remedial Treatment of Wood Rot and Insect Attack in Buildings*. IHS BRE.
- Bignell, D. E., & Eggleton, P.** (2000). Termites in Ecosystems. In *Termites: Evolution, Sociality, Symbioses, Ecology* (pp. 363–387). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3223-9_17
- Branco, J. M.** (2008). *Influence of the joints stiffness in the monotonic and cyclic behaviour of traditional timber trusses. Assessment of the efficacy of different strengthening techniques* [DoctoralThesis]. RepositóriUM – Universidade do Minho. <http://hdl.handle.net/1822/8091>
- Branco, J. M., & Sousa, H. S.** (2014). *Métodos de Inspeção e Classificação Visual de Elementos de Madeira: Manual de Curso* (J. M. Branco, Ed.). Universidade do Minho.
- Branco, J. M., Verbist, M., & Descamps, T.** (2018). Design of three Step Joint typologies: Review of European standardized approaches. *Engineering Structures*, *174*, 573–585. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.073>
- Bravery, A. F., Berry, R. W., Carey, J. K., & Cooper, D. E.** (1992). *Recognising Wood Rot and Insect Damage in Buildings*. IHS BRE.
- Brischke, C., & Rapp, A. O.** (2008). Dose–response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites. *Wood Science and Technology*, *42*(6), 507–518. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0191-8>

- Brischke, C., & Alfredsen, G.** (2020). Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(9), 3781–3795. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10479-1>
- Cachim, P.** (2014). *Construção em Madeira. A Madeira Como Material de Construção* (2ª ed.). Publindústria.
- Câmara municipal de Lisboa.** (s.d.). Acesso em 16/02/2022. <https://informacoeseservicos.lisboa.pt/contactos/diretorio-da-cidade/palacete-ribeiro-da-cunha-incluindo-o-jardim>.
- Carvalho, A.** (1996). *Madeiras Portuguesas. Estrutura anatómica, Propriedades e Utilizações*. Direcção Geral das Florestas.
- CEI-Bois.** (2019). *EU Forest-Based Industries 2050 - A vision of sustainable choices in a climate-friendly future*. Bruxelas.
- Charles, F., Coston-Guarini, J., Guarini, J.-M., & Lantoine, F.** (2018). It's what's inside that counts: computer-aided tomography for evaluating the rate and extent of wood consumption by shipworms. *Journal of Wood Science*, 64(4), 427–435. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1716-x>
- Cóias, V.** (2007). *Reabilitação estrutural de edifícios antigos: Alvenaria, madeira: técnicas pouco intrusivas* (2ª ed.). Argumentum.
- Costa, F. P.** (1930a). Fascículo 1 - Asnas de madeira. In *Enciclopédia prática da construção civil*. Portugalia Editora.
- Costa, F. P.** (1930b). Fascículo 7 - Pavimentos de madeira. In *Enciclopédia prática da construção civil*. Portugalia Editora.
- Cruz, H., Machado, J. S., & Nunes, L.** (1994). Problemas de conservação de madeira em edifícios. In *2º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, ENCORE* (pp. 301–312).
- Cruz, H., & Nunes, L.** (2012). Madeira. In F. Margarido & M. C. Gonçalves (Eds.), *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção* (pp. 629–661). IST Press.
- Cruz, H., & Machado, J. S.** (2013). Effects of Beetle Attack on the Bending and Compression Strength Properties of Pine Wood. *Advanced Materials Research*, 778, 145–151. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.778.145>

- Cruz, H., Yeomans, D., Tsakanika, E., Macchioni, N., Jorissen, A., Touza, M., Mannucci, M., & Lourenço, P. B.** (2014). Guidelines for On-Site Assessment of Historic Timber Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(3), 277–289. <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.774070>
- Cruz, H., Jones, D., & Nunes, L.** (2015). Wood. In *Materials for Construction and Civil Engineering* (pp. 557–583). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3_12
- Cunha, C. J. P. d.** (2017). *Caracterização das propriedades de madeiras africanas, Câmbala e Sapelli* [DoctoralThesis]. RUN – Repositório da Universidade Nova de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10362/27870>
- Dinwoodie, J. M.** (2000). *Timber Its nature and behaviour* (2^a ed.). E & FN Spon.
- Driscoll, W. C.** (1996). Robustness of the ANOVA and Tukey-Kramer statistical tests. *Computers & Industrial Engineering*, 31(1-2), 265–268. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(96\)00127-1](https://doi.org/10.1016/0360-8352(96)00127-1)
- Duarte, S., Nobre, T., Borges, P. A. V., & Nunes, L.** (2018). Symbiotic flagellate protists as cryptic drivers of adaptation and invasiveness of the subterranean termite *Reticulitermes grassei* Clément. *Ecology and Evolution*, 8(11), 5242–5253. <https://doi.org/10.1002/ece3.3819>
- Eaton, R. A., & Hale, M. D. C.** (1993). *Wood: Decay, Pests and Protection*. Chapman & Hall.
- EN 13183** (2002). *Moisture content of a piece of sawn timber*. Brussels: CEN – European Committee for Standardization.
- EN 1382** (2016). *Timber Structures - Test methods - Withdrawal capacity of timber fasteners*. Brussels: CEN – European Committee for Standardization.
- EN 1912** (2012). *Structural Timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species*. Brussels: CEN – European Committee for Standardization.
- EN 1995** (2004). *Eurocode 5: Design of timber structures*. Brussels: CEN – European Committee for Standardization.
- EN 335** (2013). *Durability of wood and wood-based products. Use Classes: definitions, application to solid wood and wood-based products*. Brussels: CEN – European Committee for Standardization.
- EN 338** (2016). *Structural timber – Strength classes*. Brussels: CEN – European Committee for Standardization.

EN 350 (2016). *Durability of wood and wood-based products - Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials*. Brussels: CEN – European Committee for Standardization.

EN 384 (2016). *Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density*. Brussels: CEN – European Committee for Standardization.

EN 408 (2010). *Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*. Brussels: CEN – European Committee for Standardization.

EN 460 (1994). *Durability of wood and wood-based products - Natural durability of solid wood - Guide to the durability requirements for wood to be used in hazard classes*. Brussels: CEN – European Committee for Standardization.

Ferreira, M. T., Borges, P. A. V., Nunes, L., Myles, O., Guerreiro, O., & Scheffrahn, R. H. (2013) Termites (Isoptera) in the Azores: an overview of the four invasive species currently present in the archipelago. *Arquipelago – Life and Marine Sciences* 30, 39-55.

Franzoni, E. (2018). State-of-the-art on methods for reducing rising damp in masonry. *Journal of Cultural Heritage*, 31, S3–S9. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.001>

Freitas, V. (2012). Manual de apoio ao projeto de reabilitação de edifícios antigos. *Porto: Ordem dos Engenheiros da Região Norte*.

Fuchs, A., Schreyer, A., Feuerbach, S., & Korb, J. (2004). A new technique for termite monitoring using computer tomography and endoscopy. *International Journal of Pest Management*, 50(1), 63–66. <https://doi.org/10.1080/0967087032000159300>

Gilfillan, J. R., & Gilbert, S. G. (2001). Development of a technique to measure the residual strength of woodworm infested timber. *Construction and Building Materials*, 15(7), 381–388. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(01\)00004-6](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(01)00004-6)

Gonçalves, L., Carvalho, A. G. d., Trevisan, H., & Fernandes, M. d. C. A. (2020). Identification and control of wood-deteriorating fungi. *Arquivos do Instituto Biológico*, 87. <https://doi.org/10.1590/1808-1657000082020>

Goodell, B. (2020). 15 Fungi Involved in the Biodeterioration and Bioconversion of Lignocellulose Substrates. In *Genetics and Biotechnology* (pp. 369–397). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49924-2_15

- Govorushko, S.** (2018). Economic and ecological importance of termites: A global review. *Entomological Science*, 22(1), 21–35. <https://doi.org/10.1111/ens.12328>
- Hamburg, P., Lellep, K., & Kiisa, M.** (2018). *International study on best practices and knowledge gaps for construction of high-rise timber buildings*. Sustainable High-Rise Buildings Designed and Constructed in Timber (HiTimber).
- Henriques, D., Nunes, L., & Brito, J.** (2012). An Experimental Approach to the Treatment and Consolidation of Degraded Timber Elements from a XIX Century Building. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, 11, 7–13.
- Himmi, S. K., Yoshimura, T., Yanase, Y., Mori, T., Torigoe, T., & Imazu, S.** (2016). Wood anatomical selectivity of drywood termite in the nest-gallery establishment revealed by X-ray tomography. *Wood Science and Technology*, 50(3), 631–643. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0800-x>
- Kigawa, R., Torigoe, T., Imazu, S., Honda, M., Harada, M., Komine, Y., & Kawanobe, W.** (2009). Detection of insects in wooden objects by X-ray CT scanner. *Science for Conservation*, 48, 223–231.
- Kretschmann, D. E.** (2011). Commercial Lumber, Round Timbers, and Ties. In R. J. Ross (Ed.), *Wood Handbook. Wood as an Engineering Material*. USDA.
- Labra, M., Grassi, F., Sgorbati, S., & Ferrari, C.** (2006). Distribution of genetic variability in southern populations of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from the Alps to the Apennines. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 201(6), 468–476. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2005.10.004>
- Lee, K. E.** (1971). *Termites and soils*. Academic Press.
- Leicester, R. H.** (2001). Engineered durability for timber construction. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3(3), 216–227. <https://doi.org/10.1002/pse.72>
- LNEC** (1995). *Terminologia de madeiras. Especificação E31*. Lisboa.
- LNEC** (1997a) *Madeira para a construção: Casquinha. Ficha M4*. Lisboa.
- LNEC** (1997b). *Madeira para construção: Pinho bravo para estruturas. Ficha M2*. Lisboa.
- LNEC** (1997c). *Madeira para a construção: Humidade da madeira. Ficha M9*. Lisboa.

- Lourenço, P. B., & Branco, J. M.** (2012). Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI. In *História da Construção: Arquiteturas e Técnicas Construtivas* (pp. 199–211). Centro de Investigação Transdisciplinar Cultura, Espaço e Memória (CITCEM).
- Machado, J. S., Cruz, H., Custódio, J., Palma, P., & Dias, A.** (2009). *Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira* (J. S. Machado, Ed.). Verlag Dashöfer, Lisboa.
- Machado, J. S., & Palma, P.** (2011). Non-destructive evaluation of the bending behaviour of in-service pine timber structural elements. *Materials and Structures*, 44(5), 901–910. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9674-9>
- Maldonado, I. B., Esteban Herrero, M., Íñiguez González, G., Arriaga Martitegui, F., Ballarín Montesinos, D., & Palacios Monteagudo, J.** (2007). Density estimation by screw withdrawal resistance and probing in structural sawn coniferous timber, and modulus of elasticity assessment. *Informes de la Construcción*, 59(506). <https://doi.org/10.3989/ic.2007.v59.i506.513>
- Masaeli, M., Gilbert, B. P., Karampour, H., Underhill, I. D., Lyu, C. H., & Gunalan, S.** (2020). Scaling effect on the moment and shear responses of three types of beam-to-column connectors used in mass timber buildings. *Engineering Structures*, 208, 110329. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110329>
- Maurício, A., Figueiredo, C., Alves, C., Pereira, M. F., Aires-Barros, L., & Neto, J. A. N.** (2010). Microtomography-Based Pore Structure Modelling of Geologic Materials Used as Building and Dimension Stones. *Materials Science Forum*, 636-637, 1306–1312. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.636-637.1306>
- Maurício, A., Pereira, M. F. C., Flores-Colen, I., Silva, L., & Fontes, A.** (2012). Microtomografia computadorizada de raios X aplicada ao estudo de argamassas. In *Congresso APFAC*, Coimbra.
- Milton, F. T.** (1986). *The Preservation of Wood: A Self Study Manual for Wood Treaters*. Minnesota Extension Service.
- Munafò, P., Stazi, F., Tassi, C., & Davì, F.** (2015). Experimentation on historic timber trusses to identify repair techniques compliant with the original structural–constructive conception. *Construction and Building Materials*, 87, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.086>
- Negrão, J., & Faria, J. A.** (2009). *Projecto de Estruturas de Madeira*. Publindústria.
- NP 180** (1962). *Anomalias e defeitos da madeira*. Norma Portuguesa, IGPAI, Lisboa.

NP 4305 (1995). *Madeira serrada de pinho bravo para estruturas. Classificação Visual*. Monte da Caparica: IPQ – Instituto Português da Qualidade.

NP 616 (1973). *Madeiras. Definição da massa volúmica*. Norma Portuguesa, IGPAL, Lisboa.

Nunes, L., Cruz, H., Fragoso, M., Nobre, T., Machado, J. S., & Soares, A. (2005). Impact of drywood termites in the Islands of Azores. *IABSE Symposium Report*, 90(3), 114–120. <https://doi.org/10.2749/222137805796271422>

Nunes, L. (2008) Termite infestation risk in Portuguese historic buildings. *Cost Action IE0601 Wood Science for Conservation of Cultural Heritage*. Braga.

Nunes, L., & Cruz, H. (2003). Fungal degradation of wood in buildings. In *RILEM International Conference on Microbial Impact on Building Materials*. RILEM Publications SARL. <https://doi.org/10.1617/2351580184.009>

Nunes, L. (2013). Bases para a monitorização do risco de degradação na construção de casas de madeira. In P. B. Lourenço, J. M. Branco, H. Cruz & L. Nunes (Eds.), *Casas de Madeira* (pp. 29–38). LNEC.

Oslet, G. (1890). *Traité de charpente en bois. Encyclopédie théorique & pratique des connaissances civiles et militaires. Partie Civile, Cours de construction, Quatrième partie*. Chairgrasse H. Fils, Paris, France. Digital reproduction.

Palma, P., Ferreira, J. G., & Cruz, H. (2010). Monotonic tests of structural carpentry joints. In *11th World Conference on Timber Engineering 2010 (WCTE 2010)*.

Parracha, J. L. C. R. (2018). *Avaliação do impacto de caruncho pequeno em estruturas antigas de madeira* [MasterThesis]. RUN – Repositório da Universidade Nova de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10362/56309>

Parracha, J. L., Duarte, S., Faria, P., & Nunes, L. (2018). A importância dos insetos de madeira seca na reabilitação de estruturas de madeira. In *Construção 2018 - Reabilitar e Construir de Forma Sustentável*. Porto.

Parracha, J. L., Pereira, M. F. C., Maurício, A., Machado, J. S., Faria, P., & Nunes, L. (2019). A semi-destructive assessment method to estimate the residual strength of maritime pine structural elements degraded by anobiids. *Materials and Structures*, 52(3). <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1354-9>

- Parracha, J., Pereira, M., Maurício, A., Faria, P., Lima, D. F., Tenório, M., & Nunes, L.** (2021). Assessment of the Density Loss in Anobiid Infested Pine Using X-ray Micro-Computed Tomography. *Buildings*, 11(4), 173. <https://doi.org/10.3390/buildings11040173>
- Pearce, M. J.** (1997). *Termites: Biology and pest management*. CAB International.
- Peltola, H., Gort, J., Pulkkinen, P., Zubizarreta Gerendiain, A., Karppinen, J., & Ikonen, V.-P.** (2009). Differences in growth and wood density traits in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) genetic entries grown at different spacing and sites. *Silva Fennica*, 43(3). <https://doi.org/10.14214/sf.192>
- Pfeil, W., & Pfeil, M.** (2003). *Estruturas de madeira. Dimensionamento segundo a Norma Brasileira NBR 7190/97 e critérios das Normas Norte-americana NDS e Européia EUROCODE 5* (6ª ed.). LTC.
- Project Noah.** (2014). Acesso em 16/02/2022. <https://www.projectnoah.org/spottings/878936003>.
- Rashid, A. F. A., & Yosoff, S.** (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 244-248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>
- Ridout, B.** (2000). *Timber Decay in Buildings - The Conservation Approach to Treatment*. Historic Scotland.
- Rozenbaum, O., Bergounioux, M., Maurício, A., Figueiredo, C., Alves, C., & Barbanson, L.** (2016) Versatile three-dimensional denoising and segmentation method of X-ray tomographic images: applications to geomaterials characterizations. Hal-01255507.
- Tannert, T., Anthony, R. W., Kasal, B., Kloiber, M., Piazza, M., Riggio, M., Rinn, F., Widmann, R., & Yamaguchi, N.** (2014). In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques. *Materials and Structures*, 47(5), 767–785. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0094-5>
- Teles, C. D. M., & Do Valle, A.** (2001). Wood structures: Acting before deterioration. In P. B. Lourenço & P. Roca (Eds.), *Historical Constructions. Possibilities of numerical and experimental techniques*. (pp. 857–866). Universidade do Minho.
- Thybring, E. E., Kymäläinen, M., & Rautkari, L.** (2017). Experimental techniques for characterising water in wood covering the range from dry to fully water-saturated. *Wood Science and Technology*, 52(2), 297–329. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0977-7>
- Tsoumis, G. T.** (1991). *Science and technology of wood: Structure, properties, utilization*. Van Nostrand Reinhold.

UNE 56544 (2011). *Madera de coníferas. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural*. AENOR, Madrid.

Verbist, M., Branco, J. M., Poletti, E., Descamps, T., & Lourenço, P. B. (2017). Single Step Joint: overview of European standardized approaches and experimentations. *Materials and Structures*, 50(2). <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1028-4>

Verbist, M., Nunes, L., Jones, D., & Branco, J. M. (2019). Service life design of timber structures. In *Long-term Performance and Durability of Masonry Structures* (pp. 311–336). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102110-1.00011-x>

Verbist, M., Branco, J. M., & Nunes, L. (2020). Characterization of the Mechanical Performance in Compression Perpendicular to the Grain of Insect-Deteriorated Timber. *Buildings*, 10(1), 14. <https://doi.org/10.3390/buildings10010014>

Viitanen, H., Ritschkoff, A-C., & Paajanen, L. (2002). The durability of wooden products. In *European Timber Buildings as an Expression of Technological and Technical Cultures: Proceedings of Culture 2000 project, Porto, October 2002* (pp. 173-186). Elsevier.

Wiedenhoeft, A. (2011). Structure and Function of Wood. In R. J. Ross (Ed.), *Wood Handbook. Wood as an Engineering Material*. USDA.

Wilcox, W. W. (1978). Review of Literature on the Effects of Early Stages of Decay on Wood Strength. *Wood and Fiber*, 9(4), 252–257.

Woodard, A. C., & Milner, H. R. (2016). Sustainability of timber and wood in construction. In *Sustainability of Construction Materials* (pp. 129–157). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100370-1.00007-x>

Yeomans, D. (2003). *The Repair of Historic Timber Structures*. Thomas Telford, Ltd.

Zabel, R. A., & Morrell, J. J. (2020). *Wood Microbiology*. Elsevier Science & Technology.

ANEXOS

I. RESULTADOS DETALHADOS DO ENSAIO À COMPRESSÃO DAS LIGAÇÕES

PERNA-LINHA

Quadro I.1 -Massas volúmicas (ρ_w, ρ_{12}), teores de água (w), perdas de massa (ML), redução da área resistente ao corte (AR) e resistência ao corte paralelo às fibras (τ) dos 60 provetes de ligação Perna-Linha.

Provete	ρ_w (kg/m ³)		w (%)	ρ_{12} (kg/m ³)		ML (%)		AR (%)	Fmax (kN)	τ (MPa)
	Linha	Perna		Linha	Perna	Linha	Perna			
SSJ_REF_1	453	464	11,8	454	465	0%	0%	-	12,73	1,16
SSJ_REF_2	485	481	11,9	485	481	0%	0%	-	27,03	2,46
SSJ_REF_3	534	623	12,0	534	623	0%	0%	0%	45,80	4,18
SSJ_REF_4	562	690	12,2	562	689	0%	0%	0%	42,77	3,90
SSJ_REF_5	504	555	13,5	501	551	0%	0%	0%	40,56	3,70
SSJ_REF_6	521	576	13,4	518	573	0%	0%	0%	44,39	4,05
SSJ_ML-I_Tb_1	415	426	11,8	415	426	4,6%	0%	-	16,82	1,53
SSJ_ML-I_Tb_2	567	500	11,8	567	501	5,3%	0%	-	12,94	1,18
SSJ_ML-I_Tb_3	641	553	12,2	640	552	5,0%	0%	-	20,14	1,84
SSJ_ML-I_Tb_4	441	463	11,5	442	464	3,0%	0%	7,8%	30,33	2,76
SSJ_ML-I_Tb_5	535	625	12,0	535	625	3,2%	0%	9,7%	43,13	3,93
SSJ_ML-I_Tb_6	548	628	11,8	549	629	2,9%	0%	2,1%	52,97	4,83
SSJ_ML-I_Tb_7	477	537	13,3	475	535	2,5%	0%	6,7%	47,04	4,29
SSJ_ML-I_Tb_8	486	549	13,2	483	547	3,0%	0%	3,8%	50,11	4,57
SSJ_ML-I_Tb_9	589	607	13,9	585	603	3,2%	0%	4,3%	59,82	5,45
SSJ_ML-II_Tb_1	410	449	11,4	411	450	15,8%	0%	-	19,62	1,79
SSJ_ML-II_Tb_2	474	463	11,9	474	463	12,6%	0%	-	15,57	1,42
SSJ_ML-II_Tb_3	509	501	12,1	508	501	12,6%	0%	-	20,10	1,83
SSJ_ML-II_Tb_4	440	510	11,7	440	511	7,4%	0%	17,6%	38,26	3,49
SSJ_ML-II_Tb_5	538	612	11,8	538	613	7,8%	0%	16,6%	40,18	3,66
SSJ_ML-II_Tb_6	534	647	12,0	534	648	7,6%	0%	27,2%	32,23	2,94

SSJ_ML-II_Tb_7	484	534	13,2	482	532	6,4%	0%	16,1%	44,52	4,06
SSJ_ML-II_Tb_8	497	551	13,5	494	548	7,0%	0%	13,5%	39,58	3,61
SSJ_ML-II_Tb_9	552	578	14,5	547	573	8,8%	0%	16,7%	38,81	3,54
SSJ_ML-III_Tb_1	449	458	11,7	450	459	14,8%	0%	-	11,95	1,09
SSJ_ML-III_Tb_2	496	479	11,7	496	480	12,1%	0%	-	22,13	2,02
SSJ_ML-III_Tb_3	591	542	12,1	591	541	9,6%	0%	-	20,61	1,88
SSJ_ML-III_Tb_4	446	516	11,6	446	517	6,4%	0%	17,7%	38,55	3,51
SSJ_ML-III_Tb_5	519	605	11,9	519	605	6,4%	0%	22,4%	40,27	3,67
SSJ_ML-III_Tb_6	547	651	11,9	548	651	6,7%	0%	7,6%	31,96	2,91
SSJ_ML-III_Tb_7	410	512	12,4	409	511	7,6%	0%	15,9%	43,81	3,99
SSJ_ML-III_Tb_8	501	544	13,4	498	541	7,8%	0%	13,9%	50,73	4,62
SSJ_ML-III_Tb_9	551	665	13,7	548	660	6,6%	0%	22,8%	37,70	3,44
SSJ_ML-I_Tb-R_1	482	465	11,9	482	465	7,7%	4,8%	-	24,92	2,27
SSJ_ML-I_Tb-R_2	484	479	11,8	484	479	8,0%	7,5%	-	21,09	1,92
SSJ_ML-I_Tb-R_3	533	524	12,0	533	524	7,5%	8,2%	-	27,26	2,48
SSJ_ML-I_Tb-R_4	438	529	11,9	438	529	2,8%	3,6%	8,3%	40,02	3,65
SSJ_ML-I_Tb-R_5	548	585	12,2	548	585	2,8%	3,0%	13,7%	36,48	3,33
SSJ_ML-I_Tb-R_6	589	699	11,8	589	700	2,4%	2,6%	10,0%	39,17	3,57
SSJ_ML-I_Tb-R_7	489	540	13,3	486	537	3,5%	4,6%	8,9%	43,61	3,98
SSJ_ML-I_Tb-R_8	522	563	13,3	519	560	4,5%	4,4%	8,4%	47,28	4,31
SSJ_ML-I_Tb-R_9	520	564	13,3	517	561	3,9%	4,0%	10,1%	53,83	4,91
SSJ_ML-II_Tb-R_1	425	450	11,7	425	450	12,9%	13,1%	-	30,66	2,80
SSJ_ML-II_Tb-R_2	530	487	11,9	530	487	9,5%	8,9%	-	22,67	2,07
SSJ_ML-II_Tb-R_3	621	531	11,7	622	531	8,8%	9,8%	-	23,45	2,14
SSJ_ML-II_Tb-R_4	465	547	11,8	465	547	4,9%	4,7%	13,3%	44,54	4,06
SSJ_ML-II_Tb-R_5	512	555	11,7	513	555	5,1%	4,6%	12,3%	35,81	3,26
SSJ_ML-II_Tb-R_6	586	702	11,8	587	702	6,4%	5,0%	17,5%	39,96	3,64
SSJ_ML-II_Tb-R_7	480	521	12,5	479	520	6,3%	6,6%	22,4%	38,57	3,52
SSJ_ML-II_Tb-R_8	530	557	13,7	526	553	6,0%	6,1%	21,1%	40,48	3,69
SSJ_ML-II_Tb-R_9	529	574	13,2	526	571	5,1%	9,4%	19,8%	42,32	3,86
SSJ_ML-III_Tb-R_1	420	456	11,5	420	456	15,8%	8,5%	-	19,45	1,77

SSJ_ML-III_Tb-R_2	508	486	11,8	509	486	16,1%	10,8%	-	29,97	2,73
SSJ_ML-III_Tb-R_3	646	555	12,0	646	555	12,1%	8,5%	-	23,59	2,15
SSJ_ML-III_Tb-R_4	425	531	11,7	425	531	6,0%	6,4%	20,1%	35,56	3,24
SSJ_ML-III_Tb-R_5	485	551	11,7	485	552	6,4%	5,9%	12,5%	32,15	2,93
SSJ_ML-III_Tb-R_6	573	716	11,9	573	716	6,3%	5,7%	17,3%	34,94	3,19
SSJ_ML-III_Tb-R_7	447	514	13,1	445	511	6,7%	8,4%	16,3%	39,97	3,64
SSJ_ML-III_Tb-R_8	511	561	13,4	508	558	7,9%	8,7%	18,6%	41,13	3,75
SSJ_ML-III_Tb-R_9	522	569	14,3	517	564	6,2%	7,5%	21,7%	36,15	3,30

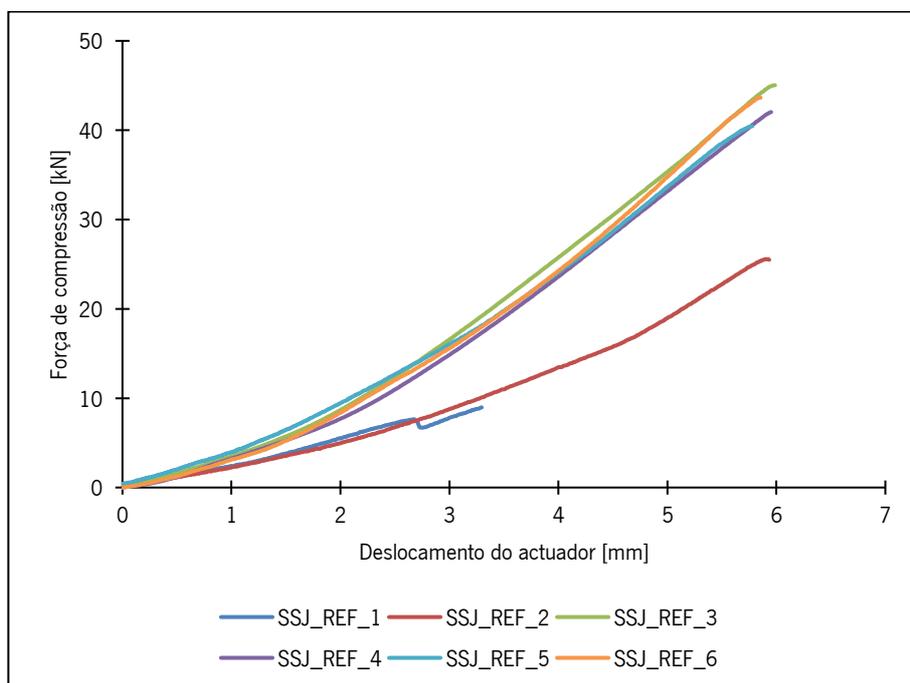


Figura I.1 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 6 provetes do grupo de referência (SSJ_REF).

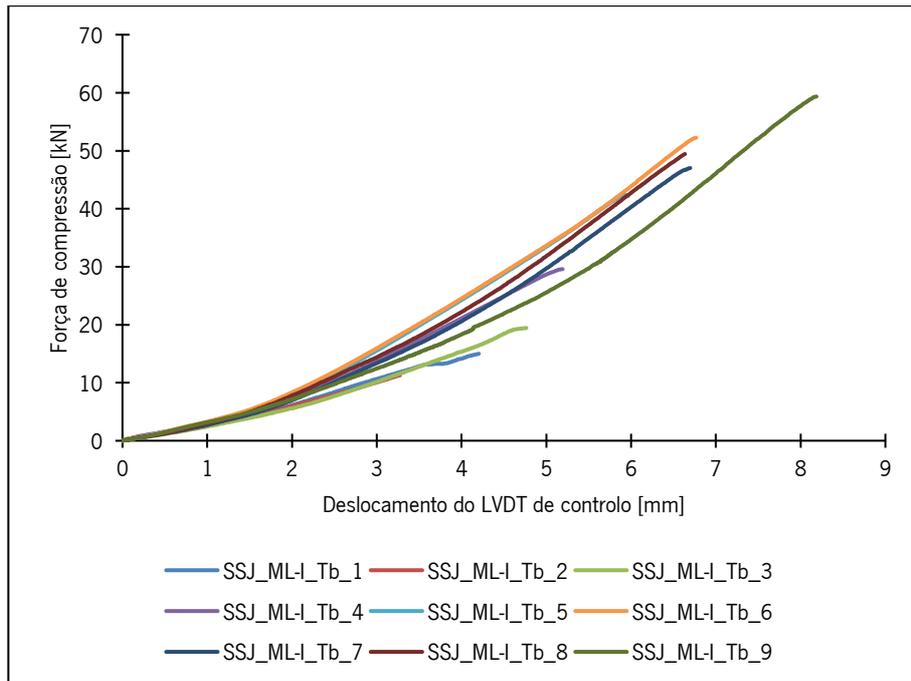


Figura I.2 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb.

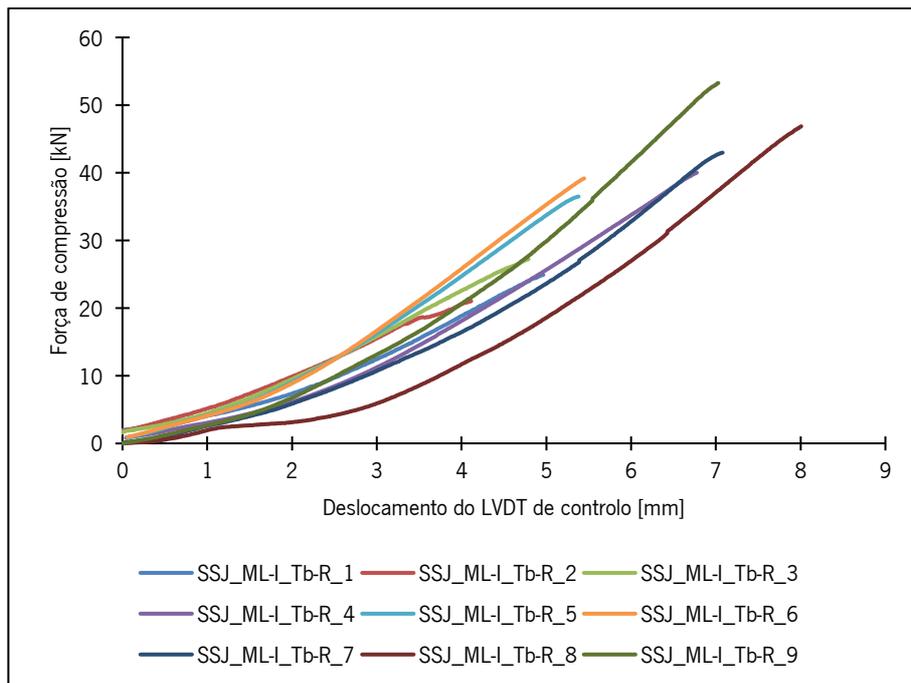


Figura I.3 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb-R.

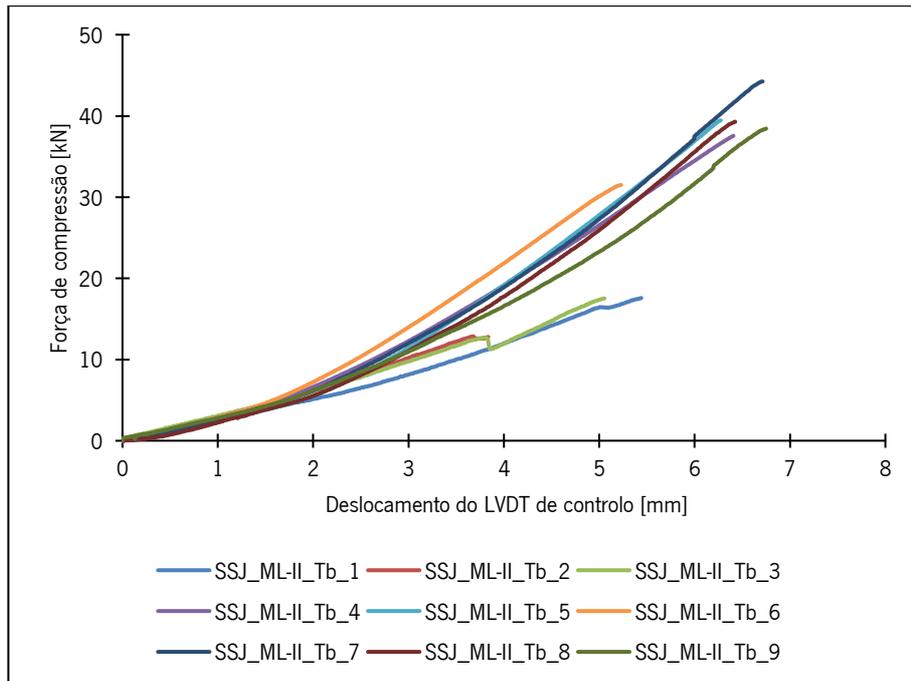


Figura I.4 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb.

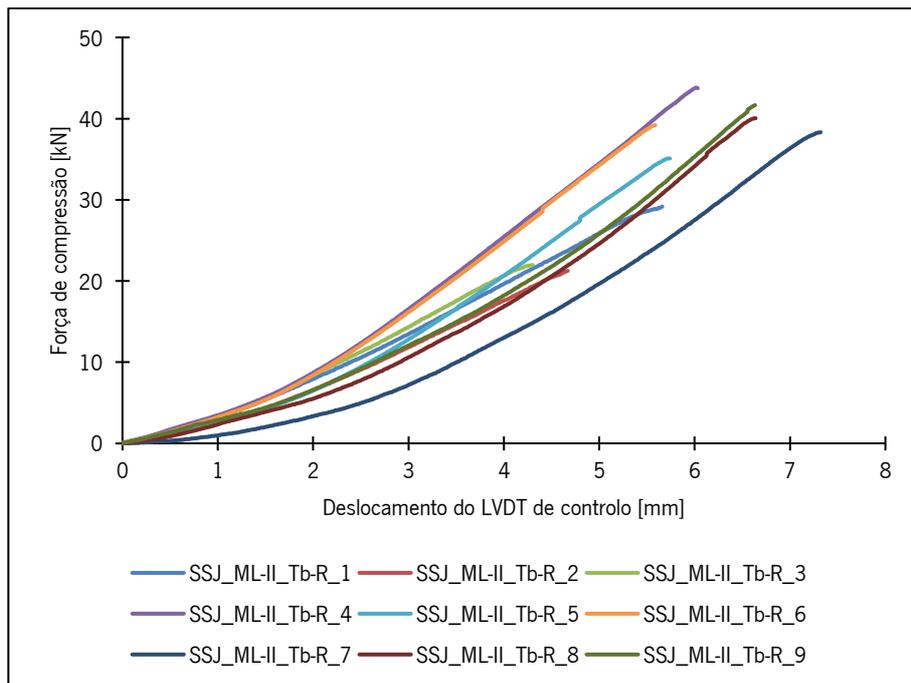


Figura I.5 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb-R.

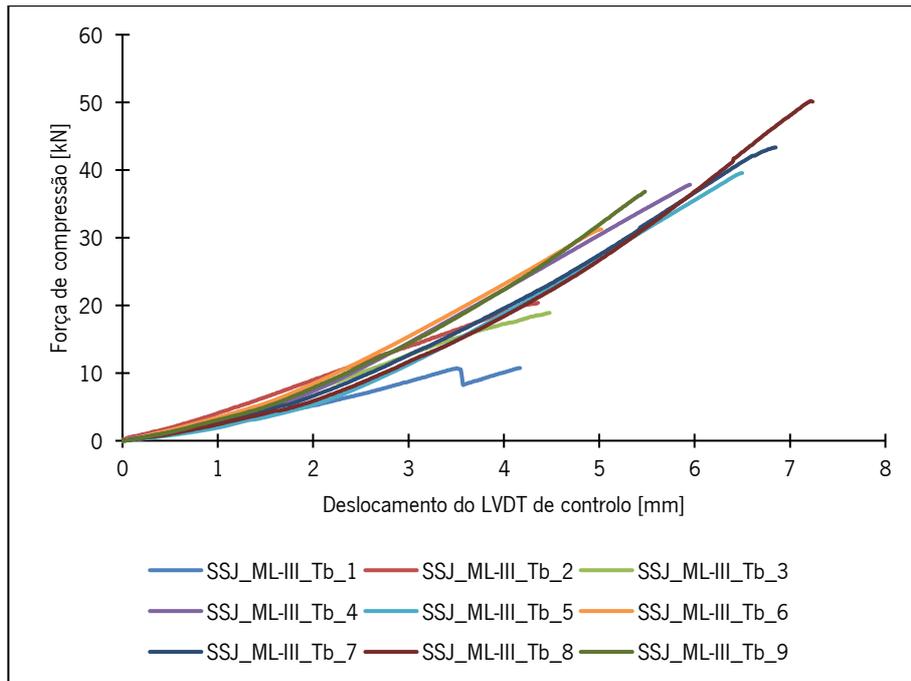


Figura I.6 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb.

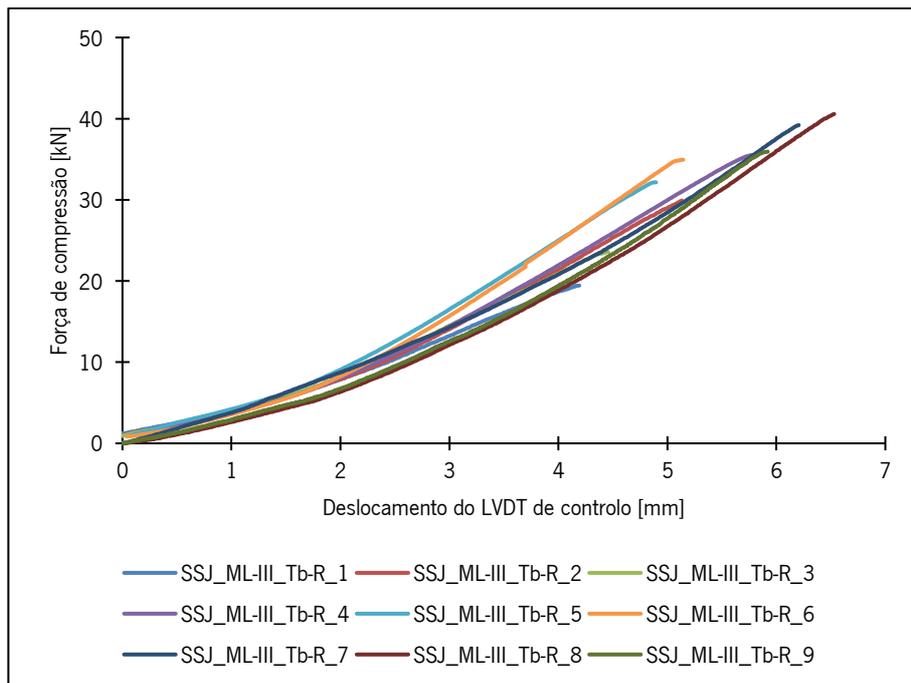


Figura I.7 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do actuador dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb-R.

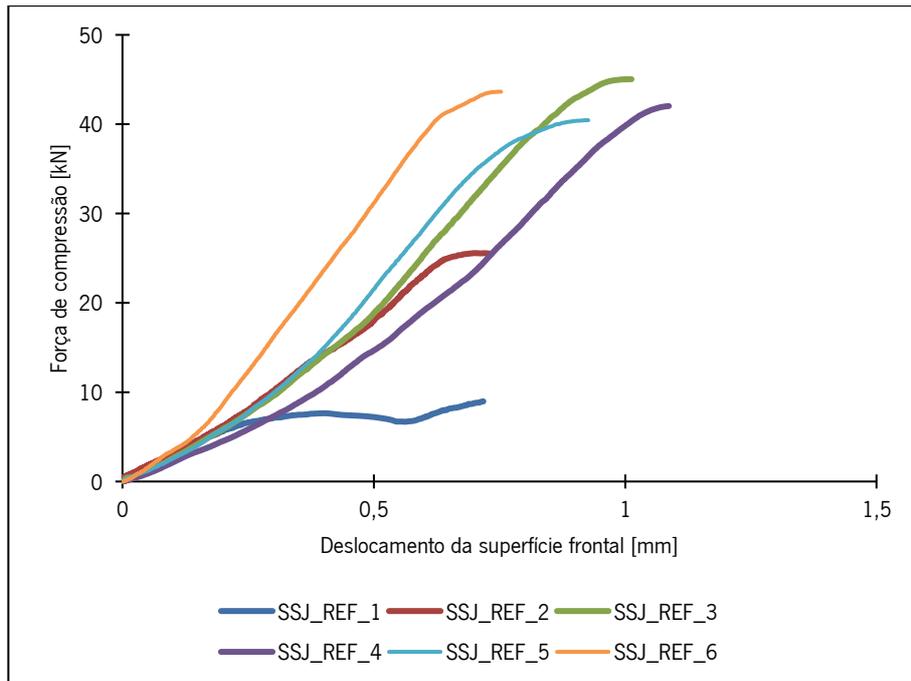


Figura I.8 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 6 provetes do grupo de referência (SSJ_REF).

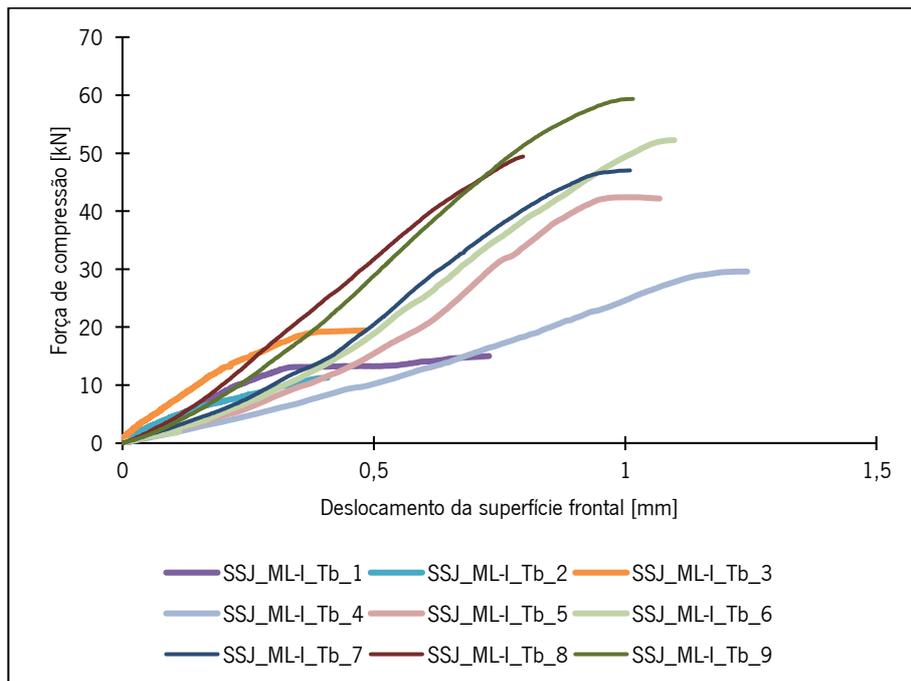


Figura I.9 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb.

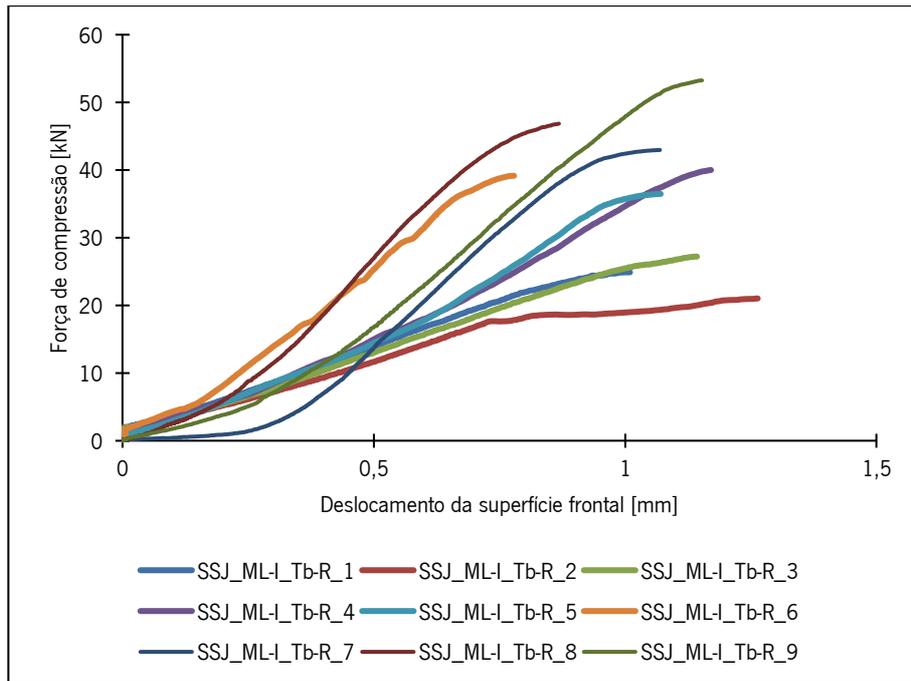


Figura I.10 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb-R.

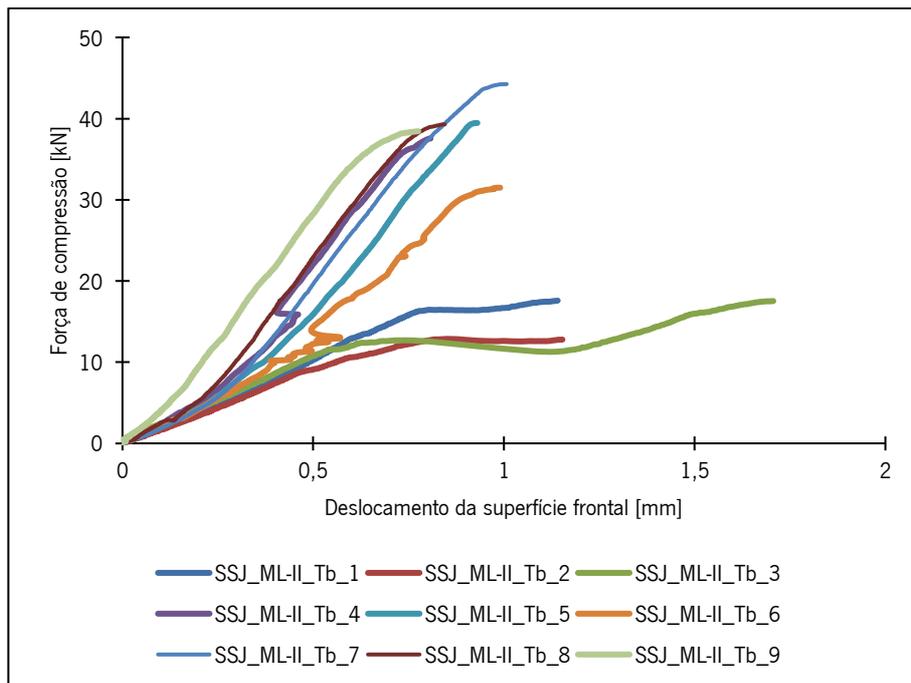


Figura I.11 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb.

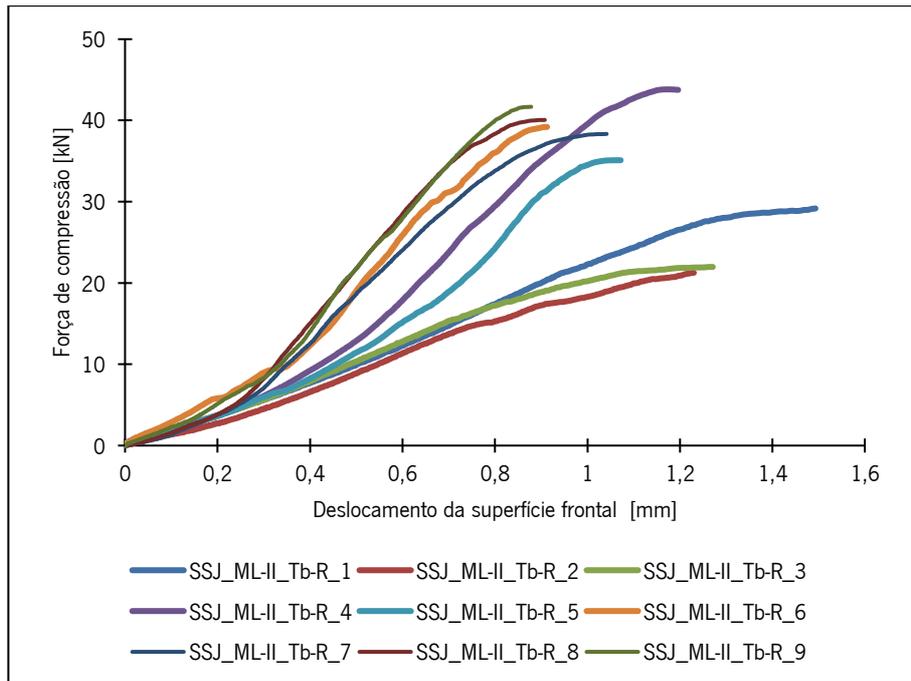


Figura I.12 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb-R.

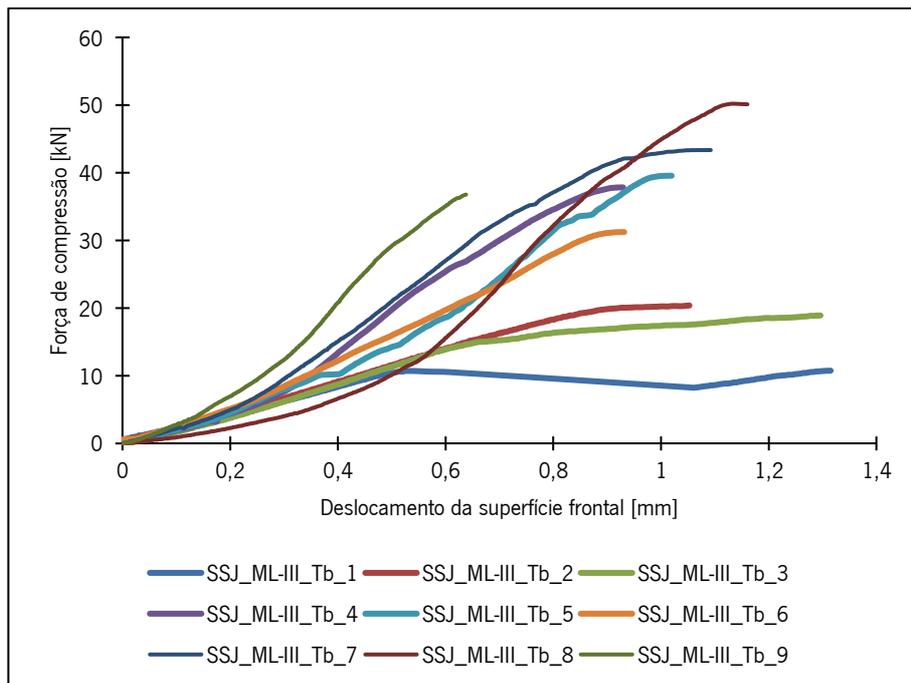


Figura I.13 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb.

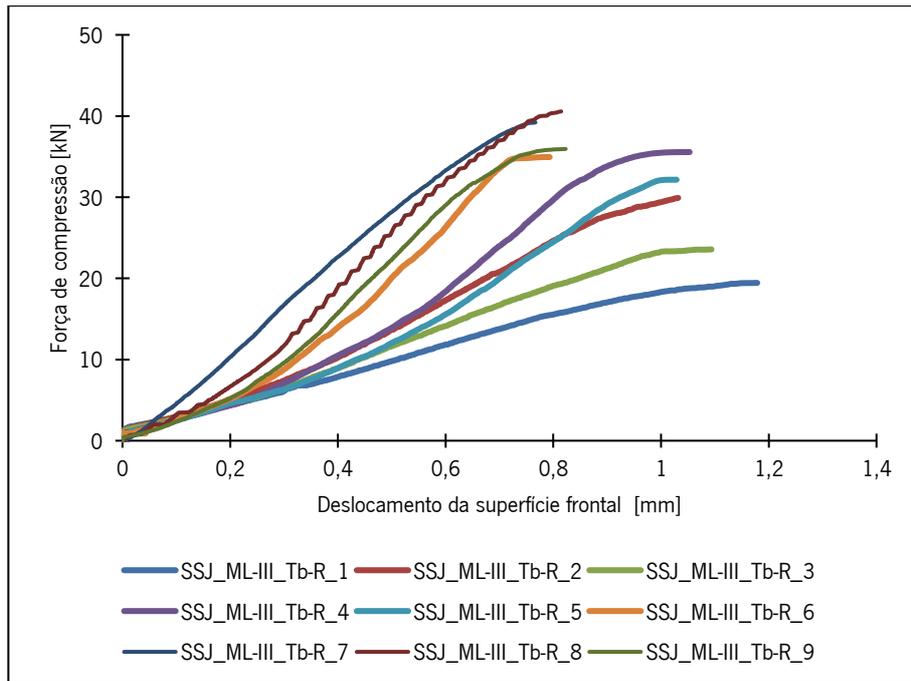


Figura I.14 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície frontal dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb-R.

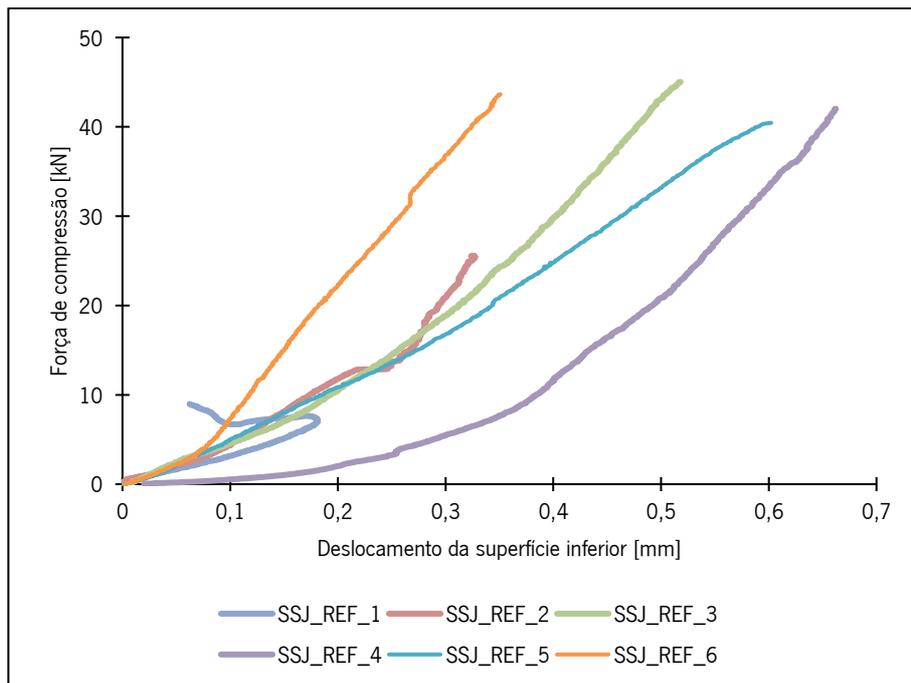


Figura I.15 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 6 provetes do grupo de referência (SSJ_REF).

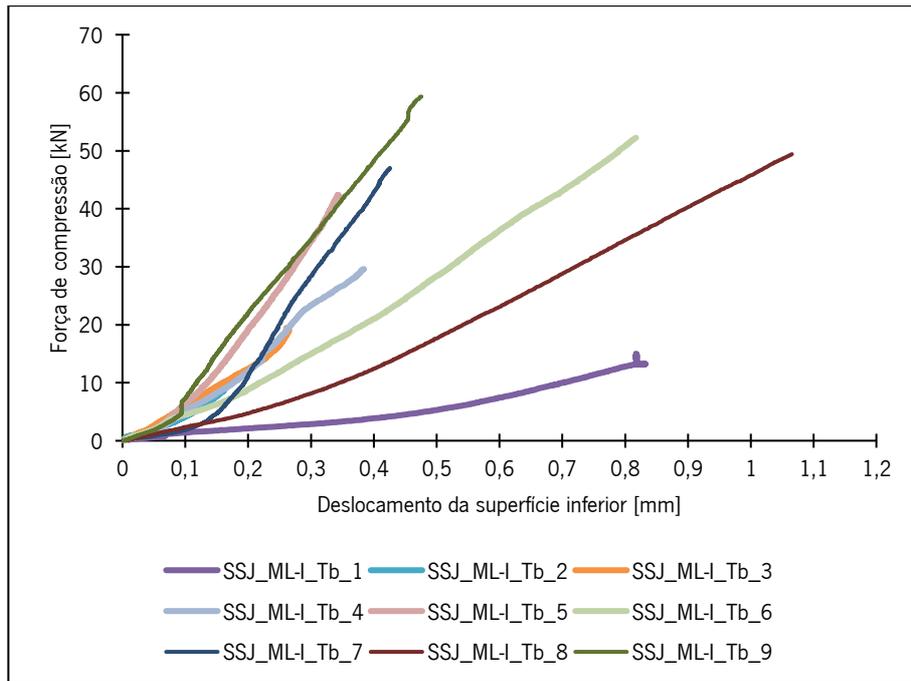


Figura I.16 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb.

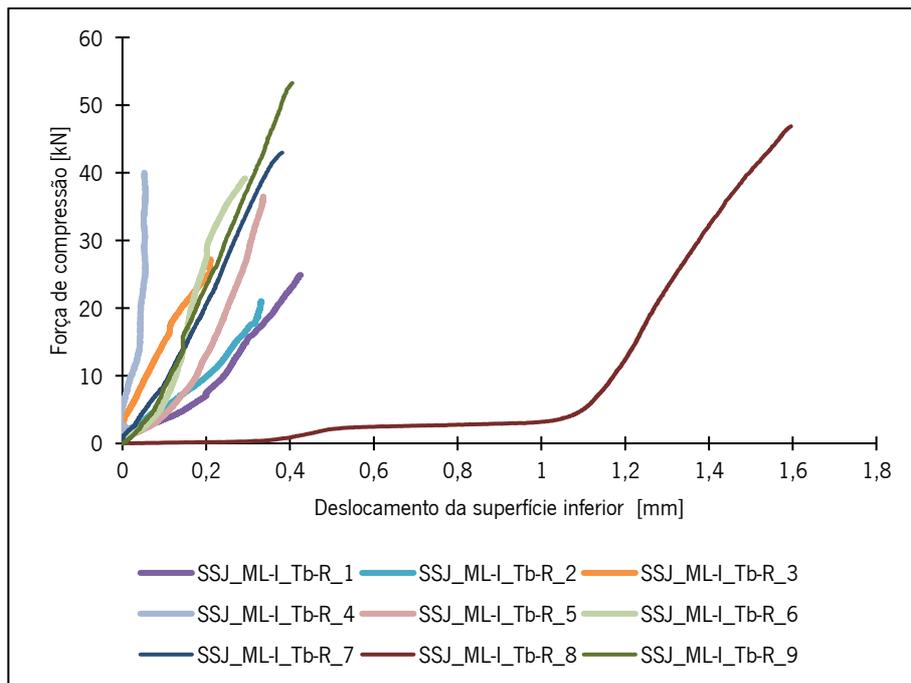


Figura I.17 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb-R.

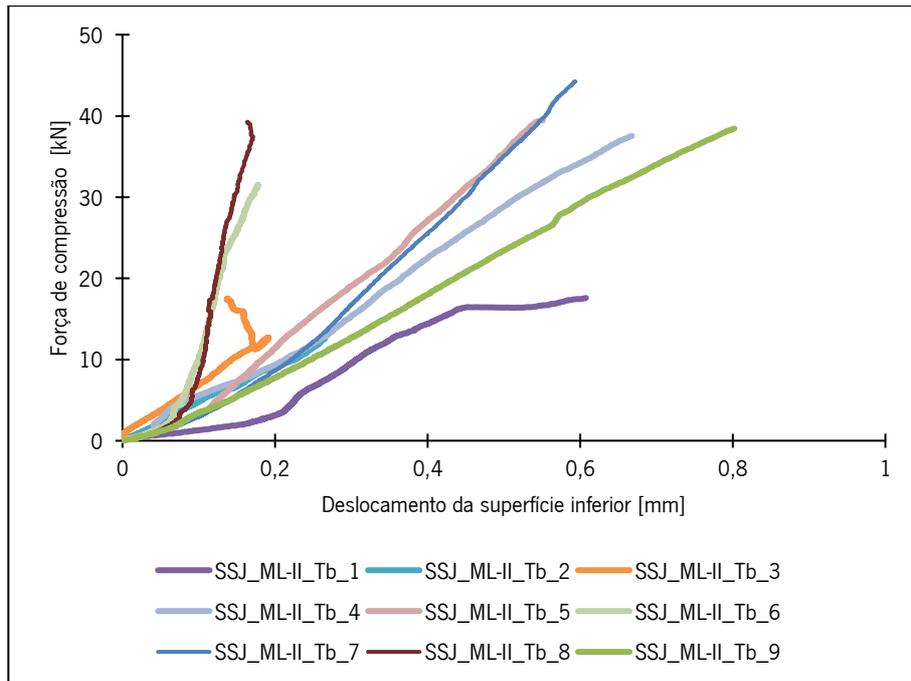


Figura I.18 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb.

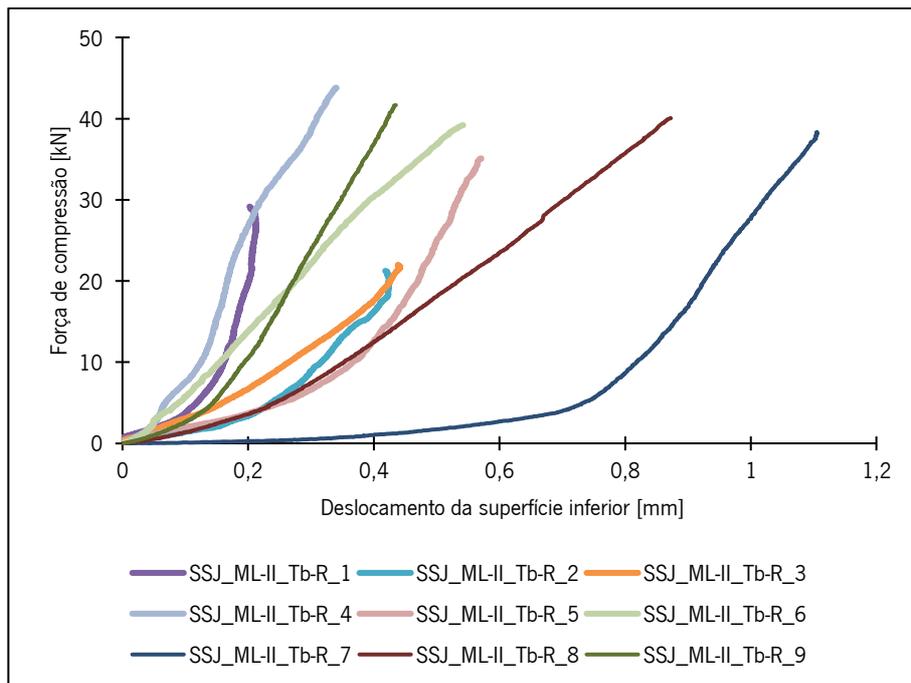


Figura I.19 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb-R.

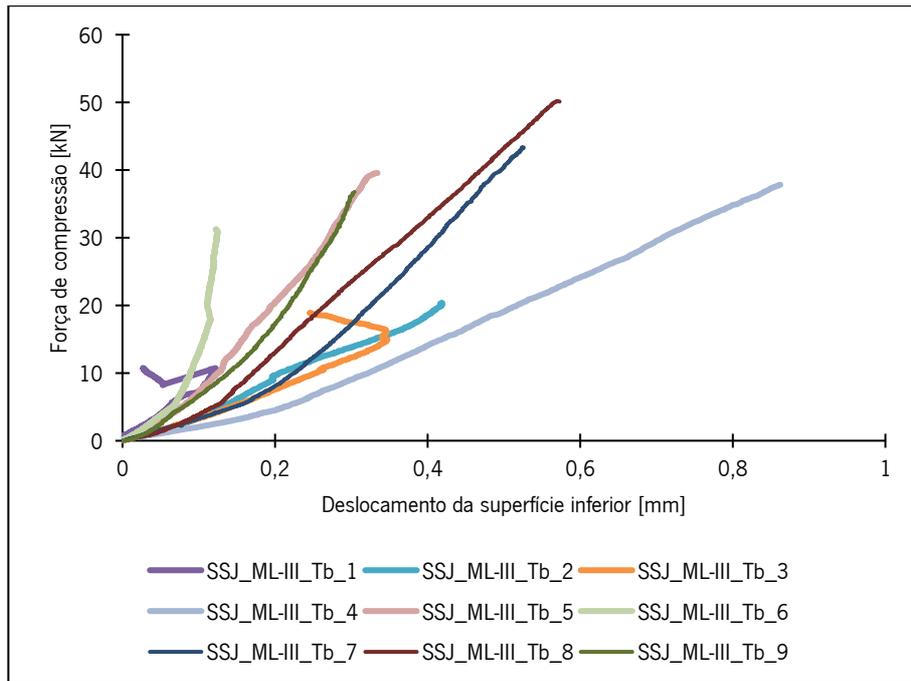


Figura I.20 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb.

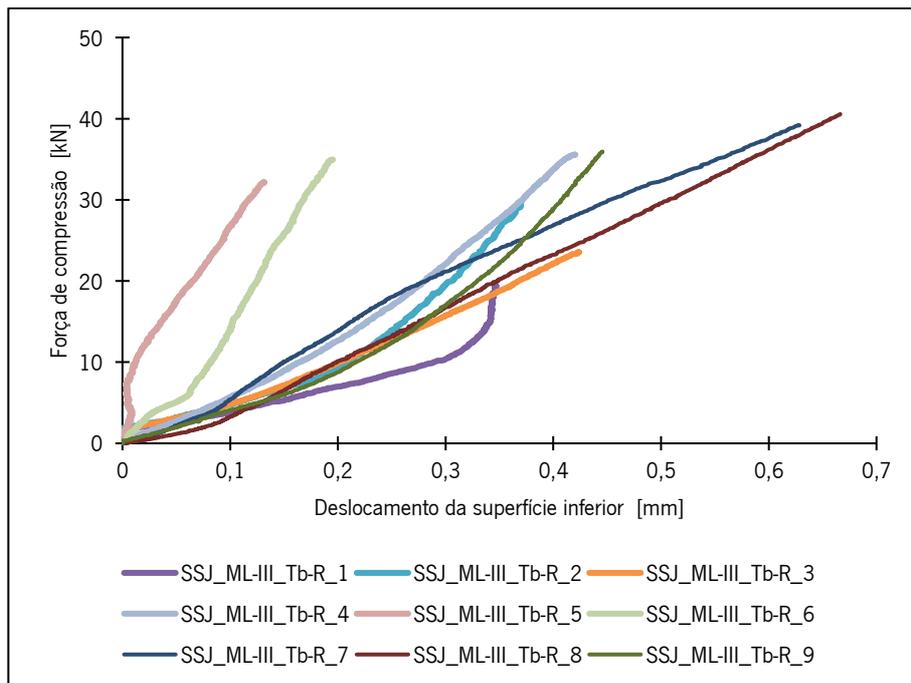


Figura I.21 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento da superfície inferior dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb-R.

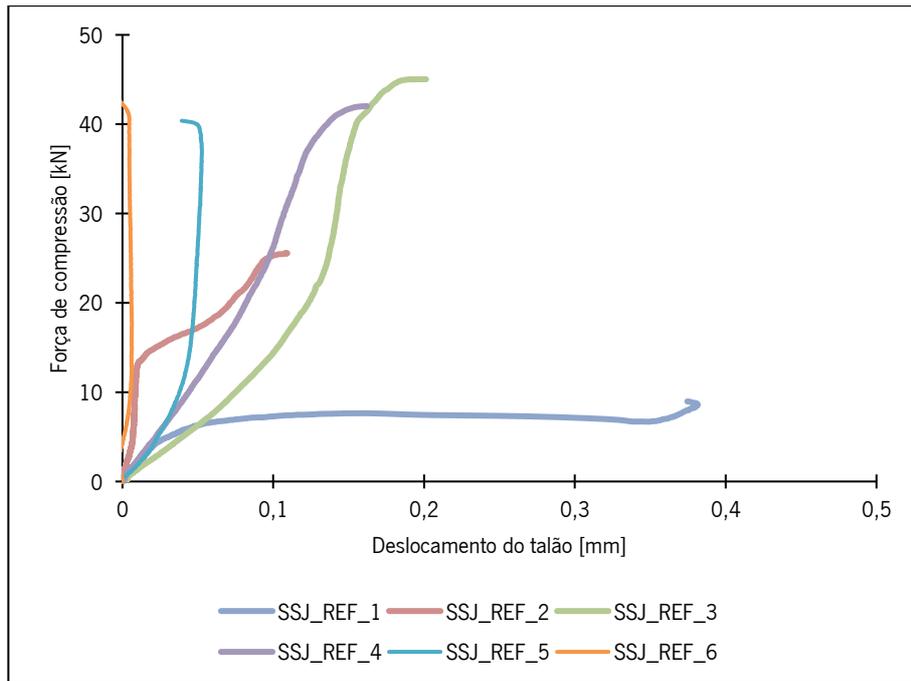


Figura I.22 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 6 provetes do grupo de referência (SSJ_REF).

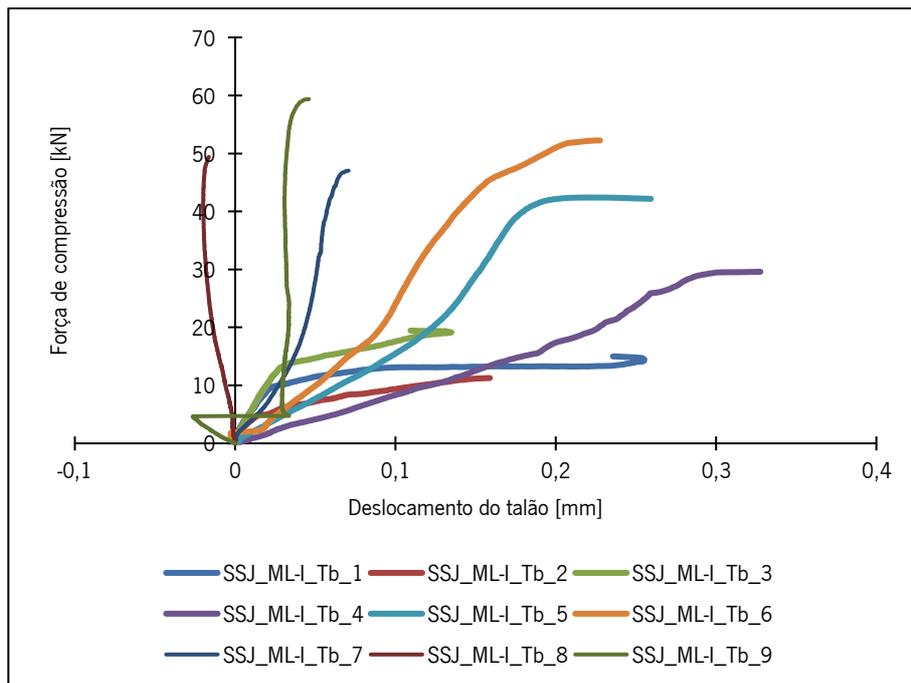


Figura I.23 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb.

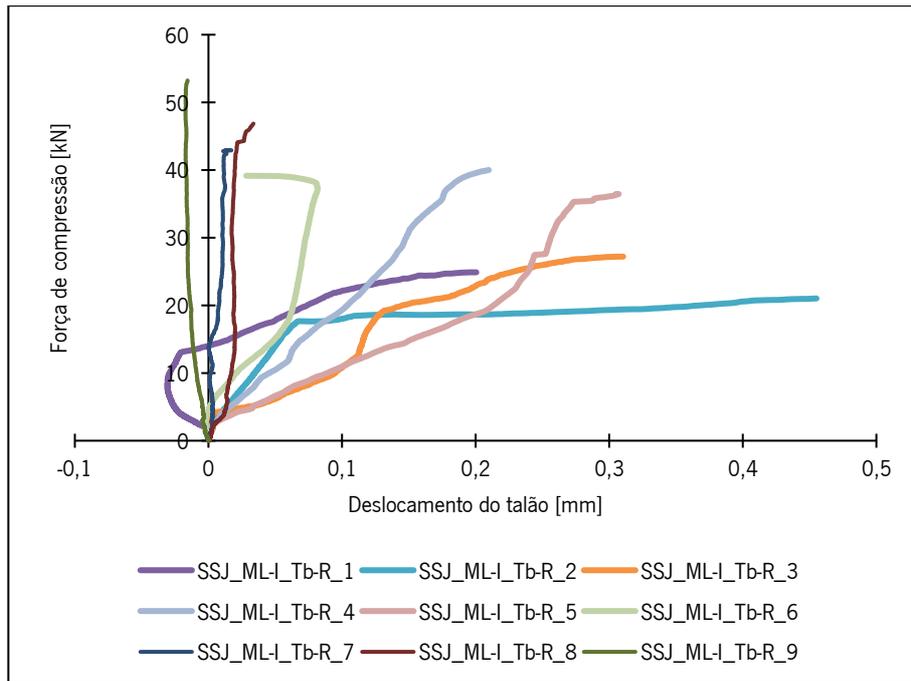


Figura I.24 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-I_Tb-R.

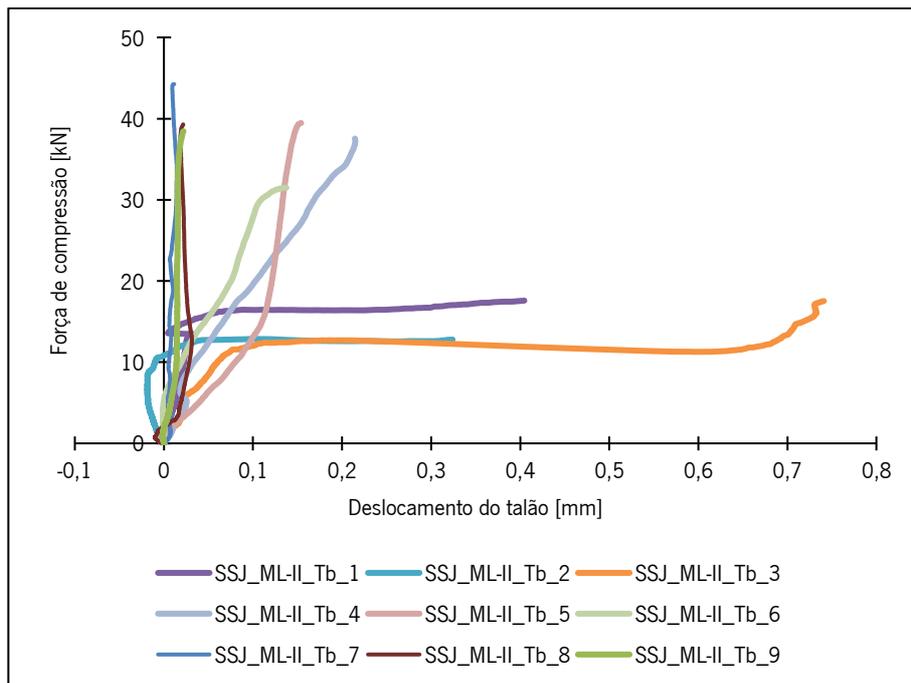


Figura I.25 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb.

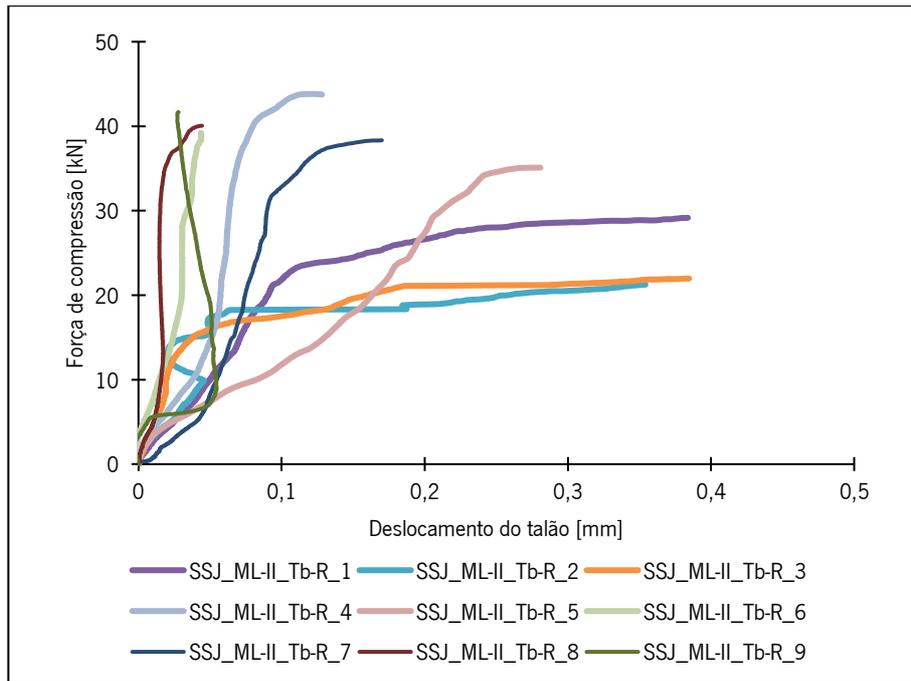


Figura I.26 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-II_Tb-R.

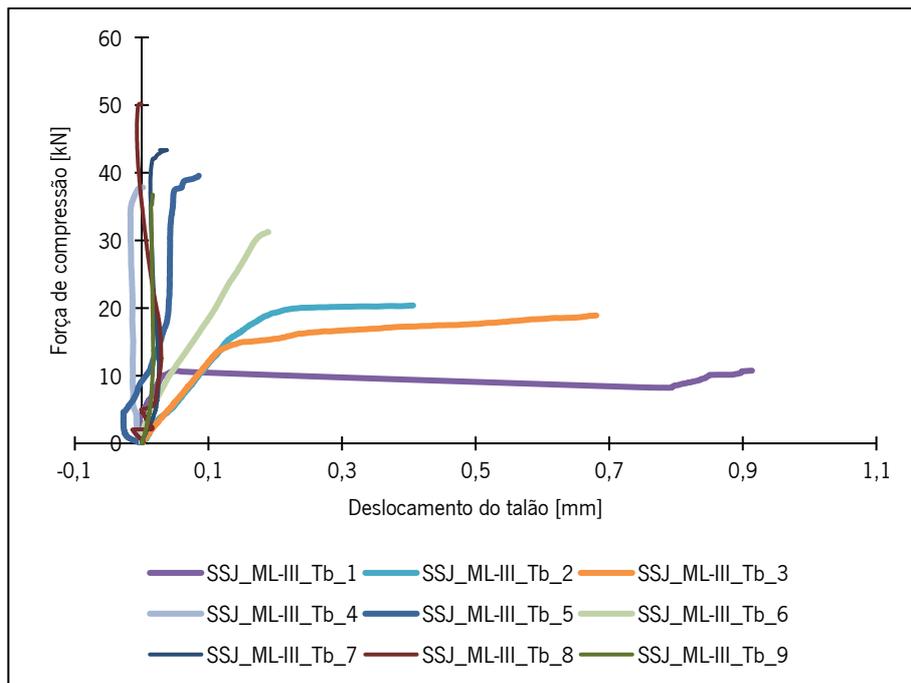


Figura I.27 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb.

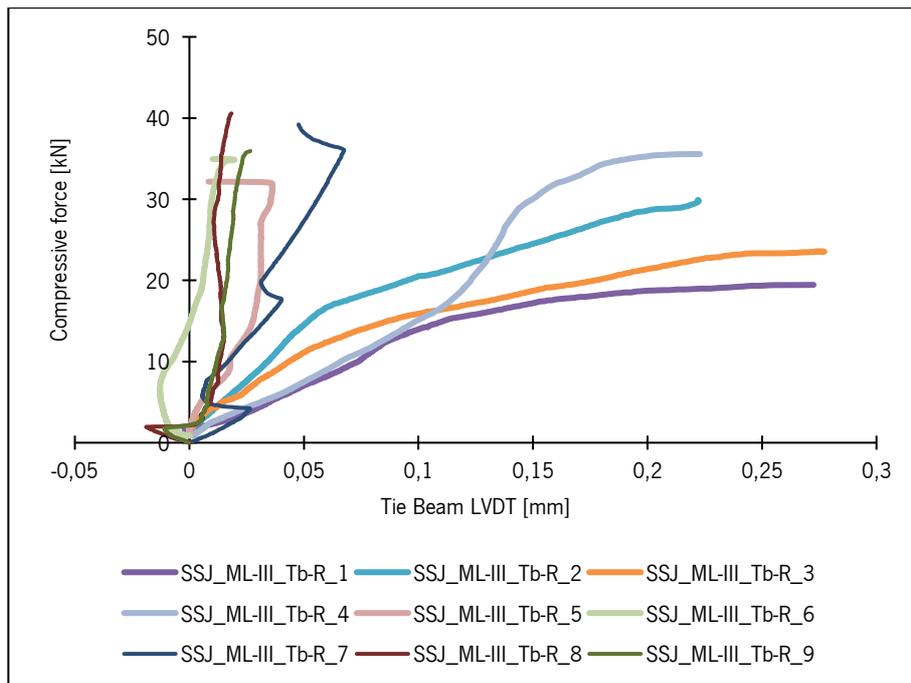


Figura I.28 - Gráficos de força de compressão na Perna por Deslocamento do talão dos 9 provetes do grupo SSJ_ML-III_Tb-R.

II. RESULTADOS DETALHADOS DA ANÁLISE MICRO-XCT

Quadro II.1 – Volume total, volume de madeira, volume de vazios e volume de madeira não estrutural obtidos na análise μ -XCT.

Amostra	Volume total (mm ³)	Volume de madeira (mm ³)	Volume de vazios (mm ³)	Volume de madeira não estrutural (mm ³)
ML-I_Tb_4	4202,7	4026,8	175,9	10,4
ML-I_Tb-R_1	4927,6	4756,6	171,0	3,1
ML-I_Tb-R_3	4148,9	3949,1	199,7	7,0
ML-I_Tb-R_5	4824,7	4581,1	243,6	19,9
ML-II_Tb_1	4390,7	4004,4	386,2	9,6
ML-II_Tb_6	4697,7	4217,8	480,0	27,7
ML-II_Tb-R_2	4479,3	4075,5	403,8	8,9
ML-II_Tb-R_5	4797,2	4435,8	361,3	22,5
ML-III_Tb_2	5005,9	4427,2	578,7	22,0
ML-III_Tb_3	4053,5	3604,2	449,3	16,4
ML-III_Tb_6	4688,7	4226,7	461,9	32,2
ML-III_Tb-R_4	4905,6	4415,3	490,3	27,1

III. RESULTADOS DETALHADOS DO ENSAIO AO CORTE EM PROVETES

PEQUENOS

Quadro III.1 – Massa volúmica ($\rho_{12\%}$), força máxima obtida no ensaio (Fmax) e resistência ao corte paralelo às fibras (τ) do ensaio de caracterização ao corte dos diferentes lotes (L1, L2 e L3).

Proвете	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	Fmax (kN)	τ (MPa)
L1.1	491	15,8	6,4
L1.2	448	11,5	4,6
L1.3	457	14,5	5,8
L1.4	450	13,7	5,5
L1.5	442	11,9	4,8
L1.6	471	13,5	5,4
L1.7	450	12,8	5,1
L1.8	449	12,3	4,9
L1.9	438	12,3	5,0
L1.10	437	10,9	4,3
L1.11	491	13,0	5,2
L1.12	446	15,0	6,0
L1.13	496	14,9	6,0
L1.14	452	12,3	4,9
L1.15	442	11,2	4,5
L1.16	522	16,3	6,5
L1.17	455	13,8	5,5
L1.18	455	12,7	5,2
L1.19	461	13,6	5,4
L1.20	477	12,0	4,8
L1.21	454	13,7	5,5
L1.22	454	12,8	5,2
L1.23	451	13,3	5,3
L1.24	429	11,7	4,7

L1.25	434	13,1	5,3
L1.26	483	13,5	5,4
L1.27	437	11,8	4,8
L1.28	478	14,0	5,6
L1.29	465	12,0	4,8
L1.30	466	12,2	4,9
L1.31	460	15,4	6,2
L1.32	480	13,7	5,5
L1.33	460	15,1	6,1
L1.34	474	14,5	5,8
L1.35	463	12,6	5,1
L1.36	418	12,6	5,1
L1.37	416	11,5	4,6
L1.38	551	19,0	7,6
L1.39	568	15,9	6,4
L1.40	578	18,9	7,6
L1.41	506	18,9	7,6
L1.42	563	15,2	6,1
L1.43	503	18,3	7,3
L1.44	588	17,8	7,1
L1.45	562	16,9	6,8
L1.46	523	18,8	7,5
L1.47	541	18,8	7,5
L1.48	527	14,0	5,6
L2.1	553	18,4	7,3
L2.2	553	18,7	7,6
L2.3	544	16,0	6,4
L2.4	529	15,7	6,3
L2.5	562	17,3	6,9
L2.6	566	16,9	6,8
L2.7	553	16,1	6,5

L2.8	538	16,1	6,4
L2.9	499	17,2	6,9
L2.10	449	16,4	6,6
L2.11	417	12,6	5,0
L2.12	529	19,0	7,6
L2.13	520	17,2	7,0
L2.14	423	15,3	6,2
L2.15	501	14,1	5,6
L2.16	498	16,2	6,4
L2.17	493	16,3	6,5
L2.18	493	17,8	7,1
L2.19	412	14,5	5,8
L2.20	489	14,9	6,0
L2.21	527	18,5	7,4
L2.22	423	13,0	5,2
L2.23	436	14,6	5,8
L2.24	496	17,3	6,9
L2.25	544	17,3	6,9
L2.26	561	14,4	5,8
L2.27	419	14,8	5,9
L2.28	494	17,6	7,0
L2.29	493	18,0	7,2
L2.30	531	15,7	6,3
L2.31	421	15,0	6,0
L2.32	442	15,7	6,3
L2.33	526	15,4	6,2
L2.34	454	16,1	6,4
L2.35	552	19,7	7,7
L2.36	521	17,2	6,9
L2.37	522	17,4	7,0
L2.38	417	13,5	5,4

L2.39	517	19,6	7,8
L2.40	494	13,7	5,5
L2.41	516	18,8	7,5
L2.42	405	15,2	6,1
L2.43	405	12,5	5,0
L2.44	416	12,4	4,9
L2.45	516	16,8	6,8
L2.46	529	13,4	5,4
L2.47	527	17,0	6,8
L2.48	533	17,2	6,8
L2.49	566	16,2	6,5
L2.50	563	15,2	6,0
L2.51	540	16,2	6,5
L2.52	528	18,1	7,3
L2.53	405	14,3	5,7
L2.54	442	15,1	6,0
L2.55	438	14,0	5,6
L2.56	532	14,8	5,9
L3.1	493	14,2	5,6
L3.2	492	14,8	6,0
L3.3	489	18,2	7,2
L3.4	517	17,5	7,0
L3.5	479	15,1	6,1
L3.6	496	15,0	6,0
L3.7	500	15,9	6,4
L3.8	490	15,8	6,4
L3.9	529	17,3	7,0
L3.10	491	16,0	6,3
L3.11	519	17,2	6,9
L3.12	486	15,5	6,1
L3.13	491	16,1	6,5

L3.14	488	14,0	5,6
L3.15	526	17,2	6,9
L3.16	507	17,2	6,7
L3.17	489	16,8	6,6
L3.18	528	18,8	7,5
L3.19	504	16,5	6,6
L3.20	491	16,7	6,6
L3.21	506	17,7	7,1
L3.22	501	16,5	6,5
L3.23	523	18,2	7,3
L3.24	493	15,8	6,3
L3.25	495	15,0	6,1
L3.26	483	17,6	7,1
L3.27	518	18,6	7,5
L3.28	493	15,7	6,3
L3.29	520	17,9	7,2
L3.30	496	15,6	6,3
L3.31	482	15,0	6,0
L3.32	470	15,4	6,1
L3.33	495	16,1	6,5
L3.34	533	17,7	7,0
L3.35	502	14,9	6,0
L3.36	495	14,9	6,0
L3.37	501	15,9	6,4

IV. RESULTADOS DETALHADOS DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO

PERPENDICULAR ÀS FIBRAS

Quadro IV.1 - Massas volúmicas (ρ_w , $\rho_{12,ori}$ e $\rho_{12,res}$), teores de água (w), perdas de massa (ML), forças máximas obtidas nos ensaios (F_{max}) e resistências ao arrancamento perpendicular às fibras (f) dos provetes ensaiados no equipamento fixo Lloyd LR50KPlus.

Proвете	ρ_w (kg/m ³)	w (%)	$\rho_{12,ori}$ (kg/m ³)	ML (%)	$\rho_{12,res}$ (kg/m ³)	F_{max} (N)	f (MPa)		
SW_LE_REF_1.1	546	12,2	546	0,0%	546	2537,8	2370,4	31,7	29,6
SW_LE_REF_1.2	546	12,2	546	0,0%	546	2440,6		30,5	
SW_LE_REF_1.3	546	12,2	546	0,0%	546	2132,8		26,7	
SW_LE_ML-I_1.1	567	12,0	567	3,0%	550	2339,4	2286,5	29,2	28,6
SW_LE_ML-I_1.2	567	12,0	567	3,0%	550	2285,3		28,6	
SW_LE_ML-I_1.3	567	12,0	567	3,0%	550	2234,7		27,9	
SW_LE_ML-III_1.1	523	11,8	523	7,0%	487	2083,9	1924,4	26,0	24,1
SW_LE_ML-III_1.2	523	11,8	523	7,0%	487	1898,8		23,7	
SW_LE_ML-III_1.3	523	11,8	523	7,0%	487	1790,5		22,4	
SW_LE_REF_2.1	569	12,2	568	0,0%	568	2511,1	2459,2	31,4	30,7
SW_LE_REF_2.2	569	12,2	568	0,0%	568	2533,6		31,7	
SW_LE_REF_2.3	569	12,2	568	0,0%	568	2332,9		29,2	
SW_LE_ML-I_2.1	551	12,2	550	2,8%	535	2289,5	2293,0	28,6	28,7
SW_LE_ML-I_2.2	551	12,2	550	2,8%	535	2229,2		27,9	
SW_LE_ML-I_2.3	551	12,2	550	2,8%	535	2360,2		29,5	
SW_LE_ML-III_2.1	568	11,8	568	6,4%	532	2195,9	2213,5	27,4	27,7
SW_LE_ML-III_2.2	568	11,8	568	6,4%	532	2207,2		27,6	
SW_LE_ML-III_2.3	568	11,8	568	6,4%	532	2237,6		28,0	
SW_LE_REF_3.1	566	11,7	566	0,0%	566	3492,8	3028,5	43,7	37,9
SW_LE_REF_3.2	566	11,7	566	0,0%	566	2801,2		35,0	
SW_LE_REF_3.3	566	11,7	566	0,0%	566	2791,4		34,9	
SW_LE_ML-I_3.1	605	12,0	605	3,0%	586	2967,0	2800,8	37,1	35,0
SW_LE_ML-I_3.2	605	12,0	605	3,0%	586	2675,1		33,4	

SW_LE_ML-I_3.3	605	12,0	605	3,0%	586	2760,5		34,5	
SW_LE_ML-III_3.1	560	11,5	561	6,8%	523	2266,4		28,3	
SW_LE_ML-III_3.2	560	11,5	561	6,8%	523	2209,9	2146,6	27,6	26,8
SW_LE_ML-III_3.3	560	11,5	561	6,8%	523	1963,4		24,5	
SW_LE_REF_4.1	515	11,9	516	0,0%	516	2704,3		33,8	
SW_LE_REF_4.2	515	11,9	516	0,0%	516	2743,2	2679,5	34,3	33,5
SW_LE_REF_4.3	515	11,9	516	0,0%	516	2590,9		32,4	
SW_LE_ML-I_4.1	533	12,0	533	3,1%	517	2468,1		30,9	
SW_LE_ML-I_4.2	533	12,0	533	3,1%	517	2748,7	2595,4	34,4	32,4
SW_LE_ML-I_4.3	533	12,0	533	3,1%	517	2569,4		32,1	
SW_LE_ML-III_4.1	521	12,1	521	7,2%	483	2080,9		26,0	
SW_LE_ML-III_4.2	521	12,1	521	7,2%	483	1999,2	2061,1	25,0	25,8
SW_LE_ML-III_4.3	521	12,1	521	7,2%	483	2103,2		26,3	

Quadro IV.2 - Massas volúmicas (ρ_w , $\rho_{12,ori}$ e $\rho_{12,res}$), teores de água (w), perdas de massa (ML), forças máximas obtidas nos ensaios (Fmax) e resistências ao arrancamento perpendicular às fibras (f) dos provetes ensaiados no equipamento móvel MATEST Digital pull-off tester E142-01.

Proвете	ρ_w (kg/m ³)	w (%)	$\rho_{12,ori}$ (kg/m ³)	ML (%)	$\rho_{12,res}$ (kg/m ³)	Fmax (N)	f (MPa)		
SW_ME_REF_1.1	566	11,6	567	0,0%	567	2900,9		36,3	
SW_ME_REF_1.2	566	11,6	567	0,0%	567	2905,9	2924,9	36,3	36,6
SW_ME_REF_1.3	566	11,6	567	0,0%	567	2927,9		36,6	
SW_ME_REF_1.4	566	11,6	567	0,0%	567	2964,9		37,1	
SW_ME_ML-I_1.1	551	12,0	551	3,3%	533	2905,9		36,3	
SW_ME_ML-I_1.2	551	12,0	551	3,3%	533	2627,9	2702,9	32,8	33,8
SW_ME_ML-I_1.3	551	12,0	551	3,3%	533	2784,9		34,8	
SW_ME_ML-I_1.4	551	12,0	551	3,3%	533	2492,9		31,2	
SW_ME_ML-III_1.1	561	12,0	560	7,0%	521	2291,9		28,6	
SW_ME_ML-III_1.2	561	12,0	560	7,0%	521	2577,9	2465,7	32,2	30,8
SW_ME_ML-III_1.3	561	12,0	560	7,0%	521	2433,9		30,4	
SW_ME_ML-III_1.4	561	12,0	560	7,0%	521	2558,9		32,0	
SW_ME_REF_2.1	550	11,9	550	0,0%	550	3085,9		38,6	
SW_ME_REF_2.2	550	11,9	550	0,0%	550	2988,9	2963,4	37,4	37,0

SW_ME_REF_2.3	550	11,9	550	0,0%	550	2961,9		37,0	
SW_ME_REF_2.4	550	11,9	550	0,0%	550	2816,9		35,2	
SW_ME_ML-I_2.1	553	11,9	554	2,8%	538	2799,9	2802,9	35,0	35,0
SW_ME_ML-I_2.2	553	11,9	554	2,8%	538	2905,9		36,3	
SW_ME_ML-I_2.3	553	11,9	554	2,8%	538	2764,9		34,6	
SW_ME_ML-I_2.4	553	11,9	554	2,8%	538	2740,9		34,3	
SW_ME_ML-III_2.1	562	11,7	563	6,5%	526	2683,9	2685,7	33,5	33,6
SW_ME_ML-III_2.2	562	11,7	563	6,5%	526	2912,9		36,4	
SW_ME_ML-III_2.3	562	11,7	563	6,5%	526	2706,9		33,8	
SW_ME_ML-III_2.4	562	11,7	563	6,5%	526	2438,9		30,5	
SW_ME_REF_3.1	605	11,8	605	0,0%	605	3288,9	3419,9	41,1	42,7
SW_ME_REF_3.2	605	11,8	605	0,0%	605	3050,9		38,1	
SW_ME_REF_3.3	605	11,8	605	0,0%	605	3859,9		48,2	
SW_ME_REF_3.4	605	11,8	605	0,0%	605	3479,9		43,5	
SW_ME_ML-I_3.1	572	12,1	572	3,1%	554	3145,9	3277,7	39,3	41,0
SW_ME_ML-I_3.2	572	12,1	572	3,1%	554	3370,9		42,1	
SW_ME_ML-I_3.3	572	12,1	572	3,1%	554	3307,9		41,3	
SW_ME_ML-I_3.4	572	12,1	572	3,1%	554	3285,9		41,1	
SW_ME_ML-III_3.1	563	11,5	564	6,2%	529	2969,9	3117,4	37,1	39,0
SW_ME_ML-III_3.2	563	11,5	564	6,2%	529	3117,9		39,0	
SW_ME_ML-III_3.3	563	11,5	564	6,2%	529	3245,9		40,6	
SW_ME_ML-III_3.4	563	11,5	564	6,2%	529	3135,9		39,2	
SW_ME_REF_4.1	530	11,5	531	0,0%	531	3235,9	3195,9	40,4	39,9
SW_ME_REF_4.2	530	11,5	531	0,0%	531	3302,9		41,3	
SW_ME_REF_4.3	530	11,5	531	0,0%	531	3154,9		39,4	
SW_ME_REF_4.4	530	11,5	531	0,0%	531	3089,9		38,6	
SW_ME_ML-I_4.1	525	11,5	526	3,2%	509	2721,9	2904,2	34,0	36,3
SW_ME_ML-I_4.2	525	11,5	526	3,2%	509	3019,9		37,7	
SW_ME_ML-I_4.3	525	11,5	526	3,2%	509	2858,9		35,7	
SW_ME_ML-I_4.4	525	11,5	526	3,2%	509	3015,9		37,7	
SW_ME_ML-III_4.1	508	11,5	509	6,8%	475	2761,9	2757,7	34,5	34,5

SW_ME_ML-III_4.2	508	11,5	509	6,8%	475	3071,9	38,4
SW_ME_ML-III_4.3	508	11,5	509	6,8%	475	2708,9	33,9
SW_ME_ML-III_4.4	508	11,5	509	6,8%	475	2487,9	31,1