



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Comportamento de ligações tradicionais de madeira:  
Influência da exposição ambiental

Catarina Fernandes Cerqueira Soares

Comportamento de ligações tradicionais de  
madeira: Influência da exposição ambiental





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Catarina Fernandes Cerqueira Soares

Comportamento de ligações tradicionais de  
madeira: Influência da exposição ambiental

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

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professora Doutora Graça Vasconcelos  
Doutora Elisa Poletti

## DECLARAÇÃO

Nome: Catarina Fernandes Cerqueira Soares

Endereço eletrónico: catarinafcerqueira@gmail.com Telefone: 918445184/936449091

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14088225

Título da dissertação: Comportamento de ligações tradicionais de madeira: Influência da exposição ambiental

Orientadores:

Professora Doutora Graça Vasconcelos

Doutora Elisa Poletti

Ano de conclusão: 2017

Mestrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Assinatura: *Catarina Fernandes Soares*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer devidamente tanto a quem me acompanhou durante a execução do trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação de Mestrado assim como a quem contribuiu para a sua realização.

Começo por agradecer à minha orientadora Dra Graça Vasconcelos assim como à minha co-orientadora Dra Elisa Poletti por toda a disponibilidade e apoio durante as diferentes fases de execução do trabalho desenvolvido. À Professora Graça Vasconcelos gostaria de agradecer os conhecimentos partilhados, o contributo na definição das metodologias propostas assim como o acompanhamento ao longo do projeto. À Dr. Elisa Poletti manifesto a minha gratidão por me disponibilizar todos os meios necessários para que este trabalho se realizasse da melhor forma possível, assim como a incansável ajuda na realização do mesmo e na resolução das diversas dificuldades que apareceram. Um muito obrigada pela disponibilidade, assim como pela forma amigável como acompanhou e ajudou durante todo o tempo de desenvolvimento da tese.

Queria também agradecer de forma especial aos meus amigos mais próximos pelo apoio incondicional, ajudando-me a passar os momentos mais difíceis e pelo incentivo. Um obrigada especial ao Rui por todas as palavras de estímulo e por estar sempre presente e pronto a ajudar. Não posso terminar sem agradecer, de forma especial e sentida, aos meus pais e ao meu irmão por todo o apoio e ajuda ao longo desta fase e pela força transmitida, que me fez chegar ao fim.



## RESUMO

Neste projeto estudou-se a madeira *Pinus pinaster* envelhecida. Foi analisado o efeito do envelhecimento na madeira como material e como ligações. Vários tipos de envelhecimento foram efetuados assim como diferentes tempos de envelhecimento (diferentes ciclos). No caso das ligações para além do estudo dos diferentes tipos de envelhecimento também foi estudado o efeito do envelhecimento em ligações reforçadas com fibra de vidro e ligações não reforçadas. Para cada tipo de envelhecimento efetuado foi construído um *set-up* de forma a simular, em laboratório, as condições agressivas a ser estudadas, nomeadamente chuva e inundações.

O estudo da madeira, como material, foi feito usando provetes pequenos, envelhecidos e não envelhecidos (de referência), que foram ensaiados à compressão paralela e perpendicular às fibras, de forma a comparar a força máxima dos provetes envelhecidos com os de referência. Por outro lado, as ligações, de referência e envelhecidas, foram ensaiadas segundo ensaios *pull-out* cíclicos.

Os resultados obtidos revelaram uma ligeira deterioração das propriedades da madeira, dos provetes pequenos, ao fim de 3 ciclos de envelhecimento independentemente do tipo de envelhecimento a que foram sujeitos, e uma ligeira recuperação das propriedades para envelhecimentos com ciclos superiores. No caso das ligações, também se verificou uma diminuição das propriedades das ligações envelhecidas quando comparadas com as de referência. Os resultados evidenciaram que a força máxima era muito superior nas ligações reforçadas quando comparada com as ligações não reforçadas, mesmo após os envelhecimentos.

Apesar da esperada deterioração da madeira com o envelhecimento, o tipo de madeira estudado *Pinus pinaster* revelou propriedades adequadas para ser usada em estruturas sujeitas aos ambientes estudados.

Palavras-Chave: envelhecimento acelerado, ligações meia-madeira, *Pinus pinaster*





## ABSTRACT

In this project we studied the *Pinus pinaster* aged wood. The effect of aging on wood as a material and as a connection was analysed. Various types of accelerated aging were performed for different times/cycles. In the case of the study of the connections in addition to the study of aging, we also studied the difference between fiber reinforced and non-reinforced connections. For each type of aging, a set-up was constructed in order to simulate, in laboratories, the aggressive conditions to be studied, rain and flood.

The study of the wood as a material was done through test pieces that were tested to compression, parallel and perpendicular to the ray of the wood in order to compare the maximum strength of the age test samples with those of reference. On the other hand, the connections were tested according to cyclic pull-out tests.

The results analysed show that the wood properties of pieces deteriorate after 3 cycles of aging, regardless of the type of aging and a recovery for aging with higher cycles. The case of the connections, there was also a decrease in the properties of the aged ones compared to the reference ones and a much higher maximum strength for the reinforced connections the non-reinforced ones.

As a general conclusion the *Pinus pinaster* revealed adequate properties to be used in structures subject to the studied environments.

**KEYWORDS:** accelerated aging, *Pinus pinaster*, connections



## ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xxi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xxiii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação do trabalho.....	1
1.2. Objetivos e metodologia.....	1
1.3. Organização da dissertação.....	3
2. Estado de arte.....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. A madeira na construção tradicional.....	5
2.3. Descrição da Madeira como material de construção.....	8
2.3.1. Estrutura da madeira.....	8
2.3.2. Propriedades físicas e mecânicas da madeira.....	12
2.4. Durabilidade da madeira.....	16
2.4.1. Métodos de inspeção.....	18
2.4.2. Ensaios de previsão da durabilidade.....	20
2.5. Fatores de degradação.....	23
2.5.1. Variações climáticas.....	23
2.5.2. Ataque de agentes biológicos.....	27
2.6. Ligações.....	28
2.6.1. Ligações tradicionais.....	30
2.2.1. Ligações reforçadas.....	33
3. Ensaios de envelhecimento acelerado.....	35
3.1. Introdução.....	35
3.2. Métodos de envelhecimento acelerado.....	36
3.2.1. Ensaio normalizado (CHL).....	36

3.2.2.	Ensaio alternativo – variação de temperaturas (CHL-TR).....	37
3.2.3.	Envelhecimento com base em ciclos de molhagem por aspersão e secagem (CHU)	
	37	
3.3.	Provetes para ensaio .....	38
3.3.1.	Provetes pequenos (#1) .....	38
3.3.2.	Ligações (#2).....	41
3.4.	Esquemas dos ensaios de envelhecimento.....	44
3.4.1.	Ciclos de imersão e secagem (CHL) .....	44
3.4.2.	Envelhecimento através de ciclos de imersão/secagem com temperaturas alteradas (CHL-TR) .....	46
3.4.3.	Envelhecimento com base em ciclos de molhagem por aspersão e secagem (CHU) .....	47
3.5.	Inspeção visual após o envelhecimento.....	52
3.5.1.	Inspeção após ciclos de imersão-secagem .....	52
3.5.2.	Provetes do tipo CHU .....	55
3.6.	Avaliação do teor de humidade .....	59
3.7.	Evolução do peso e da velocidade de ultrassons .....	61
3.8.	Comentários finais.....	65
4.	Caracterização mecânica da madeira - provetes pequenos.....	67
4.1.	Introdução.....	67
4.2.	Ensaio de compressão na direção paralela às fibras .....	67
4.2.1.	Diagramas força-deslocamento .....	69
4.2.2.	Padrões de dano.....	71
4.2.3.	Análise das propriedades mecânicas dos provetes envelhecidos por ciclos de imersão e secagem – CHL, CHL-I e CHL-TR .....	73
4.2.4.	Análise das propriedades mecânicas dos provetes envelhecidos por ciclos de aspersão e de secagem – CHU .....	79
4.3.	Ensaio de compressão na direção perpendicular às fibras .....	81
4.3.1.	Diagramas força-deslocamento .....	83
4.3.2.	Padrões de dano.....	85

4.3.3.	Análise das propriedades mecânicas dos provetes envelhecidos por ciclos de imersão e secagem – CHL, CHL-I e CHL-TR .....	86
4.3.4.	Análise das propriedades mecânicas dos provetes envelhecidos por ciclos de aspersão e de secagem – CHU .....	91
4.4.	Comentários finais .....	93
5.	Caracterização Mecânica das ligações .....	95
5.1.	Introdução .....	95
5.2.	Esquema de ensaio e Procedimentos .....	95
5.3.	Análise de resultados .....	98
5.3.1.	Ligações não reforçadas .....	100
5.3.2.	Ligações reforçadas .....	108
5.4.	Comparação das ligações reforçadas e não reforçadas.....	114
5.5.	Comentários finais .....	117
6.	Comentários finais .....	119
6.1.	Proposta de trabalhos futuros .....	120
	Bibliografia.....	123
	Anexo I –Ficha de inspeção .....	126



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura dos edifícios Pombalinos: (a) perspetiva em corte da construção Pombalina (Macarenhas, 2005); (b) perspetiva de um piso formado por gaiolas Pombalinas (Poletti, 2013).....	6
Figura 2.2 - Diferentes tipologias de construções em madeira na Europa (Poletti, 2013).....	6
Figura 2.3 - Fotografias do interior de edifícios Pombalinos (gaiola Pombalina): (a) Interior de um edifício Pombalino em Lisboa onde é visível a “gaiola” em madeira (Poletti, 2013); (b) Detalhe de uma parede interior de edifícios Pombalinos; (c) Gaiola Pombalina após a remoção da alvenaria. (Lopes 2010 p 2); (d) Esquema da estrutura de madeira das paredes interiores de edifícios Pombalinos (Poletti, 2013) .....	7
Figura 2.4 - Eixos fundamentais da madeira (Forest Products Laboratory, 1999). .....	8
Figura 2.5 - Constituição do tronco de uma árvore: (a) Seção transversal de um tronco de White oak (Forest Products Laboratory, 1999); (b) Esquema/Legenda dos componentes de um tronco. ....	10
Figura 2.6 – Corte transversal de um tronco onde são visíveis os anéis de crescimento (Forest Products Laboratory, 1999).....	10
Figura 2.7 - Diagrama força/deformação em ensaio de flexão (Carvalho, 1996).....	15
Figura 2.8 – Função de desempenho versus tempo descrevendo a durabilidade de um produto em determinadas condições ambientais (Sattler e Pereira, 2006). .....	16
Figura 2.9 -Variação do teor de humidade da madeira e a sua influência (Dietsch et al., 2014). ....	24
Figura 2.10 - Efeito do teor de humidade nas propriedades da madeira (Dietsch et al., 2014). ....	25
Figura 2.11 -Variação dimensional dependendo do eixo da madeira (Dietsch et al., 2014)....	26
Figura 2.12 – Gráfico demonstrativo do risco da ocorrência de ataques fúngicos na madeira de acordo com o tempo que esta está à chuva (Savvioni et al., 2010).....	28
Figura 2.13 - Fotografia de ligações de uma estrutura de madeira e das suas ligações. ....	28
Figura 2.14 - Ligações tipicamente usadas nas gaiolas dos edifícios pombalinos (Mascarenhas, 2005) (Isopescu, 2016).....	30
Figura 2.15 -Ligações “halved and lapped”. (a) Vários tipos de ligações “halved and lapped” (Isopescu, 2016); (b) Exemplo de uma construção pombalina com a combinação de meia madeira e dovetail (Mascarenhas, 2005).....	31

Figura 2.16 – Ligação notched: (a) Esquema de uma ligação notched (Zwerger, 1997); (b) Exemplo de uma construção pombalina com ligações notched (Mascarenhas, 2005) .....	31
Figura 2.17 - Ligação "tenon" (Isopescu, 2016) .....	32
Figura 2.18 – Ligação dovetail: (a) Esquema da ligação (Isopescu, 2016); (b) Exemplo de uma construção pombalina com ligações dovetail (Mascarenhas, 2005) .....	32
Figura 2.19 – Ligação oblíqua: (a) Esquema de várias ligações oblíquas (Isopescu, 2016); (b) Exemplo de uma construção pombalina com ligações oblíquas (Mascarenhas, 2005) .....	32
Figura 3.1 - Provetes utilizados neste trabalho. O provete da direita é da série 90 e o da esquerda é da série 0.....	38
Figura 3.2 - Nomenclatura utilizada para identificação dos provetes.....	39
Figura 3.3 - Localização da tinta impermeável nos provetes.....	40
Figura 3.4 - Dimensões dos provetes pequenos e direção das fibras representadas pela seta – dimensões em mm.....	40
Figura 3.5 – Fotografias ilustrando os defeitos encontrados em alguns provetes durante a inspeção inicial: (a) fotografia do provete 90_CHL_10 com 3 nós; (b) fotografia do provete 90_CHU_01 com uma fenda.....	41
Figura 3.6 - Ligação meia-madeira: a) Geometria da ligação meia-madeira e do prego. (Poletti, 2013); b) Esquema da ligação meia-madeira (dimensões em cm).....	41
Figura 3.7 – (a) Esquema ilustrativo dos pontos onde foi medido o teor de humidade com o higrómetro; (b) Higrómetro e tabelas de conversão dos valores obtidos consoante a espécie da madeira.....	43
Figura 3.8 - Figura ilustrando os sítios onde foi efetuado o reforço assim como a orientação das fibras do tecido de reforço utilizado. (a) Vista frontal (lado em que se vê o parafuso); (b) Vista posterior (lado em que não se vê o parafuso).....	43
Figura 3.9 - Esquema representativo do esquema de ensaio na fase de imersão no envelhecimento acelerado .....	45
Figura 3.10 - Resumo dos propósitos dos 3 tanques utilizados para o envelhecimento CHU. 47	
Figura 3.11 - Fotografia dos três tanques utilizados para o envelhecimento CHU.....	47
Figura 3.12 - Esquema do tanque relativo ao envelhecimento CHU dos provetes pequenos. A1 – vista superior da localização das ventoinhas e dos aquecedores; A2 – vista lateral da estrutura 4; A3 – Vista superior da estrutura 4.....	48
Figura 3.13 - Esquema do tanque relativo ao envelhecimento CHU das ligações. B1 e C1 – vista superior da localização da ventoinha e do aquecedor; B2 e C2 – vista lateral da localização dos aspersores; B3 e C3 – Vista superior da localização dos aspersores. ....	49



Figura 3.14 - Zonas onde foi colocada a tinta impermeável. ....	49
Figura 3.15 -Placa de plástico a representar o preenchimento de uma timber-frame: (a) Esquema da localização das placas de plástico; (b) Fotografia de uma ligação com as placas de plásticos. ....	50
Figura 3.16 - Esquema representativo da localização dos cinco sensores de temperatura nos set-up CHU. ....	50
Figura 3.17 – Controlo de propriedades ao longo do envelhecimento por aspersão e secagem: (a) Variação da temperatura ambiente medida através dos sensores de temperatura; (b) variação do peso das ligações. ....	51
Figura 3.18 – Fotografias dos diferentes tipos de degradação detetadas após o primeiro ciclo de envelhecimento acelerado CHL. (a) Saída de resina; (b) e (c) fissuras; (d) deformação. ....	52
Figura 3.19 - Fotografias do envelhecimento acelerado CHL durante 3 ciclos. ....	53
Figura 3.20 - Fotografias do envelhecimento acelerado CHL durante 12 ciclos. ....	53
Figura 3.21 - Deformação do provete 07 durante o seu envelhecimento acelerado CHL .....	54
Figura 3.22 - Fotografias de dois exemplos de envelhecimento CHL com saída de resina. ....	54
Figura 3.23 - Fotografias demonstrativas da mudança de cor que ocorre durante o envelhecimento CHL dos provetes. ....	54
Figura 3.24 - Envelhecimento dos provetes 90 submetidos ao envelhecimento CHL-I. ....	55
Figura 3.25 - Defeitos encontrados nos provetes pequenos que sofreram envelhecimento CHU: (a) e (b) fissuras, (c) e (d) ataque de fungos. ....	55
Figura 3.26 - Fotografias do envelhecimento do provete 90_CHU_02 submetido ao envelhecimento CHU. ....	56
Figura 3.27 - Fotografias do envelhecimento do provete 0_CHU_01 submetido ao tipo de envelhecimento CHU. ....	56
Figura 3.28 - Fotografias do envelhecimento do provete 90_CHU_02 submetido ao envelhecimento CHU. ....	56
Figura 3.29 - Comparação da ligação 1 antes e após o envelhecimento CHU. ....	57
Figura 3.30- Comparação da ligação 1 (parte de trás) antes e após o envelhecimento CHU ..	58
Figura 3.31 - Comparação da ligação 2 antes e após o envelhecimento CHU. ....	58
Figura 3.32 - Comparação da ligação 3 antes e após o envelhecimento CHU .....	58
Figura 3.33 - Esquema dos pontos onde foi medido o teor de humidade externo das ligações após o seu envelhecimento. ....	59

Figura 3.34 - Variação do teor de humidade (externa) em função dos dias de secagem: (a) Ligação reforçada; (b) Ligação não reforçada. As letras correspondem aos pontos de medida da Figura 3.33. ....	60
Figura 3.35 – Localização dos furos feitos para a medição do teor de humidade interno. ....	61
Figura 3.36 – Variação do teor de humidade interno em função do tempo de secagem para uma ligação. ....	61
Figura 3.37 - E evolução da massa durante o processo de secagem: a) das ligações – R: reforçadas e NR: não reforçadas; b) dos provetes pequenos.....	62
Figura 3.38 - Esquema dos pontos onde foi retirada a velocidade de ondas ultra-sonoras.....	63
Figura 3.39 - Variação da velocidade do ultrassom na ligação 6 com o tempo de secagem. ..	63
Figura 3.40 - Variação da velocidade das ondas ultrassom com o processo de secagem nos provetes pequenos. ....	64
Figura 4.1 – Ensaio de compressão uniaxial paralela às fibras (0): (a) esquema do set-up; (b) fotografia do set-up. ....	68
Figura 4.2 –. Gráficos forç�a-deslocamento de controlo obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras da madeira em provetes de referência – REF – e envelhecidos por ciclos de imersão e secagem – CHL, CHL-I e CHL-TR – e por ciclos de aspersão e secagem – CHU. ....	70
Figura 4.3 –. Gráfico exemplificativo da relação forç�a-deslocamento obtido nos LVDTs laterais dos ensaios de compressão paralelos às fibras da madeira de um provete exemplo.....	71
Figura 4.4 –. Fotografias dos padrões de dano obtidos nos provetes pequenos de referência. ....	71
Figura 4.5 –. Fotografias dos padrões de dano em provetes, envelhecidos por ciclos de molhagem e secagem durante 3 ciclos,após os ensaios de compressão uniaxial.....	72
Figura 4.6 –. Fotografias dos padrões de dano em provetes, envelhecidos por ciclos de molhagem e secagem durante 6 e 12 ciclos, após os ensaios de compressão uniaxial. ....	72
Figura 4.7 –. Fotografias dos padrões de dano em provetes envelhecidos por ciclos de aspersão de água e secagem – CHU.....	73
Figura 4.8 –. Resistência máxima de compressão de cada provete com o tempo de envelhecimento: (a) envelhecimento por imersão e secagem – CHL; (b) envelhecimento por imersão e secagem com temperaturas alteradas CHL-TR. ....	74
Figura 4.9 –. Variação dos valores médios da resistência � compressão, a 0� das fibras, em função do tempo de envelhecimento assim como o tipo de envelhecimento: (a) para provetes com topos impermeáveis (CHL-I) e topos não impermeáveis (CHL) envelhecidos; (b) para provetes envelhecidos com temperaturas de 55�C e 105�C (CHL-I) e temperaturas de 30�C e 80�C (CHL-TR).....	76

Figura 4.10 –. Variação dos valores médios do módulo de elasticidade, a 0° das fibras, em função do tempo de envelhecimento assim como o tipo de envelhecimento (a) comparar envelhecimento com topos impermeáveis – CHL-I – e topos não impermeáveis – CHL; (b) comparar envelhecimento com temperaturas de 55°C e 105°C – CHL-I – e temperaturas de 30°C e 80°C – CHL-TR. ....	78
Figura 4.11 - Variação da resistência à compressão entre os provetes de referência e os provetes envelhecidos por ciclos de aspersão e secagem – CHU: (a) Gráfico força-deslocamento com os resultados de todos os provetes ensaiados; (b) Gráfico da média da força máxima obtida nos ensaios. ....	80
Figura 4.12 - Gráfico da média do módulo de elasticidade dos provetes de referência e os provetes envelhecidos por ciclos de aspersão e secagem – CHU. ....	81
Figura 4.13 - Proвете 90 exemplo. ....	81
Figura 4.14 - Esquema da localização da placa onde a carga é aplicada no ensaio de compressão perpendicular às fibras. ....	82
Figura 4.15 - Set-up dos ensaios de compressão perpendicular às fibras. ....	82
Figura 4.16 – Diagrama força-deslocamento (compressão) (EN 408, 2003).....	83
Figura 4.17 –. Gráfico força-deslocamento de controlo dos ensaios de compressão perpendiculares às fibras da madeira em provetes de referência – REF, envelhecidos por ciclos de imersão e secagem – CHL, CHL-I e CHL-TR, e, por ciclos de aspersão e secagem – CHU. ....	84
Figura 4.18 –. Fotografias dos padrões de danos em provetes pequenos de referência. ....	85
Figura 4.19 –. Fotografias dos padrões de danos em provetes pequenos envelhecidos por ciclos de imersão e secagem. ....	85
Figura 4.20 –. Gráfico de resistência máxima de compressão de cada provete com o tempo de envelhecimento: (a) envelhecimento por imersão e secagem – C HL; (b) envelhecimento por imersão e secagem em provetes com os topos impermeáveis CHL-I. ....	86
Figura 4.21 –. Variação dos valores médios da resistência à compressão, a 90° das fibras, em função do tempo de envelhecimento assim como o tipo de envelhecimento (a) comparar envelhecimento com topos impermeáveis – CHL-I – e topos não impermeáveis – CHL; (b) comparar envelhecimento com temperaturas de 55°C e 105°C – CHL-I – e temperaturas de 30°C e 80°C – CHL-TR. ....	88
Figura 4.22 –. Variação dos valores médios do módulo de elasticidade, a 90° das fibras, em função do tempo de envelhecimento assim como o tipo de envelhecimento (a) comparar envelhecimento com topos impermeáveis – CHL-I – e topos não impermeáveis – CHL; (b)	

comparar envelhecimento com temperaturas de 55°C e 105°C – CHL-I – e temperaturas de 30°C e 80°C – CHL-TR. ....	90
Figura 4.23 - Gráfico da força-tempo de envelhecimento para os provetes envelhecidos por CHU: (a) força máxima obtida nos ensaios de todos os provetes de referência e envelhecidos por CHU; (b) média da força máxima obtida.....	92
Figura 4.24 - Variação do módulo de elasticidade antes e após o envelhecimento por ciclos de aspersão e secagem – CHU. ....	93
Figura 5.1 - Set-up dos ensaios pull-out realizados nas ligações. (a) vista frontal;( b) vista lateral .....	96
Figura 5.2 - Reforço das ligações antes dos ensaios pull-out: (a) parte da frente da ligação; (b) parte de trás da ligação. ....	97
Figura 5.3 - Pormenor do set-up com os LVDT's: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral. ....	97
Figura 5.4 - Procedimentos utilizados nos ensaios pull-out cíclicos: (a) ligações não reforçadas; (b) Ligações reforçadas. ....	98
Figura 5.5 - Gráficos exemplificativos de força-deslocamento dos ensaios pull-out das ligações: (a) não reforçadas; (b) reforçadas.....	99
Figura 5.6 -Movimento da ligação durante o ensaio pull-out: (a) movimento ascendente da ligação; (b) deslocamento para fora do plano. ....	100
Figura 5.7 - Deformação plástica do prego: (a) numa ligação de referência; (b) numa ligação envelhecida.....	100
Figura 5.8 – Evolução do deslocamento para fora do plano ao longo do ensaio de pull-out. ....	101
Figura 5.9 – Gráfico força-deslocamento das ligações não reforçadas. ....	102
Figura 5.10 - Fotografia do interior da viga de uma ligação envelhecida.....	102
Figura 5.11 - Evolução da força ao longo do ensaio de uma ligação não reforçada com a representação da envolvente da força máxima dos primeiros ciclos. ....	103
Figura 5.12 -Representação da rigidez de uma ligação não reforçada ao longo do ensaio pull-out num gráfico força-deslocamento.....	103
Figura 5.13 - Variação da rigidez durante os ciclos do ensaio pull-out de ligações não reforçadas: (a) ligação de referência; (b) ligação envelhecida. ....	104
Figura 5.14 - Variação da rigidez com os ciclos do ensaio pull-out de uma ligação não reforçada. ....	104
Figura 5.15 - Gráfico comparativo da energia dissipada ao longo do ensaio pull-out por ciclos: (a) Ligação de referência; (b) Ligação envelhecida. ....	105

Figura 5.16 – Gráficos comparativos da variação da força ao longo dos ensaios de todas as ligações não reforçadas: (a) Gráfico força-deslocamento; (b) Envolvente da força máxima atingida em cada ciclo. ....	106
Figura 5.17 – Energia dissipada ao longo dos ensaios pull out em ligações não reforçadas.	107
Figura 5.18 – Fotografia da parte interior de uma ligação envelhecida. ....	107
Figura 5.19 -Fotografias de um ensaio pull-out numa ligação reforçada e o comportamento do reforço ao longo do ensaio: (a) cedência da cola epoxy e descolamento do reforço na parte de trás da ligação; (b) deformação/rutura da fibra de vidro na parte frontal da ligação .....	108
Figura 5.20 – Variação do deslocamento do prumo para fora do plano ao longo do ensaio pull-out de ligações reforçadas: (a) ligação de referência; (b) ligação envelhecida. ....	109
Figura 5.21 – Gráficos força-deslocamento de ensaios pull-out em ligações reforçadas: (a) ligação de referência; (b) ligação envelhecida. ....	110
Figura 5.22 – Variação da rigidez cíclica das ligações reforçadas ao longo dos ensaios pull-out: (a) Gráfico rigidez-deslocamento para todas as ligações; (b) tabela exemplo dos valores experimentais. ....	111
Figura 5.23 - Energia dissipada ao longo do ensaio pull-out por ciclos: (a) Ligação de referência; (b) Ligação envelhecida .....	112
Figura 5.24 – Gráficos comparativos da variação da força ao longo dos ensaios de todas as ligações reforçadas: (a) Gráfico força-deslocamento; (b) Envolvente da força máxima atingida em cada ciclo. ....	113
Figura 5.25 – Energia dissipada, por ciclo, de todas as ligações reforçadas que foram ensaiadas. ....	114
Figura 5.26 – Evolução da força ao longo de ensaios pull-out em ligações reforçadas e não reforçadas: (a) Gráfico força-deslocamento; (b) Envolvente da força máxima da cada ciclo. ....	115
Figura 5.27 – Gráfico comparativo da evolução da rigidez cíclica em ligações reforçadas e não reforçadas. ....	116
Figura 5.28 – Gráfico comparativo da evolução da dissipação de energia em ligações reforçadas e não reforçadas. ....	116
Figura 5.29 – Evolução do deslocamento do prumo para fora do plano em função do deslocamento vertical: (a) ligação não reforçada; (b) ligação reforçada. ....	116



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Percentagens dos componentes químicos da madeira (Forest Products Laboratory, 1999).....	11
Tabela 2.2 - Critério de escolha de técnicas não destrutivas a usar de acordo com o objetivo da inspeção (Riggio et al., 2015).....	20
Tabela 2.3 - Resumo das etapas de um ciclo de vários métodos de envelhecimento acelerados (Kojima e Suzuki, 2010; ASTM D143-14, 2014).....	22
Tabela 3.1 – Etapas de um ciclo do teste de envelhecimento de acordo com a Norma ASTM D1037 (ASTM D1037, 2014).....	36
Tabela 3.2 - Descrição das etapas de um ciclo de envelhecimento alternativo proposto por McNatt e Link (1989).....	37
Tabela 3.3 - Etapas de um ciclo do processo alternativo de envelhecimento acelerado com temperaturas que se encontram na natureza – CHL-TR. ....	37
Tabela 3.4 - Descrição das etapas, por cada dia de ensaio, para o envelhecimento acelerado representativo da chuva (CHU) usado no âmbito deste trabalho. ....	37
Tabela 3.5 - Nomenclatura adotada para os provetes pequenos (série 0 e série 90) e descrição das condições a que vão ser submetidos. ....	39
Tabela 3.6 – Descrição do nº de ligações e das condições de ensaio.....	42
Tabela 3.7 - Resumo do número de ciclos e de provetes usados no envelhecimento CHL.....	45
Tabela 3.8 - Resumo do número de ciclos e de provetes usados no envelhecimento CHL-I ..	46
Tabela 3.9 - Resumo do número de ciclos e de provetes usados no envelhecimento CHL-TR. ....	46
Tabela 3.10 - Tabela de comparação da velocidade medida com o equipamento de ultrassom entre os provetes pequenos de referência (REF) e os provetes pequenos envelhecidos à chuva (CHU).....	64
Tabela 4.1 - Média dos valores obtidos relativamente à força máxima, à tensão máxima e ao módulo de elasticidade dos provetes ensaiados à compressão paralela às fibras (0).....	75
Tabela 4.2 – Média dos valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras dos provetes de referência e dos provetes envelhecidos por ciclos de aspersão e de secagem – CHU.....	80
Tabela 4.3 - Média dos valores obtidos relativamente à força máxima, à tensão máxima e ao módulo de elasticidade dos provetes ensaiados à compressão perpendicular às fibras (90)....	87

Tabela 4.4 - Tabela resumo da média dos valores de força, tensão e módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras dos provetes envelhecidos (CHU).....	92
Tabela 5.1 – Força máxima e rigidez inicial das ligações não reforçadas (de referência e envelhecidas).....	105
Tabela 5.2 - Resultados obtidos nos ensaios pull-out das ligações reforçadas de referência e envelhecidas. ....	112



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

- CHL Envelhecimento por ciclos de imersão (55°C) e secagem (105°C) com os provetes com os topos permeáveis;
- CHL-I Envelhecimento por ciclos de imersão (55°C) e secagem (105°C) com os provetes com os topos impermeáveis;
- CHL- TR Envelhecimento por ciclos de imersão (30°C) e secagem (80°C) com os provetes com os topos impermeáveis;
- CHU Envelhecimento por ciclos de aspersão e secagem.



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação do trabalho

A madeira é um material de construção muito usado nos edifícios tradicionais em Portugal, assim como no resto da Europa, principalmente em coberturas e pavimentos. A madeira é também muito utilizada em Portugal em parede divisórias na forma de paredes de tabique ou paredes frontal. As paredes de tabique concitem em paredes elementos de madeira (verticais ou diagonais) aos quais estão pregadas ripas de madeira horizontais e sobre as quais se aplica um revestimento de argamassa. As paredes de madeira do tipo frontal são constituídas por um pórtico de madeira com primos verticais e vigas horizontais formando células retangulares. Nas células adicionam-se ainda elementos diagonais com orientação variada ou frequentemente em forma de cruz de Santo André (Edifícios pombalinos). Frequentemente estas paredes são preenchidas com alvenaria de tijolo ou pedra irregular de baixa resistência. As paredes de madeira encontram-se de forma generalizada na construção vernácula típica dos centros históricos (por exemplo Guimarães) ou em construções isoladas.

Nas paredes de madeira, principalmente nas paredes de madeira do tipo frontal, as ligações representam a parte mais frágil da estrutura pois controla o comportamento estático e dinâmico da estrutura (Poletti, 2013).

Nas últimas décadas o clima na Europa tem sofrido variações extremas na sequência das alterações climáticas, nomeadamente fenómenos meteorológicos extremos como por exemplo altas temperaturas, períodos de seca, períodos longos de baixas temperaturas e períodos de cheias, chuvas prolongadas e de ventos fortes. Estes eventos podem ter efeitos catastróficos sobre as estruturas antigas, que não foram pensadas para estas variações climáticas. Estas condições podem promover o aparecimento de fendilhação, degradação do material e aparecimento de fungos e consequente degradação adicional (Savvioni *et al.* 2010).

## 1.2. Objetivos e metodologia

O foco principal deste trabalho é o estudo do efeito de condições ambientais extremas e possível deterioração: (1) no comportamento mecânico da madeira *Pinus pinaster*, e (2) no

comportamento à tração de ligações de madeira *Pinus pinaster* tradicionais visto serem a parte mais frágil das paredes de madeira.

Para este efeito, foi definida uma campanha de ensaios laboratoriais em provetes de madeira e ligações sujeitos a diferentes condições de envelhecimento na tentativa de reproduzir diferentes condições ambientais. Pretende-se avaliar o comportamento mecânico da madeira sob ações de compressão na direção paralela e perpendicular ao fio da madeira e de ligações sujeitas a esforços cíclicos de tração antes e após o envelhecimento.

O programa experimental teve como base o estudo de provetes de madeira e ligações meia-madeira, antes e após sofrerem envelhecimento acelerado de diferentes tipos: (1) envelhecimento acelerado representativo de inundação com água limpa (CHL), (2) envelhecimento acelerado representativo de inundação com água limpa em provetes com topos impermeáveis (CHL-I), (3) envelhecimento representativo de inundação com água limpa e com temperaturas encontradas no dia-a-dia em provetes com os topos impermeáveis (CHL-TR), (4) envelhecimento acelerado representativo de períodos sucessivos de molhagem e secagem (CHU). Os três primeiros tipos de envelhecimento (CHL, CHL-I e CHL-TR) foram efetuados em vários ciclos: 3, 6 e 12 ciclos e o quarto tipo de envelhecimento (CHU) teve uma duração de 2 meses. Enquanto que os provetes de madeira foram envelhecidos segundo os quatro métodos descritos anteriormente, as ligações apenas foram envelhecidas segundo o último método (CHU).

O tipo de madeira em estudo foi o *Pinus pinaster* porque se trata da madeira mais utilizada nas construções vernáculas, nomeadamente, nos edifícios Pombalinos. O tipo de ligação escolhida é representativo da ligação entre uma vida e um prumo de uma parede de frontal, que é característica dos edifícios Pombalinos. O estudo das ligações focou-se no efeito de envelhecimento em ligações reforçadas e não reforçadas. Assim, metade das ligações foram reforçadas com fibra de vidro.

Os *esquemas de ensaio* para os diversos procedimentos de envelhecimento acelerado foram definidos e planeados com base na informação existente na literatura, ainda que com ligeiras adaptações. Para a implementação dos ensaios envelhecimentos foi necessário montar infraestruturas que permitiam a realização dos mesmos.

Nos provetes pequenos envelhecidos e não envelhecidos (de referência) pretende-se estudar o comportamento mecânico com base em ensaios de compressão a partir dos quais é possível obter a resistência à compressão e módulo de elasticidade na direção perpendicular e paralela

às fibras da madeira. No caso das ligações pretende-se avaliar o comportamento através de ensaios cíclicos de tração a partir dos quais se pretendem obter informação da influência do reforço e do envelhecimento da resistência, modos de rotura, variação da rigidez e dissipação de energia.

### **1.3. Organização da dissertação**

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos.

Para além da introdução, onde se apresenta o enquadramento e os objetivos e metodologia, é feita capítulo 2 uma revisão do estado de arte sobre: (1) a madeira como material (propriedades), (2) as técnicas construtivas em Portugal, usando estruturas de madeira (tipos de ligações usadas) e (3) os fatores de envelhecimento da madeira com uma revisão dos procedimentos de ensaio existentes na literatura.

No capítulo 3 descreve-se a campanha experimental relativo aos ensaios de envelhecimento, nomeadamente: i) o tipo de amostras em estudo (provetes pequenos e ligações); ii) o procedimento adotado para os diferentes tipos de envelhecimento e a sua duração (número de ciclos). Neste capítulo são também apresentados os *set-ups* utilizados para a realização dos processos de envelhecimento acelerado.

O capítulo 4 diz respeito à caracterização dos provetes de madeira envelhecidos e dos provetes de referência relativamente à compressão paralela e perpendicular às fibras da madeira. Apresentam-se os procedimentos dos ensaios e dos principais resultados e faz-se uma análise comparativa para avaliação do efeito do envelhecimento da madeira nas propriedades mecânica da madeira sob ações de compressão.

No capítulo 5 apresenta-se a campanha experimental efetuada em ligações tradicionais, sujeitas a ensaios cíclicos de tração, nomeadamente: i) ligações tradicionais não reforças sujeitas a envelhecimento e não sujeitas a envelhecimento; ii) ligações tradicionais reforças sujeitas a envelhecimento e não sujeitas a envelhecimento. São apresentados os detalhes dos ensaios, são apresentados e discutidos os resultados em termos de diagramas força-deslocamento, modos de rotura, parâmetros mecânicos (resistência, rigidez, variação de rigidez e dissipação de energia). Procede-se ainda à análise comparativa das propriedades das ligações de madeira, reforçadas e não reforçadas, de referência e envelhecidas avalia-se o efeito do reforço e do envelhecimento.

Por fim, no Capítulo 6 apresenta-se um resumo das principais conclusões obtidas ao longo do trabalho e uma proposta de trabalhos futuros.

## 2. ESTADO DE ARTE

### 2.1. Introdução

Neste capítulo, faz-se uma revisão bibliográfica relacionada com o conhecimento existente na área da madeira, fundamentalmente no comportamento das ligações tradicionais e da forma como as suas propriedades são influenciadas pela exposição ambiental.

Neste sentido, numa primeira fase, depois de uma breve introdução às estruturas de madeira existentes em Portugal, descreve-se as características da madeira, especificando as principais propriedades de modo a, futuramente, reconhecer quais as mais prejudicadas pela exposição ambiental. Seguidamente apresenta-se um sumário sobre diferentes ligações tradicionais de madeira características de paredes de estruturas de edifícios tradicionais e sobre o seu comportamento mecânico. Por último apresenta-se uma revisão do conhecimento relativo às condições ambientais que mais prejudicam a durabilidade da madeira.

### 2.2. A madeira na construção tradicional

Na construção tradicional em Portugal os pavimentos e as coberturas foram maioritariamente construídos em madeira. A utilização de madeira em paredes tornou-se comum após a catástrofe do terramoto de 1755 em Lisboa. A reconstrução de Lisboa foi de grande qualidade e sujeita a grandes restrições, quer a nível de planeamento urbano, quer a nível construtivo. Os novos edifícios construídos na zona destruída, chamados de edifícios Pombalinos, consistiam em paredes externas de alvenaria envolvendo uma estrutura interna tridimensional de madeira denominada gaiola (ver Figura 2.1). A utilização de madeira em sistemas construtivos em madeira envolvendo paredes de madeira com ou sem enchimento em construções de médio porte é também muito comum em diversos países do mundo, não só devido à sua boa resistência aos sismos, mas também devido à grande variabilidade de geometrias. A Figura 2.2 mostra um mapa com as diferentes tipologias de construções de madeira encontradas na Europa. De acordo com Harris (2006), os edifícios em madeira (*timber-frame*) são edifícios em que os elementos estruturais, colunas e vigas, são construídos em madeira. Os espaços entre a estrutura de madeira são preenchidos com tijolo, gesso, ou outros componentes.

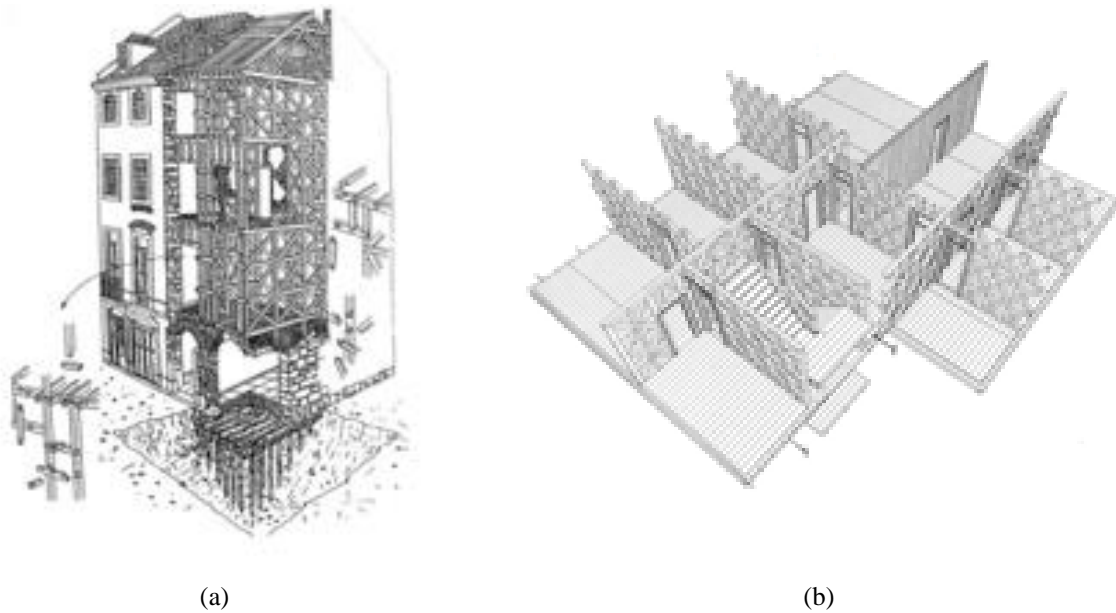


Figura 2.1 - Estrutura dos edifícios Pombalinos: (a) perspetiva em corte da construção Pombalina (Macarenhas, 2005); (b) perspetiva de um piso formado por gaiolas Pombalinas (Poletti, 2013).



Figura 2.2 - Diferentes tipologias de construções em madeira na Europa (Poletti, 2013).

No caso específico dos edifícios Pombalinos, a gaiola possui elementos verticais (prumos), elementos horizontais (travessanhos) e elementos diagonais que formam cruces, denominadas cruces de Santo André (Figura 2.2) (Mascarenhas, 2005). O preenchimento é normalmente feito com alvenaria de pedra ou alvenaria de tijolo (Figura 2.3 (a) e Figura 2.3 (b) do exemplo em Lisboa). As ligações entre os elementos de madeira da gaiola eram maioritariamente



tradicionais através de contactos, ou encaixes, e frequentemente complementadas por elementos metálicos como pregos e parafusos (pregos ou laços de metal).



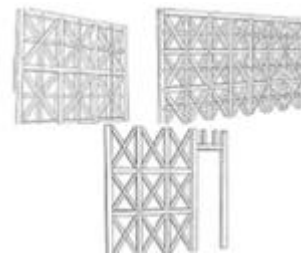
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.3 - Fotografias do interior de edifícios Pombalinos (gaiola Pombalina): (a) Interior de um edifício Pombalino em Lisboa onde é visível a “gaiola” em madeira (Poletti, 2013); (b) Detalhe de uma parede interior de edifícios Pombalinos; (c) Gaiola Pombalina após a remoção da alvenaria. (Lopes 2010 p 2); (d) Esquema da estrutura de madeira das paredes interiores de edifícios Pombalinos (Poletti, 2013)

Nos edifícios “Pombalinos”, a gaiola desempenha o papel principal em termos de resistência a ações horizontais devido à sua boa resistência tanto em tração como em compressão (Poletti, 2013). A principal função da gaiola é dissipar a energia em resposta às ações horizontais contribuindo de forma decisiva para o melhoramento do comportamento dos edifícios a ações sísmicas (Lourenço e Branco, 2013). Por outro lado, a alvenaria e seus componentes desempenham um papel fundamental no confinamento da moldura, resultando num melhorando das propriedades mecânicas de corte (Vasconcelos *et al.*, 2013). Resumindo, as estruturas mistas madeira-alvenaria combinam as melhores características da madeira e da alvenaria de forma a melhorar o comportamento do edifício às ações sísmicas.

## 2.3. Descrição da madeira como material de construção

### 2.3.1. Estrutura da madeira

A madeira, material que constitui o tronco das árvores, é um composto orgânico de origem natural. Este carácter natural da madeira confere-lhe uma grande variabilidade às propriedades físicas e mecânicas. O grau de variabilidade estende-se, dentro de uma dada espécie de árvore e mesmo numa única árvore. Desta forma, pode-se afirmar que não é possível encontrar numa árvore dois pontos distintos com características de madeira iguais. Isto deve-se ao facto da madeira ter uma estrutura não homogénea com propriedades diferentes em diferentes pontos. As características da peça de madeira são influenciadas pela zona da árvore de onde o material é retirado. Outros fatores que ilustram que a madeira é um material heterogéneo é a espécie, a idade e as condições de crescimento, por isso é importante saber a origem da madeira a ser usada.

Dada a grande variedade das espécies de madeira, este material apresenta grande diversidade de características diferenciadoras que devem ser consideradas em função da utilização a ser dada à madeira.

#### i. Estrutura Anatómica

Dado que a madeira é um material anisotrópico, isto é, as propriedades variam com a direção, é necessário considerar três eixos/planos fundamentais (Figura 2.4) segundo os quais a madeira exhibe diferentes propriedades (Carvalho, 1996):

- Eixo tangencial (T) ou plano tangencial;
- Eixo radial (R) ou plano transversal;
- Eixo axial/longitudinal (A/L) ou plano radial.

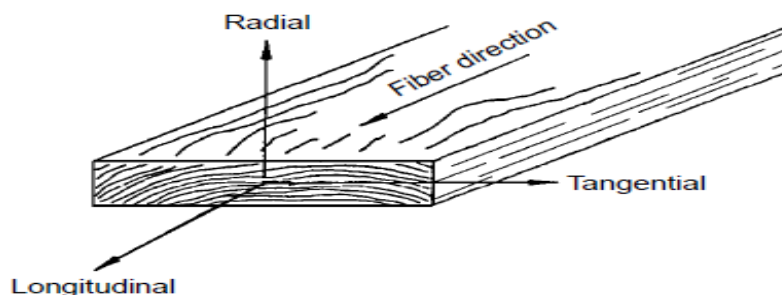


Figura 2.4 - Eixos fundamentais da madeira (Forest Products Laboratory, 1999).

## ii. Constituição do tronco das árvores

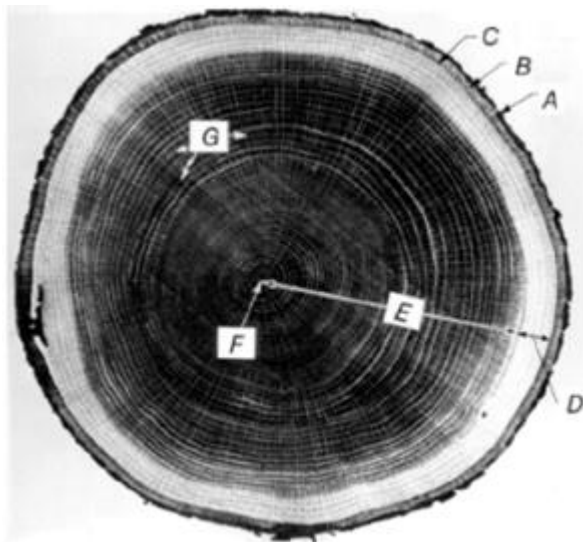
A composição de uma árvore consiste na raiz, no caule/tronco e na copa. O tronco é a parte útil para produzir as peças de madeira usadas na construção. Este é constituído, do exterior para o interior, pela casca, pelo câmbio e pelo lenho, como ilustrado na Figura 2.5. De seguida descreve-se estes constituintes do tronco pois estas camadas afetam e/ou contribuem para a capacidade resistente da madeira como um todo.

A casca, como se trata da camada mais externa da árvore, tem a função de proteger o lenho e de transportar a seiva das folhas para o lenho. Esta não tem importância estrutural pois é eliminada para o aproveitamento do lenho.

O câmbio trata-se de uma camada fina de células situada entre a casca e o lenho que permite o crescimento transversal da árvore, ou seja, o desenvolvimento do lenho, pois tem a função de manter o tecido de células em permanente transformação, isto é, é responsável pela formação de novas células (Henriques, 2005).

No campo da engenharia civil, lenho representa a parte mais importante da árvore pois é fulcral na definição das propriedades da madeira conferindo-lhe resistência e sustentabilidade. O lenho também é constituído por camadas, sendo designadas, da camada mais exterior para a mais interior, de borne, cerne e medula.

- o borne (*sapwood*), camada mais exterior formada por células vivas, tem a função da capacidade resistente;
- o cerne, formado por células mortas é a camada que mais influencia a durabilidade da madeira pois, como esta camada está isenta de seiva, apresenta maior densidade, resistência e estabilidade perante a humidade e os agentes de degradação. O cerne também influencia a permeabilidade da madeira, pois nesta camada a secagem é mais lenta e, conseqüentemente, o cerne é mais resistente aos agentes de degradação pois aumenta a estabilidade na mudança das condições de humidade;
- a medula situada no centro do tronco, é formada por um tecido mole e não contribui nem para a resistência mecânica, nem para a durabilidade da madeira (Botelho, 2006).



Casca	Externa (ritidoma)	(A)
	Interna (carrasco)	(B)
Cambio		(C)
Lenho	Borne	(D)
	Cerne	(E)
	Medula	(F)
	Anéis de crescimento	(G)

(a)

(b)

Figura 2.5 - Constituição do tronco de uma árvore: (a) Seção transversal de um tronco de *White oak* (Forest Products Laboratory, 1999); (b) Esquema/Legenda dos componentes de um tronco.

### iii. Anéis de crescimento

O crescimento transversal das árvores é o resultado da adição de novas camadas concêntricas em torno do lenho, provenientes das transformações que ocorrem no câmbio. Estas novas camadas de crescimento são visíveis no alburno (conjunto das camadas borne e cerne), pela presença dos denominados anéis de crescimento (Figura 2.6). Em cada anel, associado a cada ano que passa, destacam-se duas camadas: uma de cor mais clara que é formada durante a primavera, denominada por anel de primavera; e outra de cor mais escura formada no outono, designado por anel de outono. Os anéis registam a idade da árvore e refletem as condições de desenvolvimento.



Figura 2.6 – Corte transversal de um tronco onde são visíveis os anéis de crescimento (Forest Products Laboratory, 1999).

#### iv. Composição química

A composição química da madeira não pode ser definida com exatidão uma vez que, devido à sua heterogeneidade, esta varia de árvore para árvore e mesmo entre pontos distintos da mesma árvore.

Segundo o Bennett e Jeronimidis (2013), os componentes químicos da madeira podem ser classificados como componentes estruturais ou componentes não estruturais, como apresentado na Tabela 2.1. Os componentes do primeiro grupo constituem a estrutura da parede celular e são responsáveis pelas propriedades físicas e químicas da madeira. Estes componentes estruturais são: a celulose, as hemiceluloses e a lenhina. Cada um destes constituintes é responsável por uma determinada função: (1) a celulose é o principal responsável pela higroscopicidade da madeira e trata-se de um polímero de grande resistência mecânica; (2) a hemicelulose tem como função unir as fibras de celulose e (3) a lenhina confere resistência ao corte e à compressão. Os componentes não estruturais ou extrativos são substâncias de massa molecular pequena como extrativos e cinzas. Este grupo de componentes depende de cada espécie variando tanto a quantidade como os compostos que inclui (Pereira *et al.*, 2003). Estes compostos contribuem para propriedades de madeira tais como cor, odor, resistência à decomposição, densidade e higroscopicidade (Forest Products Laboratory, 1999).

Tabela 2.1 - Percentagens dos componentes químicos da madeira (Forest Products Laboratory, 1999).

<b>Componentes estruturais</b>	Celulose	40-50%
	Hemicelulose	20-30%
	Lenhina	20-30%
<b>Componentes não estruturais</b>		0-10%

#### v. Classificação das árvores

As diferentes espécies de árvores, fornecedoras de madeira para construção, podem ser divididas em dois grandes grupos: árvores resinosas/*softwoods* (da classe gimnospérmicas) e árvores folhosas/*hardwoods* (da classe angiospermas). Estes grupos não diferem apenas na aparência exterior da madeira, mas também na estrutura anatómica do tecido e nas propriedades mecânicas da madeira. Por exemplo, a madeira retirada das árvores folhosas é porosa enquanto, a retirada das árvores resinosas não o é (Forest Products Laboratory, 1999).

### 2.3.2. Propriedades físicas e mecânicas da madeira

A compreensão do comportamento da madeira constitui uma exigência para a adequada utilização (crescente) deste material como elemento estrutural na construção civil. Para melhor compreender e prever o comportamento da madeira é fundamental o estudo das suas propriedades, físicas e mecânicas. As propriedades físicas e mecânicas dependem do tipo de madeira e são usadas para diferenciar os diversos tipos de madeira. São estas propriedades que verificam a adequação da madeira para o fim em vista (Martins e Araújo, 2005).

#### i. Propriedades físicas

Propriedades físicas simples como a cor, o brilho, o odor, a densidade, a dureza, a higroscopicidade, o ponto de saturação e teor de humidade de equilíbrio podem determinar a utilização da madeira. A cor da madeira de uma árvore pode variar entre rosa, amarela, branca e vermelha. Tanto a luz como o ar (por oxidação) podem alterar a cor ou tonalidade da madeira (Mascarenhas, 2005). A dureza está relacionada com a resistência ao desgaste e à cravagem e varia com a idade e com a orientação dos eixos da madeira relativamente ao sentido de trabalho da madeira em uso (Mascarenhas, 2005). A densidade é uma propriedade física muito importante da madeira que expressa a quantidade de substância lenhosa por unidade de volume (quociente da massa pelo volume – kg/m<sup>3</sup>). Assim, comparando peças iguais, quanto menor for o valor da densidade de uma peça de madeira, maior será o volume de vazios. Segundo Mascarenhas (2005), a madeira pode ser classificada como muito densa (acima de 0,8 kg/m<sup>3</sup>) como por exemplo o azinho que não flutua, mediamente densa, como por exemplo o pinheiro e o carvalho, ou pouco densa como a casquinha.

Segundo a norma ISO 3131 (1975) podem-se definir diferentes valores de densidade de acordo com o teor de humidade da madeira: (1) densidade associada um teor de humidade de  $w$ ,  $\rho_w$ ; (2) densidade da peça completamente seca,  $\rho_o$ ; (3) densidade da peça para um teor de humidade de equilíbrio correspondente a 12%,  $\rho_{12}$ . O cálculo da densidade de uma peça com um teor de humidade  $w$ ,  $\rho_w$  (kg/m<sup>3</sup>), pode ser efetuado através equação 2.1:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (2.1)$$

onde,

$m_w$ , é a massa da peça com um teor de humidade de  $w$  (kg),

$V_w$ , é o volume da peça com um teor de humidade de  $w$  (m<sup>3</sup>).

A densidade para um teor de humidade de 12%,  $\rho_{12}$ , é a densidade de referência e pode ser obtida a partir da densidade  $\rho_w$  usando a relação descrita equação 2.2.

$$\rho_{12} = \rho_w \left[ 1 - \frac{(1-K)(w-12)}{100} \right] \quad (2.2)$$

em que,

$K$  é o coeficiente da variação de volume quando o teor de humidade varia 1% ( $K = 0,85 \times 10^{-3} \times \rho_w$ ).

Conclui-se então que a densidade de uma peça de madeira depende do seu teor de humidade. Como a madeira é um material higroscópico, tanto a densidade como a higroscopicidade tornam-se propriedades muito importantes e devem ser estudadas.

A madeira é caracterizada pela sua natureza higroscópica pois tem a tendência de atingir uma situação de equilíbrio de humidade com o ambiente em que está inserida retendo humidade nos seus poros. Assim, o teor de humidade da madeira depende fortemente das condições ambientais relacionadas com a humidade relativa e a temperatura (Dietsch *et al.*, 2014).

De forma a compreender melhor o conceito de higroscopicidade é necessário definir os diferentes tipos de água existentes na madeira, o teor de humidade assim como outras propriedades da madeira como o ponto de saturação e o teor de humidade de equilíbrio.

- Água presente na madeira

Para além da água de constituição da madeira que está incluída quimicamente nas paredes celulares (*bound water*) e que não pode ser removida sem modificar a composição química da madeira, a água existente na madeira pode estar como água livre, contida nas *cell lumens* e nas cavidades em forma líquida ou de vapor de água (Zlahtic e Humar, 2017).

- Teor de humidade

O teor de humidade é definido como o quociente, expresso em percentagem, da massa de água contida na madeira (água que se evapora do material por secagem) pela massa da madeira depois de completamente seca.

Para determinar o teor de humidade em percentagem,  $w$ , a norma ISO 3130 (1975) fornece a fórmula 2.3:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (2.3)$$

onde,

$m_1$ , é a massa, em g, da peça antes de ser seca,

$m_2$ , é a massa, em g, da peça depois de seca.

- Ponto de Saturação

O ponto de saturação corresponde ao teor de humidade no qual não existe água livre. Ou seja, no ponto de saturação apenas existe *bound water* (as paredes celulares estão completamente saturadas). Para qualquer teor de humidade abaixo do ponto de saturação, as propriedades físicas e mecânicas da madeira começam a ser alteradas (Dietsch, Franke, Franke, Gamper, & Winter). Convém, no entanto, referir que o termo ponto de saturação não é muito preciso porque é possível que, na mesma peça de madeira, existam partes totalmente secas e partes ainda saturadas.

- Teor de humidade de Equilíbrio (EMC - *equilibrium moisture content*)

O teor de humidade de equilíbrio é definido como o valor no qual a madeira não está a ganhar nem a perder humidade, ou seja, uma condição de equilíbrio foi alcançada. Assim, a madeira deve ser aplicada com este teor de humidade de forma a reduzir as consequências da alteração do seu teor de humidade.

## ii. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas definem o comportamento do material quando sujeito a cargas externas. É importante definir que a capacidade resistente da madeira é superior segundo o eixo das fibras (L) do que no eixo perpendicular às fibras (R e T).

As propriedades mecânicas podem dividir-se em propriedades elásticas e propriedades de resistência. De forma a definir a capacidade da madeira de resistir a cargas externas/esforços é importante ter em conta os dois tipos de propriedades.



## (1) Propriedades elásticas:

- **Módulo de elasticidade:** um material diz-se que está na zona elástica se para tensões baixas, as deformações produzidas são totalmente recuperáveis após as cargas serem removidas. O ponto de tensão em que este fenómeno deixa de acontecer e a peça passa a sofrer deformações plásticas ou mesmo falhas é definido como limite de elasticidade (ponto  $C_e$  da Figura 2.7). Até ser atingido este ponto, o módulo de elasticidade (MPa) mede a relação de proporcionalidade entre a tensão e a deformação de um material. Diz-se que o módulo de elasticidade mede a rigidez do material pois, para uma mesma carga aplicada, quanto maior o módulo de elasticidade, menor a deformação elástica, logo mais rígido o material. Como já foi referido, devido à anisotropia da madeira, esta é caracterizada por três módulos de elasticidade (EL, ER e ET – eixo longitudinal, radial e tangencial, respetivamente) sendo o mais utilizado o EL.
- **Coefficiente de Poisson:** quando um material é submetido a um esforço para além de sofrer uma deformação axial também sofre uma deformação transversal. O coeficiente de Poisson traduz a proporcionalidade entre as duas deformações, até ao ponto limite de elasticidade (ponto  $C_e$  da Figura 2.7).

## (2) Propriedades de resistência:

Os pontos mais importantes de um diagrama tensão-deformação são: i) o ponto da tensão limite de elasticidade e ii) o ponto da tensão de rutura (Figura 2.7). A tensão limite de elasticidade é o ponto que separa a deformação elástica da plástica, ou seja, é o ponto onde o corpo deixa de retomar as suas dimensões iniciais após a força ser removida. A tensão de rutura corresponde à maior tensão que o material pode suportar antes de romper.

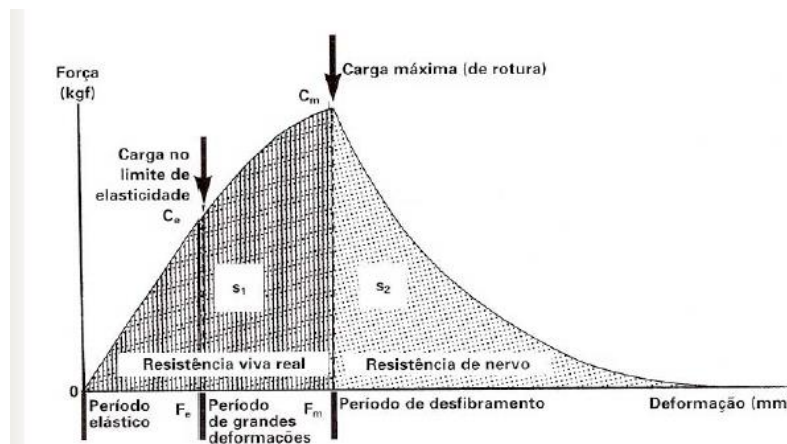


Figura 2.7 - Diagrama força/deformação em ensaio de flexão (Carvalho, 1996)

Convém referir que para uma caracterização completa do material é importante ter em consideração as tensões da madeira relativas aos seguintes tipos de resistência:

- Resistência à flexão (dinâmica e estática);
- Resistência à compressão (paralela e perpendicular à fibra da madeira/ axial e normal);
- Resistência à tração (paralela e perpendicular à fibra da madeira/ axial e normal);
- Resistência ao corte.

## 2.4. Durabilidade da madeira

A durabilidade é um dos principais fatores de desempenho utilizados para avaliar a madeira como material de construção. A durabilidade baseia-se na capacidade da estrutura, ou de uma ligação, em manter o desempenho satisfatório das suas funções em serviço a longo prazo, isto é, pelo menos durante o tempo de vida planeado para a estrutura.

A durabilidade não é uma propriedade inerente do material pois o seu desempenho varia com o tempo quando exposto a condições normais de uso (Figura 2.8) (Sattler e Pereira, 2006).

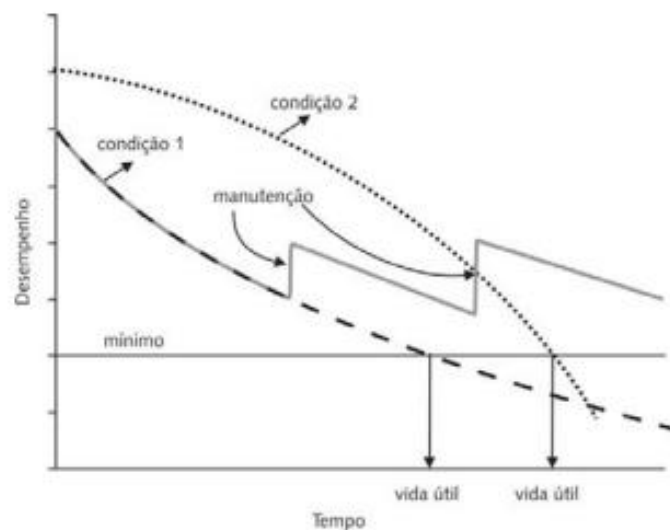


Figura 2.8 – Função de desempenho versus tempo descrevendo a durabilidade de um produto em determinadas condições ambientais (Sattler e Pereira, 2006).

Como a durabilidade é mensurável através da vida útil de um material para quantificar a sua durabilidade para certas condições. A vida útil é o período durante o qual o material tem um desempenho igual ou superior ao mínimo requerido (Figura 2.8). A vida útil de uma estrutura é determinada tendo em conta os indicadores de degradação que servem de medidas para o desempenho do material.

São considerados indicadores de degradação as propriedades, preferencialmente quantificáveis, que expressem o impacto da degradação no desempenho do produto (Sattler e Pereira, 2006). Alguns exemplos de indicadores de degradação da madeira são a variação de cor e/ou brilho, a variação das propriedades mecânicas e a perda de massa (Sattler e Pereira, 2006).

Todos os materiais se degradam com o tempo, no entanto os mecanismos de degradação variam para diferentes tipos de materiais (Fredriksson, 2013). Assim, é importante conhecer os mecanismos de degradação do material a usar, de forma a estimar a sua durabilidade, para que a estrutura seja projetada com uma longa vida útil. Os mecanismos de degradação dependem não só do material, mas também da sua aplicação. Cada estrutura tem o seu mecanismo de degradação que consiste num conjunto de fatores de degradação.

São considerados fatores de degradação quaisquer agentes que atuem sobre os materiais, através de reações químicas, processos físicos ou mecânicos, provocando alterações que diminuem o seu desempenho (Sattler e Pereira, 2006).

Os fatores determinantes da durabilidade (fatores de degradação) podem ser agrupados em três categorias: ambiente, materiais e tensões. O ambiente refere-se essencialmente à temperatura e humidade a que a estrutura está submetida. A categoria dos materiais refere-se às próprias propriedades do material ou materiais estruturais. A última categoria trata das tensões a que a estrutura em análise é submetida (Custódio *et al.*, 2008). Relativamente a uma estrutura com ligações, além destas categorias, a durabilidade de uma estrutura também depende da boa execução das junções (Mascarenhas, 2005).

Estas categorias de fatores de degradação confirmam/reforçam que os estudos de durabilidade de um material devem ter em consideração a função/utilização/aplicação do material. Por exemplo, no caso da madeira, o facto de estar situada no interior ou no exterior de um edifício tem relevância para o impacto na durabilidade dos agentes de degradação. No primeiro caso, a madeira é principalmente influenciada pela humidade relativa e temperatura enquanto no segundo caso a madeira sofre degradação principalmente devido à presença de fungos (Fredriksson, 2013).

No caso específico da madeira, os principais agentes de degradação são os relacionados com o meio ambiente como o clima, os ventos e os componentes do ar e os relacionados com os agentes biológicos como os fungos, as bactérias, os roedores e os vegetais.

A elevada temperatura é um agente de degradação com um efeito de carácter diverso pois tanto provoca um aumento na taxa de degradação, pois favorece o ataque de fungos, como também provoca variações dimensionais que podem levar ao surgimento de tensões (Sattler e Pereira, 2006).

Muitos dos agentes de degradação importantes para a madeira encontram-se presentes na atmosfera (o clima). A intensidade destes fatores varia no espaço e por esta razão torna-se importante o seu mapeamento. Nestes mapas devem ser incluídos os dados climatológicos como a chuva, o vento e a temperatura (Sattler e Pereira, 2006).

Os fatores determinantes da durabilidade da madeira vão ser mais detalhados no capítulo 2.5.

#### 2.4.1. Métodos de inspeção

Os métodos de inspeção são utilizados para ajudar a avaliar os indicadores de degradação. A inspeção de estruturas de madeira avalia as condições de conservação e as características mecânicas dos diversos elementos. Para tal são utilizados métodos de inspeção, que podem ser destrutivos ou não destrutivos. Apresenta-se de seguida os métodos de inspeção não destrutivos mais comuns que estão resumidos na Tabela 2.2:

##### i. Inspeção visual

Esta consiste na deteção de informações relativas à madeira em estudo através da observação da sua superfície. É possível verificar número de anéis de crescimento, tipo de madeira, defeitos superficiais, entre outras informações.

##### ii. Fotogrametria

Este é o método mais simples e deteta todos os defeitos visíveis à superfície. São efetuados registos fotográficos, durante as inspeções, obtidos nas mesmas condições (luminosidade, ângulo, escala, etc) de forma a ser possível ver a evolução do envelhecimento do elemento de madeira. O maior problema é que só deteta indicadores de degradação visíveis.

##### iii. Medição da densidade superficial (Pylodin/Resistograph/higrometro)

Neste método usa-se um aparelho que perfura a peça de madeira a ser estudada, com o objetivo de medir a sua resistência à perfuração, nomeadamente a dureza e densidade, sendo possível também detetar defeitos internos e variações de densidades. A abertura é impercetível e sem influência na resistência mecânica da madeira.

##### iv. Métodos baseados na propagação de ondas (Ultrassons/Microwave/Vibrações induzidas)

Estes métodos baseiam-se na relação entre a propagação de ondas e as propriedades elásticas da madeira.

No caso da propagação de ondas sonoras (ultrassons) existem vários métodos de propagação: método de ecos; método de ressonância; método de imersão e método de transmissão. Este último método é o mais utilizado para inspeções de madeiras pois, na presença de defeitos ou vazios ocorre a refração das ondas originando uma diminuição na amplitude e um aumento no tempo de propagação. Além da massa volúmica, do módulo de elasticidade e dos defeitos também o teor de humidade e a direção da medição condicionam ligeiramente a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas. Relativamente ao teor de humidade, sabe-se que para cada 1% de aumento do valor de humidade, a velocidade decresce 0,8%, numa relação linear, num intervalo de 5 a 30% (Júnior, 2006). Sabe-se também que a velocidade de propagação de ondas é superior na direção longitudinal das fibras, devido à anisotropia da madeira.

A análise de propagação de ondas eletromagnéticas, denominadas microondas (*microwaves*), caracteriza o meio atravessado do ponto de vista das propriedades dielétricas da madeira. A propagação destas ondas é função da frequência das ondas, da temperatura, do teor de humidade, da densidade e da presença de heterogeneidades.

A velocidade de propagação de ondas de choque é medida através do chamado método das vibrações induzidas. Com este método, tal como acontece com as ondas sonoras, é possível identificar zonas degradadas ou com defeitos porque a velocidade das ondas é menor nessas zonas.

v. Detecção acústica de insetos

Este método é utilizado para identificar insetos xilófagos pois estes originam uma amplificação das ondas sonoras. Assim é possível identificar zonas atacadas que não seriam identificadas por inspeção visual.

vi. Radiografia (Raios-X/Raios-gama)

A técnica de radiografia por raios-X foi uma das primeiras técnicas utilizadas para inspeção de estruturas de madeira. Este método consiste em incidir na madeira em estudo um feixe de raios-X e como consequência da interação do feixe com a madeira é obtida uma imagem que contém informação da constituição da peça. Nestas imagens é possível identificar a distribuição da densidade no material pois esta condiciona a quantidade de radiação que a atravessa. É possível também identificar degradações, elementos da estrutura (por exemplo, conectores) e defeitos. Devido ao elevado custo e à possível perigosidade das radiações de raios-X, o feixe usado para estes estudos foi substituído por um feixe de raios gama, que tem a vantagem de fornecer informação em tempo real.

## vii. Dendrocronologia

Com este método é possível determinar, com grande precisão, o tempo de vida de um elemento de madeira através da análise dos anéis de crescimento retirando pequenas carotes do elemento estrutural, no sentido transversal.

## viii. Termografia

Consiste no mapeamento de temperaturas de uma estrutura, usando câmaras de infravermelhos. Esta técnica permite obter imagens em tempo real da distribuição dos padrões térmicos, sendo assim possível distinguir quais as zonas mais secas e as mais húmidas de uma estrutura, além de identificar defeitos no interior da madeira, por exemplo a presença de insetos.

Tabela 2.2 - Critério de escolha de técnicas não destrutivas a usar de acordo com o objetivo da inspeção (Riggio *et al.*, 2015).

Objectivo da inspeção	Técnicas não-destrutivas
<b>Identificar a espécie da madeira</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Análise visual</li> <li>▪ Análise em laboratório</li> </ul>
<b>Identificação de defeitos superficiais, do anéis de crescimento e de alterações de geometria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Análise visual</li> <li>▪ Fotogrametria</li> <li>▪ Dendrocronologia</li> </ul>
<b>Identificação de defeitos no interior</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Medição da dureza superficial (<i>Pyloclin /Resistograph</i>)</li> <li>▪ Métodos baseados na propagação de ondas (Ultrassons/<i>Microwave</i>/Vibrações induzidas)</li> <li>▪ Raio-X / Raio gama</li> <li>▪ Termografia</li> </ul>
<b>Identificação de degradação biológica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inpeção visual</li> <li>▪ Medição da densidade superficial (<i>Pyloclin /Resistograph</i>)</li> <li>▪ Métodos baseados na propagação de ondas (Ultrassons/<i>Microwave</i>/Vibrações induzidas)</li> <li>▪ Deteção acústica</li> <li>▪ Raios-X / Raio gama</li> </ul>
<b>Teor de humidade</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Métodos baseados na propagação de ondas (Ultrassons/<i>Microwave</i>/Vibrações induzidas)</li> <li>▪ Termografia</li> <li>▪ Higrometro</li> </ul>

## 2.4.2. Ensaios de previsão da durabilidade

A durabilidade de uma estrutura/peça é difícil de ser calculada com exatidão. Existem, no entanto, algumas estratégias que permitem prever a durabilidade, nomeadamente fazendo ensaios de envelhecimento. Estes ensaios podem ser (1) Ensaios de envelhecimento natural; (2) Ensaios de envelhecimento acelerado.

- Ensaios de envelhecimento natural;

O envelhecimento natural consiste na exposição e monitorização de forma contínua de amostras, normalmente de pequenas dimensões, a agentes atmosféricos, como temperatura, humidade e vento.

O prazo para a obtenção de resultados nestes estudos é longo, mas a degradação é a que efetivamente vai ocorrer em condições de uso. No entanto neste tipo de envelhecimento não são considerados fatores de uso, que obviamente irão contribuir para o envelhecimento.

- Envelhecimento acelerado da madeira

O envelhecimento acelerado tem como objetivo a rápida avaliação da durabilidade de um material, ou seja, do seu desempenho (resistência) em condições de serviço a longo prazo.

No caso do envelhecimento acelerado os ensaios são realizados em laboratório onde é simulada a ação de agentes de degradação em intensidades muito superiores às esperadas em condições reais de uso. Para cada mecanismo de degradação (ou combinação de agentes de degradação) é necessário um ensaio diferente pois não existe um ensaio de envelhecimento acelerado universal (Sattler e Pereira, 2006). Existem então diferentes ensaios de envelhecimento para representar diferentes mecanismos de degradação. Ensaios de envelhecimento dinâmicos como os ciclos de molhagem e secagem refletem a degradação provocada por chuva e ensaios estáticos como a imersão do provete em água refletem o comportamento da madeira a uma inundação.

O lado negativo dos ensaios de envelhecimento acelerado é que é necessário verificar se os agentes induzidos não provocaram alterações nos mecanismos de degradação (por exemplo produção de um componente que não acontece no envelhecimento natural). Além disso, neste método a amostra é exposta a um ou mais agentes pré-definidos em simultâneo, enquanto em condições reais podem estar presentes outros agentes que não foram contabilizados (Sattler e Pereira, 2006).

Para definir ensaios de envelhecimento acelerado é necessário definir as condições meteorológicas a considerar, nomeadamente a quantidade e duração da precipitação, a temperatura e a humidade relativa sendo assim possível definir os parâmetros do envelhecimento.

De forma a representar a chuva conduzida por vento, Isopescu (2016) utilizou o seguinte programa de envelhecimento: período de chuva de 4h, seguido de um período de secagem de 4h repetindo este procedimento 108 vezes (27 dias). Este processo de envelhecimento termina com um período de secagem de 7 dias. Para representar uma inundação, Isopescu (2016)

considerou um período de chuva de 4h, seguido de um período de secagem de 4h repetindo este procedimento durante 4 dias. Este processo de envelhecimento termina com a imersão das peças durante 7 dias, seguido de 7 dias de secagem.

Bradley *et al.* (2015), para representar uma inundação severa colocou os provetes em água (da chuva) durante 5 dias a uma profundidade de 1 m. Com o objetivo de recuperar as propriedades mecânicas Bradley *et al.* (2015) colocou alguns provetes, após submersos, num ambiente controlado a 38°C e 40% de humidade relativa.

Kojima e Suzuki (2010) apresentam vários processos de envelhecimento acelerado. Na Tabela 2.3 estão apresentados esses processos, onde estão descritos os passos de um ciclo de envelhecimento. De referir que cada processo de envelhecimento é repetido entre 1 a 10 vezes. Após o envelhecimento e antes de proceder aos testes, é necessário que as amostras recuperem as propriedades mecânicas, ou seja atinjam o estado de equilíbrio. O ensaio de envelhecimento acelerado mais conhecido é o ASTM *six cycle*.

Tabela 2.3 - Resumo das etapas de um ciclo de vários métodos de envelhecimento acelerados (Kojima e Suzuki, 2010; ASTM D143-14, 2014).

Métodos	Etapas de um ciclo	Temperatura (°C)	Tempo (h)	Tempo total de um ciclo
Cyclic JIS-B	Imersão	ferver	2	24h
	Imersão	20	1	
	Secagem	60	21	
Cyclic APA D1	Imersão	66	8	24h
	Secagem	82	14,5	
	Setting	Temperatura ambiente	1,5	
V313	Imersão	20	72	172h (aprox. 7 dias)
	Congelamento	-12	24	
	Secagem	70	72	
	Setting	Temperatura ambiente	4	
ASTM six cycle	Imersão	49	1	33h
	Exposição a vapor	93	3	
	Congelamento	-12	20	
	Secagem	99	3	
	Exposição a vapor	93	3	
	Secagem	99	3	
VPSD	Imersão sob vácuo	-	0,5	23,5h
	Imersão sob pressão (290kPa)	-	1h	
	Secagem	60	22	



## 2.5. Fatores de degradação

A madeira é um material com um vasto campo de aplicação porque, como já foi referido anteriormente, possui uma elevada variabilidade de características. Esta variação considerável nas propriedades físicas e mecânicas do material é importante para a definição da capacidade estrutural da madeira e é condicionada por vários fatores, denominados de fatores de degradação: relacionados com as características da madeira e com fatores. Com isto, e como no contexto deste trabalho é importante conhecer as transformações que a madeira sofre e que afetam a sua durabilidade, esta secção é dedicada aos fatores de degradação. Como já foi referido anteriormente, os fatores podem ser categorizados como relativos ao ambiente, ao material, às tensões e, no caso de estruturas, à execução. De seguida fala-se dos relacionados com o ambiente pois são os mais importantes a serem estudados no âmbito deste trabalho.

Em condições ambientais e de utilização adequadas, principalmente em ambientes secos e ventilados, a madeira constitui um dos materiais com maior durabilidade. Contudo, em condições adversas a madeira pode sofrer redução das propriedades da estrutura, principalmente nas ligações pois são os pontos mais fracos. Com isto torna-se importante sintetizar os aspetos com maior influência nas propriedades da madeira com o objetivo de a compreender melhor como material estrutural.

Existem dois fatores principais de deterioração:

- condições meteorológicas, nomeadamente temperatura, humidade relativa e precipitação;
- fungos.

O primeiro fator é mais frequente para estruturas de madeira no interior de edifícios, enquanto o segundo ocorre mais frequentemente quando a madeira é exposta ao ar livre/clima (Savvioni *et al*, 2010).

### 2.5.1. Variações climáticas

Variações do clima (temperatura e humidade relativa) são uns dos principais problemas na preservação de estruturas de madeira históricas. Alguns exemplos típicos de condições climáticas que afetam as propriedades das estruturas de madeira são as inundações e a exposição a grandes períodos de chuva e seca. Assim, a durabilidade e capacidade resistente da madeira dependem tanto da humidade como da temperatura do ambiente em que está inserida.

Estas alterações de temperatura e humidade relativa do ar são especialmente perigosas para a madeira devido ao facto de, como já foi referido anteriormente, ser um material higroscópico. Como a humidade exerce uma grande influência no comportamento da madeira é necessário compreender a reação da madeira à humidade de forma a estudar a sua durabilidade. Para tal, utiliza-se o parâmetro teor de humidade, já definido anteriormente. É importante a correta estimativa do teor de humidade da madeira, pois alterações do teor de humidade podem provocar a variação das propriedades físicas e mecânicas, nomeadamente mudanças dimensionais (contração ou dilatação), e para valores elevados de teor de humidade pode ocorrer a decomposição ou o crescimento de fungos (Dietsch *et al.*, 2014).

Para compreender melhor os efeitos da humidade na madeira é necessário conhecer os processos da adsorção de água pela madeira. Segundo Dietsch *et al.* (2014), a adsorção de humidade ocorre em duas gamas de humidade (Figura 2.9): teor de humidade da madeira inferior ao ponto de saturação e teor de humidade superior ao ponto de saturação. O ponto de saturação, como já foi dito anteriormente, é uma propriedade do material que varia entre espécies, mas geralmente aproxima-se de 30%. Para valores de humidade inferiores ao ponto de saturação a humidade é transferida para as paredes celulares enquanto para valores de humidade superiores ao ponto de saturação as paredes celulares encontram-se completamente saturadas e a humidade é transferida para as cavidades da madeira.

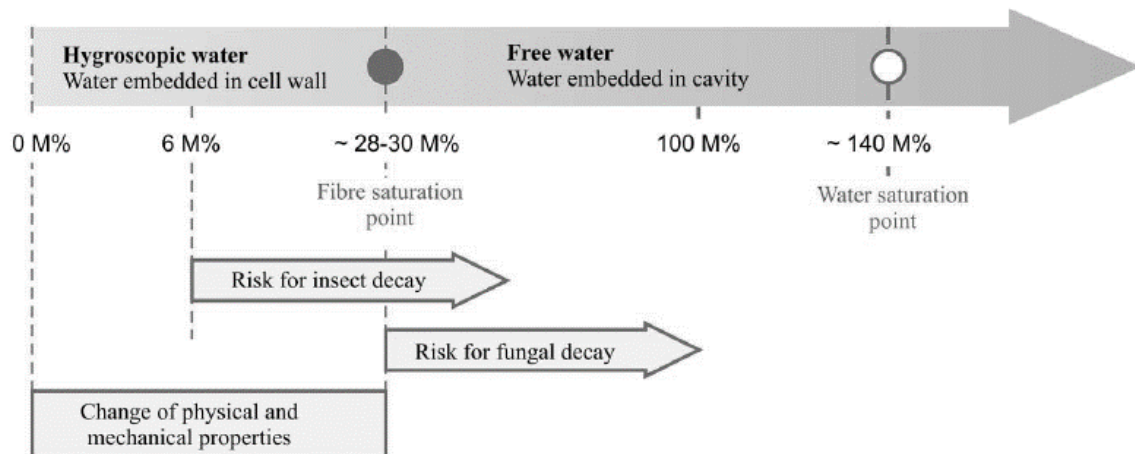


Figura 2.9 -Variação do teor de humidade da madeira e a sua influência (Dietsch *et al.*, 2014).

De seguida descreve-se como o teor de humidade influencia a madeira, ou seja, as suas propriedades, a deformação e o aparecimento de fungos.

### i. Propriedades

Como está demonstrado na Figura 2.9, para um teor de humidade abaixo do ponto de saturação há alterações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira. A Figura 2.10 mostra essas alterações, a partir do ponto de saturação, à medida que o teor de humidade diminui, as propriedades melhoram.

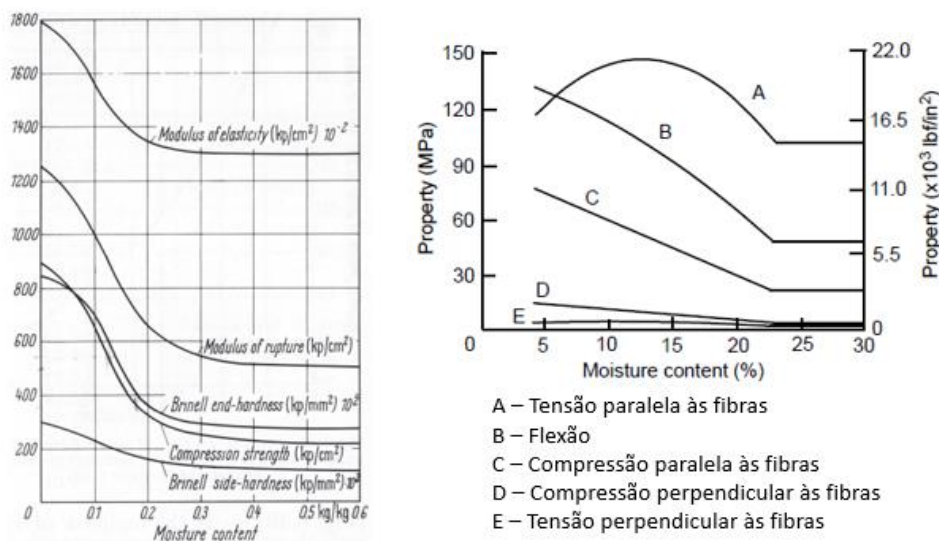


Figura 2.10 - Efeito do teor de humidade nas propriedades da madeira (Dietsch *et al.*, 2014).

Pode-se então afirmar que quanto maior o teor de humidade do material, menor a capacidade resistente e conseqüentemente pior o seu comportamento. Com o aumento do teor de humidade, a resistência mecânica, o módulo de elasticidade e a tensão de rutura diminuem, sendo que o teor em humidade influencia mais a resistência à compressão, do que a resistência à flexão. A resistência à tração é praticamente independente do teor em água.

### ii. Deformação/Variação dimensional

Os ciclos de adsorção e libertação de água podem provocar variações dimensionais da madeira, contraindo quando perde humidade e dilatando quando ganha humidade.

Devido à anisotropia da madeira, estas mudanças dimensionais são diferentes nos três eixos (longitudinal, tangencial ou radial). O encolhimento e o inchaço são significativamente mais pronunciados na direção radial e tangencial do que na direção longitudinal como esboçado na Figura 2.11 (Dietsch *et al.*, 2014).

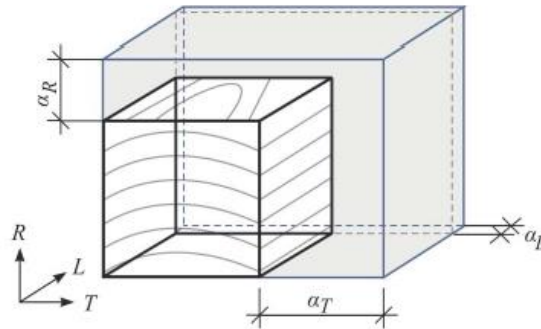


Figura 2.11 -Variação dimensional dependendo do eixo da madeira (Dietsch et al., 2014).

Em condições reais, as peças de madeira estão, normalmente, impedidas de alterar dimensões. Estas restrições podem ser externas devido ao facto de, por exemplo, fazer parte de uma estrutura rígida ou internas consequência da diferença no tempo de secagem da parte exterior e interior da peça da madeira. Devido a estas restrições de movimento, a adsorção ou libertação de água (alteração da humidade) vai induzir tensões na peça.

No caso da peça de madeira estar impedida de encolher, quando perde humidade para o exterior, ocorre um aumento de tensão. Quando a tensão excede o limite de elasticidade do material ocorrem deformações plásticas irreversíveis (como rutura da madeira por fadiga ou o aparecimento de empenos e/ou fendas). Por outro lado, se a peça de madeira está impedida de inchar pode ocorrer deformações plásticas por efeito de compressão que pode resultar no esmagamento da estrutura de madeira.

O fenómeno que gera tensões no interior de uma peça de madeira que está restringida ao “movimento”, como já foi referido anteriormente, é a secagem. Como a camada exterior da madeira se adapta às condições climáticas em primeiro lugar, ou seja, secando mais rapidamente que o interior resulta no aparecimento de tensões mecânicas pelo facto de a camada exterior ser impedida de encolher visto que o interior da madeira que ainda se encontra húmido e inchado. Como resultado podem surgir danos significativos na peça, como o aparecimento de fendas internas (Dietsch *et al.*, 2014). Para evitar estes efeitos, a secagem deve ser efetuada de forma lenta e uniforme minimizando as tensões entre a superfície e o interior da madeira (Mascarenhas, 2005).

O controle das fendas relacionadas com as alterações dimensionais é muito importante pois estas irão influenciar a qualidade e o comportamento de uma peça de madeira.

### iii. Fungos

Outro efeito do elevado teor de humidade é o risco de degradação por agentes biológicos que, devido à sua grande importância na degradação da madeira, será explicado em pormenor no ponto seguinte.

#### 2.5.2. Ataque de agentes biológicos

A decadência induzida por ataque de agentes biológicos é um dos principais mecanismos pelo qual as estruturas de madeira se deterioram. Esta degradação pode afetar severamente as estruturas de madeira, causando mesmo instabilidade estrutural pois ocorre uma redução das propriedades mecânicas, da sua resistência e do seu peso.

Quando a madeira é aplicada no exterior, fica exposta às intempéries e conseqüentemente sujeita à degradação fúngica. Uma forma de evitar este tipo de degradação é mantendo a madeira seca (Zlahtic e Humar, 2017).

A decomposição por agentes biológicos ocorre se estiverem disponíveis condições ambientais adequadas, como excesso de humidade, temperaturas altas e falta de ventilação. Os organismos biológicos, mais comuns, responsáveis pela degradação são os fungos, as bactérias e certos insetos que obtêm alimento direta ou indiretamente da madeira (utilizam os constituintes da madeira como fonte de energia).

Os fungos são considerados os responsáveis pela maior proporção de danos uma vez que ocorrem com mais frequência e se desenvolvem rapidamente, ao contrário do que acontece com as bactérias que atacam de forma lenta e apenas na madeira no estado húmido.

A capacidade destes organismos biológicos degradarem a madeira está fortemente relacionada com o teor de humidade da madeira, no entanto, o teor de humidade mínimo requerido, varia dependendo das espécies dos agentes biológicos e da espécie da madeira. Tipicamente, a gama crítica de temperatura para o crescimento ou germinação de fungos é entre 20-26°C.

No grupo dos insetos, existem as térmitas e os carunchos (Mascarenhas, 2005). As térmitas atacam o interior da peça, deixando o exterior intacto o que faz com que por vezes não se detete imediatamente a deterioração.

A Figura 2.12 apresenta um gráfico onde é visível o risco de degradação da madeira devido a fungos em função do número de dias à chuva, onde se vê que o risco de degradação aumenta linearmente com a duração dos períodos de chuva, atingindo, após 20 meses, a saturação. Assim, madeira molhada durante longos períodos torna-a mais suscetível a ser atacada por

fungos degradantes. Logo, não só as espécies de fungos são fatores importantes na determinação da extensão da degradação, mas também a duração da infecção.

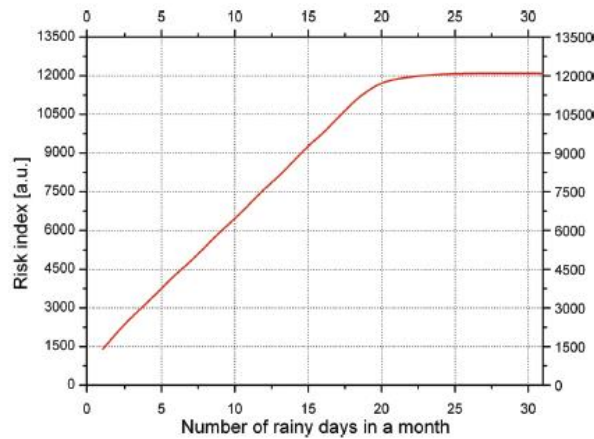


Figura 2.12 – Gráfico demonstrativo do risco da ocorrência de ataques fúngicos na madeira de acordo com o tempo que esta está à chuva (Savvioni *et al.*, 2010).

Desta forma a madeira a usar nas construções deverá ter um teor de humidade o mais próximo possível do teor de humidade de equilíbrio. Desta forma reduz-se a influência da humidade nas suas propriedades e características, garantindo a qualidade e durabilidade da madeira.

## 2.6. Ligações

Numa estrutura de madeira está implícita a necessidade de interligar os vários elementos que a constituem. À área de conexão entre duas peças chama-se junta. Na figura 2.13 encontra-se a ilustração de uma junta.



Figura 2.13 - Fotografia de ligações de uma estrutura de madeira e das suas ligações.

Uma das mais famosas características de uma estrutura de madeira é o seu bom desempenho a terremotos ou ventos fortes. As ligações têm uma enorme contribuição para este bom

desempenho pois permitem deslocamentos relativos e rotações entre os elementos da parede contribuindo assim para que estas tenham simultaneamente um comportamento semi-rígido e dúctil, permitindo a dissipação de energia. A facilidade de manuseamento e a leveza da madeira, quando comparando com outros materiais construtivos como o aço e o betão, são outras das vantagens de construções em madeira (e ligações).

No entanto, é nas ligações (entre os elementos de uma estrutura) que se concentram mais tensões. Desta forma as ligações tornam-se os pontos mais fracos e o seu comportamento influencia o desempenho global da construção. Assim, é muito importante conhecer bem o comportamento das ligações de forma a reduzir os erros de conceção e melhorar o desempenho e a estabilidade da estrutura a construir.

Sendo as ligações os pontos críticos de uma estrutura, para o bom desempenho de uma estrutura é então essencial a caracterização das ligações em termos de capacidade de resistência, de deslocamento, de rigidez, de dissipação de energia e de amortecimento viscoso. Estas propriedades dependem de vários fatores como a área e o ângulo de contacto, e a distância entre as duas superfícies da ligação (Fredriksson, 2013). Como já foi referido anteriormente o comportamento semi-rígido da ligação é muito importante pois no caso extremo das ligações serem extremamente rígidas, a rotura poderá ocorrer pelos membros da estrutura implicando uma rotura frágil que deve ser evitada a todo o custo.

As ligações têm como principal função a distribuição de esforços nos vários elementos que formam a estrutura e o seu comportamento não só depende das propriedades do material como da qualidade da sua execução e, no caso de estruturas já existentes, é também função do estado de degradação da madeira (Poletti, 2013). Perante um pequeno abalo, um edifício pode sofrer sérios danos se as juntas não tiverem sido corretamente executadas (Mascarenhas, 2005).

Para além da distribuição de esforços, as ligações numa estrutura têm também o objetivo de reduzir as tensões quando, por exemplo, ocorrerem alterações dimensionais devido a variações térmicas e higrométricas ou, quando ocorrerem movimentos provocados por assentamentos e sismos (Mascarenhas, 2005).

As ligações numa estrutura de madeira de uma construção *timber-framing* podem ser tradicionais ou juntas/ligações reforçadas ou uma combinação das duas.

### 2.6.1. Ligações tradicionais

Ao longo dos tempos foram desenvolvidas diversas técnicas de ligação. Tradicionalmente as ligações consistiam em esculpir manualmente os elementos de forma a conseguir uni-los. Ainda hoje em dia, estas ligações tradicionais chamadas de ligações por entalhes são uma das formas mais simples e eficientes de ligar elementos de madeira (Lourenço e Branco, 2013). Nestas ligações a transmissão de esforços é feita por atrito e compressão na interface entre os elementos a unir.

O leque de geometrias disponíveis para unir duas peças de madeira é vasto (Figura 2.14), havendo ligações tipificadas para cada aplicação particular (Lourenço e Branco, 2013). No caso específico de ligações tradicionais usadas em paredes gaioleiras, Mascarenhas refere que as mais utilizadas são: a ligação do tipo “*notched*”, a ligação do tipo meia madeira, a ligação do tipo “*dovetail*” e, por fim, a ligação do tipo “*oblique*”. A Figura 2.9 mostra alguns dos tipos de ligação mais usados.

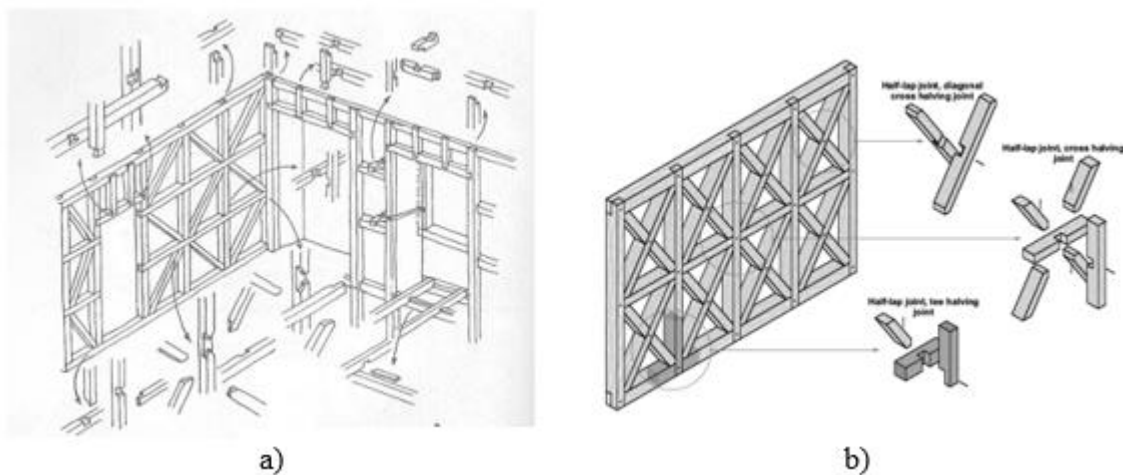


Figura 2.14 - Ligações tipicamente usadas nas gaiolas dos edifícios pombalinos (Mascarenhas, 2005) (Isopescu, 2016)

Existem vários sistemas de classificação das ligações. Segundo Zwerger (1997), as ligações podem ser “*halved-and-lapped*”, “*notched*” que é um caso específico do anterior, ou “*tenon*”. Segundo Gerner, para além destas ainda é importante definir as ligações “*dovetail*” que é um caso especial de “*tenon*” e as ligações oblíquas (Isopescu, 2016). As ligações são ainda classificadas segundo a sua posição (vertical ou horizontal) e a sua forma (L, T ou X).



### i. Ligações do tipo “HALVED AND LAPPED”

As ligações “*halved and lapped*” agrupam muitas formas de ligar madeiras, como se pode ver na Figura 2.15, sendo a mais conhecida e mais comum a meia madeira (*half-lap*).

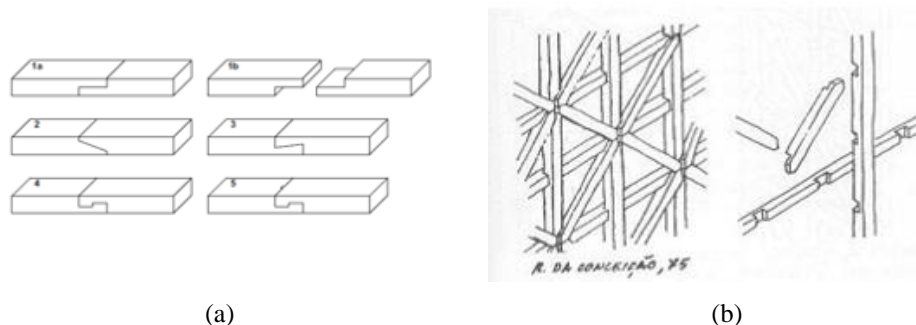


Figura 2.15 -Ligações “halved and lapped”. (a) Vários tipos de ligações “halved and lapped” (Isopescu, 2016); (b) Exemplo de uma construção pombalina com a combinação de meia madeira e dovetail (Mascarenhas, 2005)

### ii. Ligações do tipo “NOTCHED”

A ligação *notched*, que pode ser considerada uma variação especial da *halved joint*, está muito presente nas casas pombalinas (Figura 2.16).

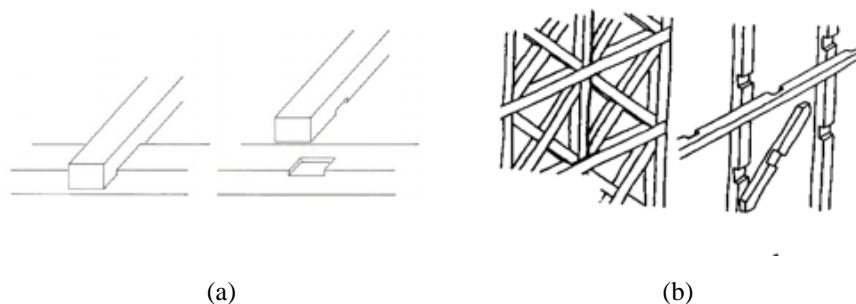


Figura 2.16 – Ligação notched: (a) Esquema de uma ligação notched (Zwerger, 1997); (b) Exemplo de uma construção pombalina com ligações notched (Mascarenhas, 2005)

### iii. Ligações do tipo “TENON”

A ligação tradicional chamada de “*tenon*” une as peças de madeira fazendo cortes nas peças de forma a que as duas vigas possam encaixar como peças de um puzzle (Figura 2.17). Numa peça é feito um corte denominado *mortise* (feminino) e na outra peça é feito um corte denominado *tenon* (masculino). O *tenon* é inserido na *mortise* formando uma ligação forte que pode aguentar a resistência por centenas de anos. Para fortalecer este tipo de ligação são usados *hardwood pegs*.

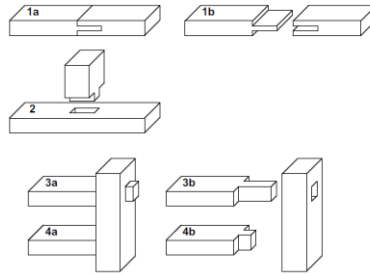
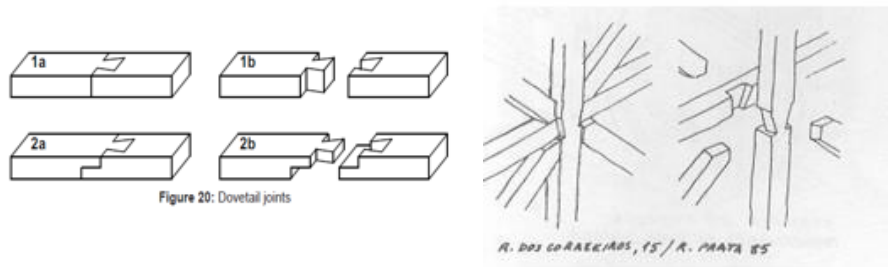


Figura 2.17 - Ligação "tenon" (Isopescu, 2016)

Um exemplo de uma ligação do tipo “tenon” é a *dovetail*. A ligação dovetail é uma das mais fortes, mais estáveis e mais belas conexões. Uma vez feita esta ligação torna-se muito difícil de separar por causa de sua forma em cunha.

Ligações de *dovetail* são habitualmente usadas para suportar tensão e compressão. A combinação de ligação *dovetail* com *halved-scarf* (meia madeira) era frequentemente usada para melhorar a resistência da junção a cargas (Zwenger, 1997). Na Figura 2.18 vêm-se alguns exemplos de ligações *dovetail* usados nas casas pombalinas.



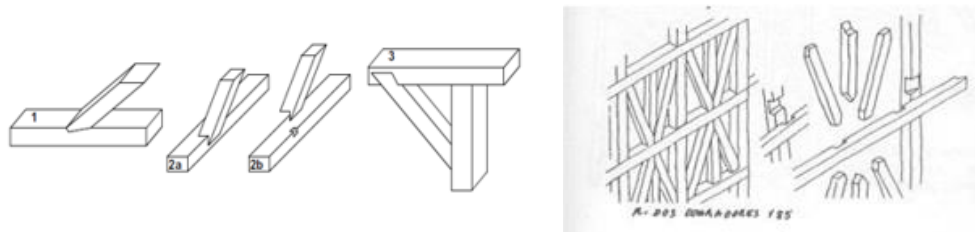
(a)

(b)

Figura 2.18 – Ligação *dovetail*: (a) Esquema da ligação (Isopescu, 2016); (b) Exemplo de uma construção pombalina com ligações *dovetail* (Mascarenhas, 2005)

#### iv. Ligações do tipo “Oblique”

Como exemplos de ligações oblíquas tem-se a ligação *tenon* oblíqua, a ligação *birdsmouth* e a ligação *brace*.



(a)

(b)

Figura 2.19 – Ligação oblíqua: (a) Esquema de várias ligações oblíquas (Isopescu, 2016); (b) Exemplo de uma construção pombalina com ligações oblíquas (Mascarenhas, 2005)

## ELEMENTOS DE LIGAÇÃO:

As ligações tradicionais de madeira baseiam-se principalmente em encaixes por cortes na madeira, por cunhas, por dobradiças ou por cavilhas. A presença de conectores metálicos, como pregos e parafusos, não era muito comum, mas quando usados melhoravam a ligação (Poletti, 2013). Os elementos de ligação servem essencialmente para assegurar a estabilidade da ligação e estão, normalmente, sujeitos a esforços de flexão e de corte. A transferência de carga é conseguida por flexão do ligador, por pressão diametral e por ações de corte na madeira ao longo do seu comprimento.

### 2.2.1. Ligações reforçadas

De forma a melhorar o contacto entre os elementos ligados, hoje em dia, são normalmente adicionados novos elementos de ligação como colas, conectores metálicos e/ou materiais compósitos (Fiber reinforced plastic-FRP's), que permitem aumentar a capacidade mecânica da ligação. Neste tipo de ligações os esforços são transmitidos mediante os novos elementos de ligação. Assim, cada tipo de reforço terá consequências únicas na resistência, na rigidez e na ductilidade final da peça e da ligação.

No que diz respeito à cola, esta tem a vantagem de não ser preciso furar ou cortar a madeira, de distribuir a carga de forma uniforme e de adicionar pouco peso à estrutura, mas tem a desvantagem da falta de precisão e da limitação a altas temperaturas. Por outro lado, para a utilização dos conectores metálicos, que são geralmente de aço, é necessário o conhecimento do material para saber a sua resistência. A técnica de reforço por meio de materiais compósitos é feita pela adição de fibras sintéticas, como por exemplo, fibras de vidro, de carbono ou de aramida, na parte comprometida da estrutura.

As fibras FRP são normalmente ligadas à madeira por cola enquanto os conectores metálicos tanto podem ser ligados por cola como por cavilhas ou por ambos. Estes elementos de conexão e estabilização da ligação, para além de impedirem as deformações no plano ortogonal à estrutura, têm o objetivo de impedir possíveis inversões de esforços.

O correto reforço de ligações é muito importante tanto para prevenir os deslocamentos para fora do plano como para melhorar o comportamento da ligação no seu próprio plano garantindo o contacto entre as peças ligadas com o objetivo de não comprometer a segurança do conjunto estrutural nem colocar em risco os seus utilizadores.



### 3. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

#### 3.1. Introdução

Um dos objetivos do presente trabalho consiste em avaliar a durabilidade da madeira e de ligações tradicionais de madeira sob condições ambientais extremas. Para este efeito, decidiu-se efetuar ensaios de envelhecimento acelerado e avaliar o efeito destes nas propriedades físicas e mecânicas. Deste modo, são apresentados neste capítulo três métodos experimentais de envelhecimento acelerado, explicam-se as diferentes etapas e discutem-se as alterações efetuadas aos mesmos relativamente às normas. Os ensaios de envelhecimento acelerado incluem:

(1) ciclos de imersão em água destilada e secagem em estufa. Neste procedimento são utilizadas diferentes temperaturas da água e de secagem;

(2) ciclos de aspersão e secagem, para simulação de sequência de chuva e secagem.

Nos ensaios de imersão em água e secagem são utilizados pequenos provetes de madeira. Nos ensaios de aspersão e secagem são utilizados provetes pequenos de madeira e adicionalmente ligações tradicionais representativas de paredes de madeira de edifícios Pombalinos. A ideia em utilizar provetes pequenos nos ensaios de aspersão é avaliar a alteração da madeira como material no final dos ciclos e comparar com a degradação obtida nas ligações para as mesmas condições ambientais.

Para a realização dos ensaios acelerados houve necessidade de definir um esquema de ensaio apropriado, definir os provetes e adaptar procedimentos existentes. Para os ensaios experimentais de envelhecimento foram utilizados provetes de madeira prismáticos. Os provetes foram sujeitos a uma observação visual detalhada antes e após os ensaios de envelhecimento. Neste capítulo são ainda fornecidas algumas sugestões para trabalhos futuros com vista a melhorar o procedimento dos ensaios de envelhecimento acelerado.

## 3.2. Métodos de envelhecimento acelerado

### 3.2.1. Ensaio normalizado (CHL)

Os ensaios de envelhecimento CHL foram efetuados com base na norma ASTM D1037-93 (2014) na sequência da pesquisa efetuada e sumariada no Capítulo 2. De acordo com esta norma, o envelhecimento acelerado é efetuado em seis ciclos para representar um material sujeito a condições de exposição ambientais severas. Cada ciclo inclui as seis etapas descritas na Tabela 3.1: os provetes começam por ser imersos em água a 49°C durante 1h, de seguida são expostos a vapor de água a 93°C durante 3h; após as 3h de exposição a vapor de água, os provetes são congelados durante 20h a uma temperatura negativa de 12°C, seguindo uma secagem dos provetes a uma temperatura de 99°C por 3h; de seguida os provetes são novamente expostos a vapor de água nas mesmas condições que a etapa 2, finalizando o processo com uma secagem durante 18h.

De referir que existe um trabalho sobre ensaios de envelhecimento realizados de acordo com a norma ASTM D1037-93, escrito por McNatt e Link (1989), onde se estudou a influência de cada etapa no envelhecimento da madeira e onde propõe um procedimento alternativo ao ensaio de envelhecimento normalizado (ver Tabela 3.2). As conclusões mais importantes desse estudo, para este trabalho são: (i) para se obter os mesmos resultados em termos de degradação bastam 4 ciclos de envelhecimento e (ii) as fases de congelamento não têm qualquer influência nos resultados podendo, portanto, ser eliminadas. Deste modo, os ensaios de envelhecimento acelerado foram efetuados de acordo com o procedimento indicado na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Etapas de um ciclo do teste de envelhecimento da Norma ASTM D1037 (ASTM D1037, 2014).

<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Duração (h)</b>
<b>1</b>	Imersão em água	49±2	1
<b>2</b>	Exposição a vapor de água ( <i>Expose to steam and water vapor</i> )	93±3	3
<b>3</b>	Congelamento ( <i>Store/freezing</i> )	-12±3	20
<b>4</b>	Secagem ( <i>Heat/Drying</i> )	99±2	3
<b>5</b>	Exposição a vapor de água ( <i>Expose to steam and water vapor</i> )	93±3	3
<b>6</b>	Secagem ( <i>Heat in dry air</i> )	99±2	18

**Nota: Depois da conclusão dos seis ciclos e antes de serem testados, os provetes devem ser estabilizados a uma temperatura de 20±2°C e a uma humidade relativa de 65±1%.**

Tabela 3.2 - Descrição das etapas de um ciclo de envelhecimento alternativo proposto por McNatt e Link (1989).

Etapa	Descrição	Temperatura (°C)	Duração (h)
1	Imersão ( <i>Water soak</i> )	50	2
2	Secagem ( <i>Dry air heat</i> )	99	4
3	Imersão ( <i>Water soak</i> )	50	2
4	Secagem ( <i>Dry air heat</i> )	99	16

**Nota: Depois da conclusão dos ciclos e antes de serem testados, os provetes devem ser arrefecidos e secos.**

### 3.2.2. Ensaio alternativo – variação de temperaturas (CHL-TR)

Por se considerar que as temperaturas da água utilizada para imersão e de secagem em estufa estão fora das condições normais na natureza, realizou-se o ensaio de envelhecimento descrito anteriormente de forma adaptada: consideram-se temperaturas inferiores, quer da água de imersão, quer da estufa. O procedimento alternativo de ensaio encontra-se descrito na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Etapas de um ciclo do processo alternativo de envelhecimento acelerado com temperaturas que se encontram na natureza – CHL-TR.

Etapa	Descrição	Temperatura (°C)	Duração (h)
1	Imersão ( <i>Water soak</i> )	30	2
2	Secagem ( <i>Dry air heat</i> )	80	4
3	Imersão ( <i>Water soak</i> )	30	2
4	Secagem ( <i>Dry air heat</i> )	80	16

**Nota: Depois da conclusão dos ciclos e antes de serem testados, os provetes devem ser arrefecidos e secos.**

### 3.2.3. Envelhecimento com base em ciclos de molhagem por aspersão e secagem (CHU)

Para representar/simular o envelhecimento resultante de ciclos de molhagem (chuva) e secagem associados a períodos de chuva seguidos de tempo seco, foram realizados ciclos de molhagem-secagem com duração de 4h durante 2 meses (Tabela 3.4). Este procedimento foi definido por Isopescu (2016).

Tabela 3.4 - Descrição das etapas, por cada dia de ensaio, para o envelhecimento acelerado representativo da chuva (CHU) usado no âmbito deste trabalho.

Etapas	Descrição	Duração (h)
1	Molhagem	4
2	Secagem	4
3	Molhagem	4
4	Secagem	4
5	Molhagem	4
6	Secagem	4

### 3.3. Provetes para ensaio

Como anteriormente se referiu, pretende-se neste trabalho avaliar: (1) o efeito do envelhecimento da madeira nas suas propriedades mecânicas e físicas e (2) a influência do envelhecimento no comportamento das ligações tradicionais, para condições de exposição prolongada a períodos de chuva.

Desta forma, foram consideradas duas famílias de provetes: (1) provetes de madeira prismáticos para estudar o comportamento e as propriedades da madeira antes e após envelhecimento, denominados “provetes pequenos” (#1) no decorrer desta dissertação; (2) ligações tradicionais representativas de paredes de madeira de edifícios Pombalinos, denominadas “ligações” (#2) no decorrer desta dissertação.

Para este estudo, selecionou-se a espécie de madeira *Pinus pinaster* (Pinho branco) uma madeira típica em Portugal.

#### 3.3.1. Provetes pequenos (#1)

De forma a avaliar o envelhecimento acelerado da madeira (#1), foram preparados 160 provetes de madeira da espécie *Pinus pinaster*. Desses 160 provetes, metade (80) serão submetidos a ensaios de compressão na direção paralela às fibras (denominados como série 0) depois de terem sido envelhecidos e os restantes foram ensaiados à compressão na direção perpendicular às fibras (denominados como série 90). Na Figura 3.1 encontra-se uma imagem representativa dos dois tipos de provetes pequenos, utilizados neste trabalho.



Figura 3.1 - Provetes utilizados neste trabalho. O provete da direita é da série 90 e o da esquerda é da série 0.

Cada grupo de 80 (160 total) provetes (série 0 e série 90) é ainda dividido em quatro grupos como mostra a Tabela 3.5: (1) um grupo é constituído por 20 (40 total) provetes de referência (REF), (2) outro grupo é constituído por 30 (60 total) provetes que serão submetidos a ciclos de imersão em água destilada a 55°C e secagem em estufa a 105°C (CHL); (3) outro grupo é



constituído por 10 (20 total) provetes que serão submetidos a ciclos de imersão em água destilada a 30°C e secagem em estufa a 80°C (CHL-TR); (4) o quarto grupo é constituído por 20 (40 total) provetes submetidos a ciclos de aspersão de água e subsequente secagem (CHU). Em cada um dos grupos metade dos provetes serão ensaiados à compressão uniaxial na direção paralela às fibras da madeira e a outra metade será ensaiada à compressão uniaxial na direção perpendicular às fibras da madeira.

Tabela 3.5 - Nomenclatura adotada para os provetes pequenos (série 0 e série 90) e descrição das condições a que vão ser submetidos.

Número de provetes	Nomenclatura	Descrição
40 (20+20)	REF	Provetes de referência
60 (30+30)	CHL	Provetes submetidos a imersão (55°C)/secagem em estufa (99°C)
20 (10+10)	CHL-TR	Provetes submetidos a imersão (30°C)/secagem em estufa (80°C)
40 (20+20)	CHU	Provetes sujeitos a ciclos de aspersão/secagem

A Figura 3.2 ilustra a nomenclatura utilizada para identificação dos provetes ao longo deste trabalho. Assim, a inscrição no provete identifica a espécie de madeira (*Pinus pinaster*), o tipo de ensaio que será efetuado (compressão com orientação de 0° ou 90°, relativamente às fibras) e o tipo de ensaio de envelhecimento a que o provete vai estar submetido (CHL, CHL-TR, CHU ou REF).

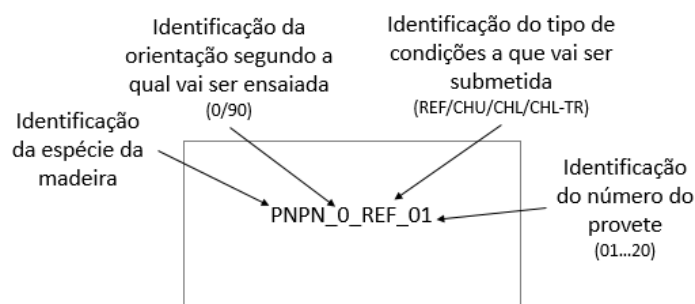


Figura 3.2 - Nomenclatura utilizada para identificação dos provetes.

Parte dos ensaios sujeitos a ciclos de imersão/secagem foram impermeabilizados nos topos para representar de forma mais realista as condições de exposição da madeira, uma vez que nas estruturas normalmente existe continuidade dos elementos e os topos não estão frequentemente em contacto directo com a água. Considera-se ainda que é possível que a absorção de água pelos topos seja mais desfavorável pelo que existe um grupo de provetes com impermeabilização (90-I e 0-I) e outro grupo sem impermeabilização. A Figura 3.3 exemplifica a forma de impermeabilização dos topos, que foi efetuada com tinta impermeável. Dos provetes

impermeabilizados, 40 provetes são submetidos a ciclos de imersão (55°C) e secagem a 105°C (CHL), 20 provetes são submetidos a ciclos de imersão (30°C) e secagem a 80°C (CHL-TR) e 40 provetes sujeitos a ciclos de aspersão de água e secagem (CHU).

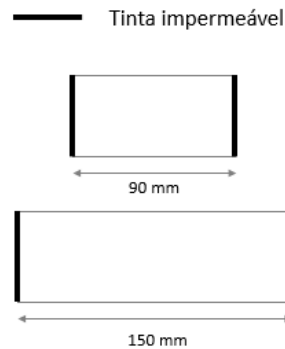


Figura 3.3 - Localização da tinta impermeável nos provetes

As dimensões dos provetes de madeira foram definidas de acordo com as indicações das normas de ensaio para caracterização do comportamento à compressão uniaxial, ver Figura 3.4. Os provetes de 90 x 70 x 45 mm<sup>3</sup> serão ensaiados à compressão paralela às fibras da madeira e os provetes de 150 x 150 x 50 mm<sup>3</sup> serão ensaiados à compressão na direção perpendicular às fibras.

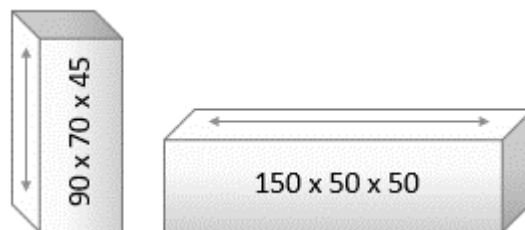


Figura 3.4 - Dimensões dos provetes pequenos e direção das fibras representadas pela seta – dimensões em mm.

### i. Inspeção visual

Como já foi referido no ponto 2.5 do Capítulo 2, alguns fatores de degradação estão relacionados com a condição inicial dos provetes, nomeadamente dos defeitos na madeira. Assim, a presença de defeitos influencia fortemente as propriedades da madeira, tornando importante analisar com cuidado este aspeto. Deste modo, foi feita uma inspeção visual inicial de forma a caracterizar os provetes relativamente ao tipo de defeitos existentes. Foi efetuado um registo/descrição do tipo de defeitos e a sua localização. Para cada provete foram identificadas as principais características como, por exemplo, presença ou não de: (i) defeitos, (ii) zonas danificadas, (iii) zonas degradadas. Foram realizados relatórios de inspeção visual (Anexo I) onde estão descritos e caracterizados os diferentes defeitos dos provetes assim como uma análise dos anéis de crescimento, tendo-se verificado que alguns provetes continham

defeitos como nós e fendas. Os materiais utilizados para este trabalho foram um paquímetro, uma régua e uma máquina fotográfica. Após a inspeção visual passou-se à fase do levantamento de medições onde foram registadas as dimensões geométricas dos elementos a ser estudados. Nos provetes em estudo neste trabalho, como se trata de madeira nova, não foram detetados defeitos induzidos por carregamentos nem por degradação biológica. No entanto foram observados em alguns provetes defeitos naturais associados à presença de nós, fendas e desvio do alinhamento das fibras (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Fotografias ilustrando os defeitos encontrados em alguns provetes durante a inspeção inicial: (a) fotografia do provete 90\_CHL\_10 com 3 nós; (b) fotografia do provete 90\_CHU\_01 com uma fenda.

### 3.3.2. Ligações (#2)

A ligação tradicional de madeira utilizada nos ensaios de aspersão e secagem e subsequente caracterização mecânica apresenta a geometria e dimensões indicadas na Figura 3.6. Esta ligação consiste na união de uma viga e de um pilar através de encaixe (meia-madeira) e de um prego com 10 cm de comprimento e 4mm de diâmetro. Para simplificação dos ensaios não se considera a contribuição do elemento diagonal que geralmente está ligado aos elementos horizontais e verticais. Como anteriormente mencionado, esta ligação é muito comum em paredes mistas madeira-alvenaria em edifícios pombalinos.

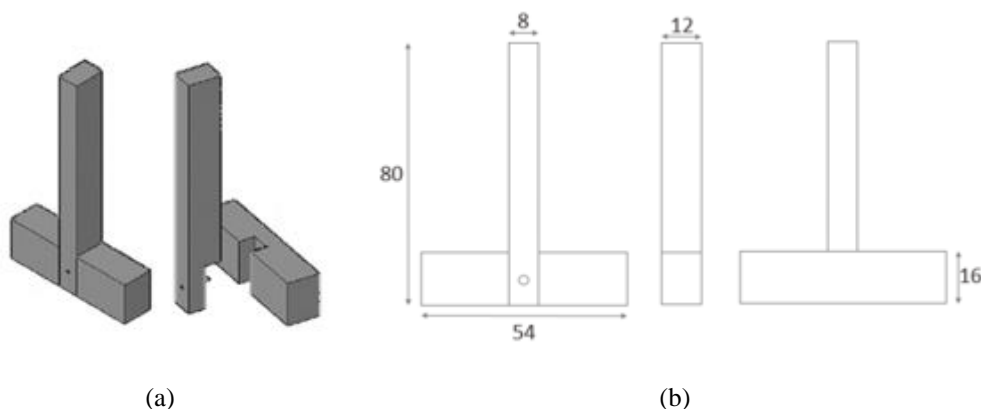


Figura 3.6 - Ligação meia-madeira: a) Geometria da ligação meia-madeira e do prego. (Poletti, 2013); b) Esquema da ligação meia-madeira (dimensões em cm).

No total consideraram-se 10 ligações (Tabela 3.6): (1) 2 ligações não reforçadas que não foram sujeitas a ensaios de envelhecimento (REF-NR); (2) 3 ligações reforçadas que não foram sujeitas a ensaios de envelhecimento (REF-R); (3) 2 ligações não reforçadas sujeitas a ciclos de aspersão de água e subsequente secagem (CHU-NR); (4) 3 ligações reforçadas sujeitas a ciclos de aspersão de água e subsequente secagem (CHU-R). O reforço foi efetuado com fibras de vidro (*Glass Fiber Reinforced Polymer – GFRP*) e posteriormente está descrita a sua aplicação.

Tabela 3.6 – Descrição do nº de ligações e das condições de ensaio.

<b>Número de ligações</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição</b>
<b>3</b>	REF-R	Ligações reforçadas de referência
<b>2</b>	REF-NR	Ligações não reforçadas de referência
<b>3</b>	CHU-R	Ligações reforçadas envelhecidas a chuva
<b>2</b>	CHU-NR	Ligações não reforçadas envelhecidas a chuva

Antes das ligações serem submetidas a qualquer envelhecimento foram caracterizadas através da inspeção visual, foi feita a medição das suas dimensões e foram pesadas. Foi também medido o teor de humidade,

#### **i. Inspeção visual**

Tal como foi feito para os provetes pequenos (#1) também as ligações foram alvo de inspeção visual inicial cujo resultado foi registado em relatórios de inspeção onde, além da informação relativa a defeitos (nós e fendas), também está apresentada a distância entre os elementos (viga e prumo). Também foi medido o teor de humidade inicial de cada ligação em vários pontos (A a D), como apresentado na Figura 3.7 (a). Estas medidas foram efetuadas com o auxílio de um higrómetro, o qual possui tabelas que permitem converter o valor experimental lido para o real valor de teor de humidade da madeira em análise (Figura 3.7 (b)).

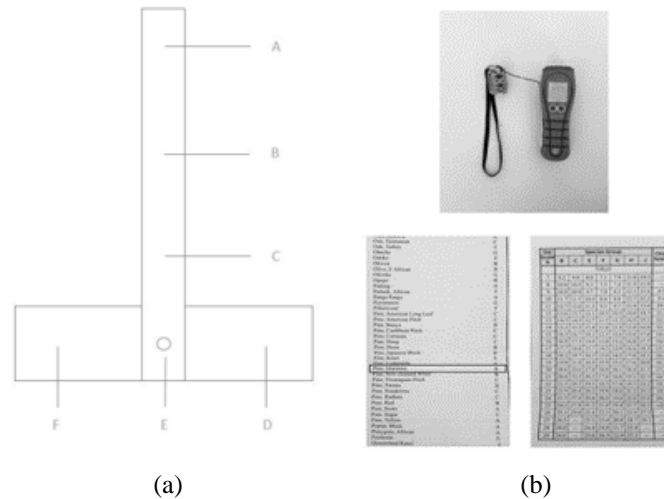


Figura 3.7 – (a) Esquema ilustrativo dos pontos onde foi medido o teor de humidade com o higrómetro; (b) Higrómetro e tabelas de conversão dos valores obtidos consoante a espécie da madeira.

## ii. Reforço das ligações

Como já referido, das dez ligações efetuadas, quatro são não reforçadas e as outras seis foram reforçadas utilizando fibra de vidro (GFRP). Os reforços foram feitos nos dois lados da ligação como está indicado na Figura 3.8.

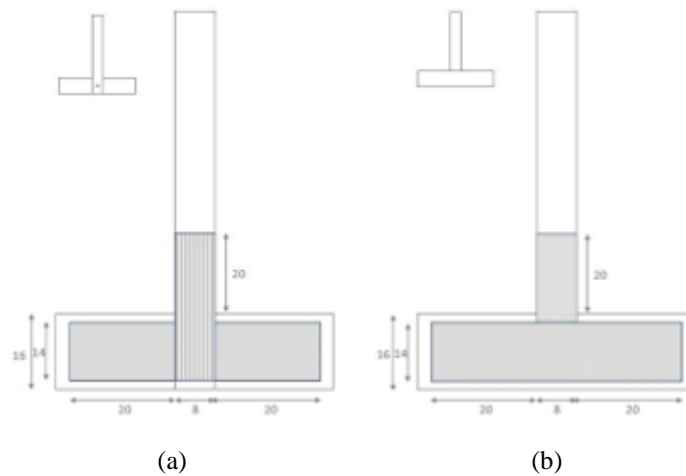


Figura 3.8 - Figura ilustrando os sítios onde foi efetuado o reforço assim como a orientação das fibras do tecido de reforço utilizado (unidades em cm). (a) Vista frontal (lado em que se vê o parafuso); (b) Vista posterior (lado em que não se vê o parafuso)

O tecido de fibra de vidro utilizado é unidirecional. O reforço foi efetuado colando duas folhas de fibra ortogonais de cada lado: uma primeira folha une os elementos descontínuos da ligação e uma segunda folha é colocada perpendicularmente à primeira e sobre esta para melhorar a ancoragem da primeira fibra. O objetivo é que as fibras impeçam tanto o levantamento (*uplift*) do elemento vertical como a deformação para fora do plano da ligação. Para que o reforço seja eficaz, a orientação das fibras das folhas e a ordem porque são colocadas são importantes, como ilustrado na Figura 3.8. No lado do parafuso, como as descontinuidades são verticais coloca-se

primeiro uma folha com as fibras no sentido horizontal. No lado oposto ao parafuso, porque a descontinuidade é horizontal, coloca-se primeiro uma folha com as fibras no sentido vertical. Simplificadamente os passos para o reforço são os seguintes:

**Passo 1:** cortar a fibra de vidro. Neste trabalho as dimensões utilizadas foram de 48 x 14 cm<sup>2</sup> e de 36 x 8 cm<sup>2</sup>.

**Passo 2:** limpar as folhas de fibra de vidro com acetona.

**Passo 3:** preparar a superfície da madeira usando uma lixa de forma limpar a superfície e ajudar a aderência da cola epoxy.

**Passo 4:** limpar o pó acumulado na superfície da superfície de madeira com um pincel

**Passo 5:** preparar a cola epoxy “Mapei Mapewrap 31”: A cola epoxy foi preparada de acordo com as instruções do comerciante: para cada porção da componente A é necessário misturar  $\frac{1}{4}$  da componente B. Antes de colocar tanto a componente A como a B, estas devem ser uniformizadas e agitadas. As duas componentes são então bem misturadas até obter uma mistura com consistência homogénea. A cola epoxy tem de ser usada enquanto ainda se encontra líquida.

**Passo 6:** colar as fibras à madeira.

**Passo 7:** secagem do reforço durante 7 dias.

### 3.4. Esquemas dos ensaios de envelhecimento

#### 3.4.1. Ciclos de imersão e secagem (CHL)

O envelhecimento com base em ciclos de imersão e secagem em estufa foi efetuado com base no procedimento anteriormente apresentado. O esquema de ensaio para a fase de imersão dos provetes encontra-se indicado na Figura 3.9. A temperatura da água foi controlada através de um controlador de temperatura (número 1 da Figura 3.9) de forma a manter a água a 55 °C. É importante referir que foi utilizada água destilada neste processo de envelhecimento de forma evitar a presença de elementos químicos ou biológicos que pudessem afetar os ensaios. Os motores de aquário (número 5 da Figura 3.9) têm como objetivo a uniformização da temperatura em todo o volume de água dentro da caixa. A resistência ligada diretamente à corrente (número 3 da Figura 3.9) serviu apenas para acelerar o processo de aquecimento, ou seja, reduzir o tempo de aquecimento. Quando a temperatura atinge os 55 °C, esta ligação é desligada. A fase de secagem foi efetuada por colocação dos provetes numa estufa a 105 °C. Estas fases são as descritas na Tabela 3.2.

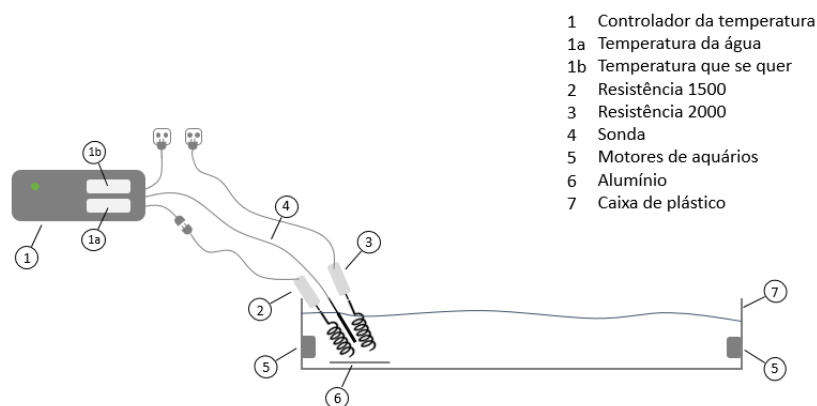


Figura 3.9 - Esquema representativo do esquema de ensaio na fase de imersão no envelhecimento acelerado

### i. Provetes sem tratamento nos topos

Numa primeira fase, foram submetidos aos ciclos de imersão/secagem 21 provetes para posteriormente serem ensaiados à compressão na direção paralela às fibras (0) e 21 provetes para serem ensaiados à compressão na direção perpendicular às fibras (90). Com o objetivo de avaliar o efeito do número de ciclos de envelhecimento (Tabela 3.7) decidiu-se retirar provetes para ensaio no final de 3, 6 e 12 ciclos.

No final de cada ciclo os provetes foram pesados e fotografados. No final de cada conjunto de ciclos (3, 6 e 12) foi realizada uma inspeção visual aos provetes sendo posteriormente colocados numa câmara climática até estabilizarem.

Tabela 3.7 - Resumo do número de ciclos e de provetes usados no envelhecimento CHL

Nº de ciclos	Tipo de provetes	Nº de provetes
3	0	7
	90	7
6	0	7
	90	7
12	0	7
	90	7

### ii. Provetes com topos impermeabilizados

Com o objetivo de avaliar o efeito da impermeabilização dos topos no processo de envelhecimento, foram submetidos aos ensaios de imersão/secagem 20 provetes, sendo 10 provetes para ensaiar em compressão paralela às fibras (0-I) e 10 provetes para ensaios em compressão perpendicular às fibras (90-I). Neste conjunto de provetes 10 provetes foram submetidos a 3 ciclos e 10 provetes foram submetidos a 12 ciclos (Tabela 3.8.) Optou-se, devido

ao menor número de provetes disponíveis, e tentando obter dados estatísticos, por seleccionar os ensaios de envelhecimento com menor e maior número de ciclos, para poder comparar com os provetes sem impermeabilização nos topos.

Tabela 3.8 - Resumo do número de ciclos e de provetes usados no envelhecimento CHL-I

<b>Nº de ciclos</b>	<b>Tipo de provetes</b>	<b>Nº de provetes</b>
<b>3</b>	0	5
	90	5
<b>12</b>	0	5
	90	5

#### 3.4.2. Envelhecimento através de ciclos de imersão/secagem com temperaturas alteradas (CHL-TR)

As condições de ensaio de envelhecimento por imersão/secagem com alteração das temperaturas da água e da estufa são as mesmas das utilizadas nos ensaios com as temperaturas de referência. Neste caso, a temperatura da água foi fixada em 30 °C e a temperatura de secagem foi fixada em 80. Neste tipo de envelhecimento foram realizadas as etapas descritas na Tabela 3.3 em 20 provetes pequenos com os topos impermeáveis, metade para serem ensaiados à compressão paralela às fibras (0-I) e a outra metade à compressão perpendicular às fibras (90-I). Da mesma forma que na situação descrita anteriormente, optou-se por 2 grupos em termos de número de ciclos de envelhecimento usado, nomeadamente 3 e 12 ciclos (Tabela 3.9).

Tabela 3.9 - Resumo do número de ciclos e de provetes usados no envelhecimento CHL-TR.

<b>Nº de ciclos</b>	<b>Tipo de provetes</b>	<b>Nº de provetes</b>
<b>3</b>	0	5
	90	5
<b>12</b>	0	5
	90	5



### 3.4.3. Envelhecimento com base em ciclos de molhagem por aspersão e secagem (CHU)

Com o objetivo de simular uma condição extrema de exposição da madeira a períodos prolongados de chuva e secagem foi utilizado um esquema de ensaio diferente. O procedimento de ensaio usado foi semelhante ao esquema utilizado por Isupescu (2016) para o ensaio de ligações de madeira. Para os provetes pequenos foi necessário definir um outro sistema de aspersão e suporte dos provetes. Para simular estes envelhecimentos foram utilizados 3 tanques IBC de 1000 l de volume, como ilustrado na Figura 3.10 e na Figura 3.11.

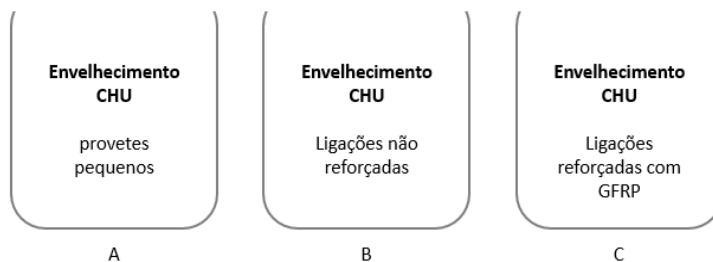


Figura 3.10 - Resumo dos propósitos dos 3 tanques utilizados para o envelhecimento CHU.



Figura 3.11 - Fotografia dos três tanques utilizados para o envelhecimento CHU

Para o envelhecimento dos provetes pequenos, foi construída uma estrutura (número 4 da Figura 3.12) com 9 aspersores que projetam a água na direção vertical. Foi também executada uma base de suporte dos provetes colocada sob os aspersores. Para a fase de secagem foram colocados 2 aquecedores em cantos opostos do reservatório e uma ventoinha para manter o ar em movimento e promover a uniformização da temperatura na zona envolvente dos provetes. A circulação de água do fundo do tanque para os aspersores foi feita com o auxílio de uma bomba de água. Na extremidade do tubo está ligada a bomba e na tubagem de circulação de água foi colocado um filtro para garantir que os aspersores não ficassem obstruídos. A Figura 3.12 ilustra um esquema representativo dos pontos principais do dispositivo de ensaio.

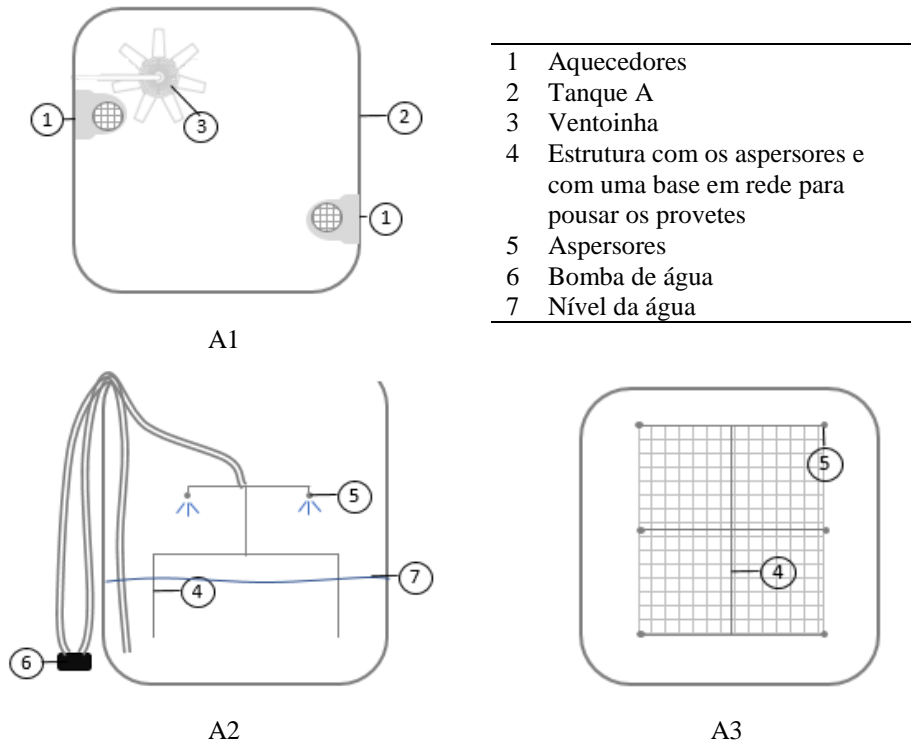


Figura 3.12 - Esquema do tanque relativo ao envelhecimento CHU dos provetes pequenos. A1 – vista superior da localização das ventoinhas e dos aquecedores; A2 – vista lateral da estrutura 4; A3 – Vista superior da estrutura 4.

Para os ensaios de envelhecimento das ligações o esquema de ensaio é equivalente ao anterior, variando apenas no número e na posição em que os aspersores são ligados (Figura 3.13). Para estes ensaios de envelhecimentos são apenas usados 3 aspersores, um para cada ligação e estes são posicionados de forma que o jato de água seja lançado numa direção inclinada (simulação de chuva com vento – *wind driven rain*). Nestes ensaios, as ligações foram colocadas em cima de pedras de granito de forma a não ficarem submersas. O sistema hidráulico possui uma válvula que permite aumentar ou diminuir a pressão da água.

O teste de envelhecimento realizou-se durante 2 meses seguindo os ciclos descritos na Tabela 3.4. Na etapa representativa da chuva, os aspersores são ligados durante 4 horas seguindo-se a fase de secagem com a ativação das ventoinhas e dos aquecedores. O controlo dos ciclos foi feito com temporizadores digitais.

Como já referido, nas estruturas reais, normalmente as extremidades da madeira não estão em contacto com água. Por isso, de forma a representar melhor a realidade, decidiu-se colocar uma tinta impermeável nas extremidades das ligações e dos provetes pequenos. Na Figura 3.14 encontram-se esquematizadas as zonas onde foi colocada a tinta impermeável.

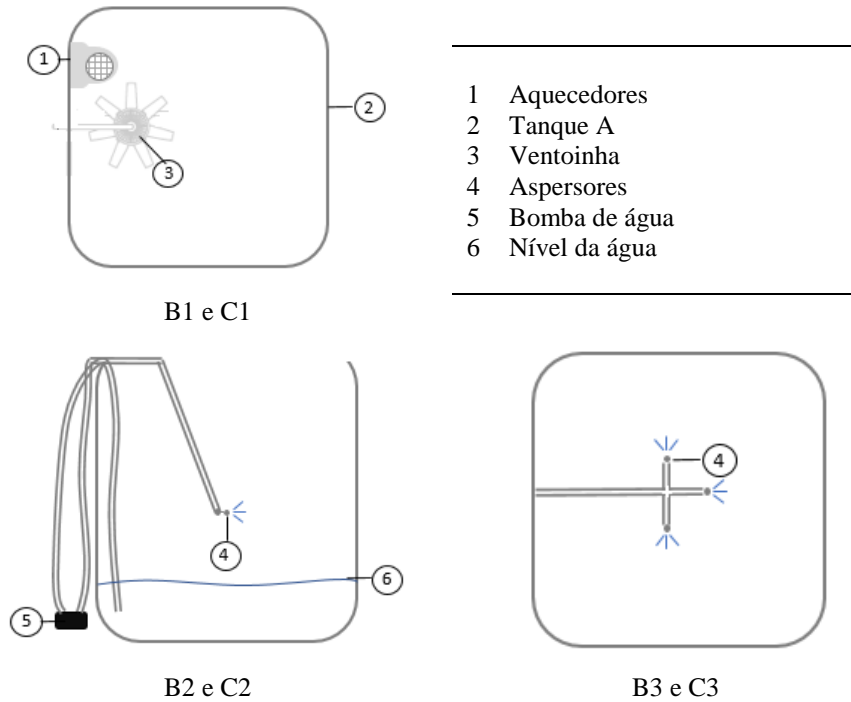


Figura 3.13 - Esquema do tanque relativo ao envelhecimento CHU das ligações. B1 e C1 – vista superior da localização da ventoinha e do aquecedor; B2 e C2 – vista lateral da localização dos aspersores; B3 e C3 – Vista superior da localização dos aspersores.

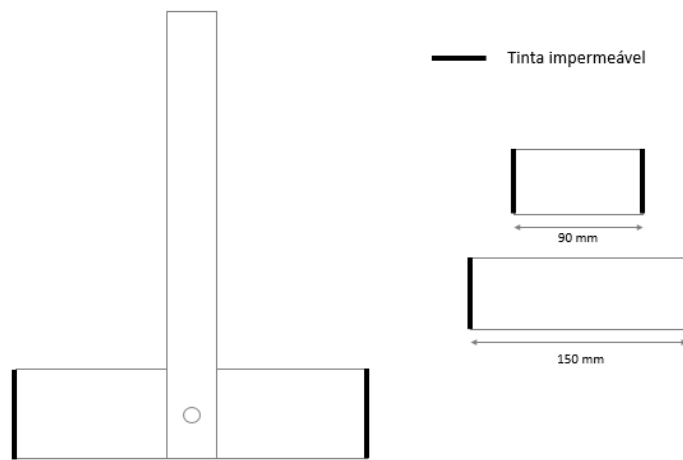


Figura 3.14 - Zonas onde foi colocada a tinta impermeável.

Também é importante referir que nas ligações, quando se encontram numa estrutura mista madeira-alvenaria, existem zonas não diretamente expostas à água da chuva. Assim, de forma a representar o preenchimento com alvenaria foi colocada uma placa de plástico nas zonas que estão representadas na Figura 3.15, admitindo uma margem de 1 cm dos bordos.

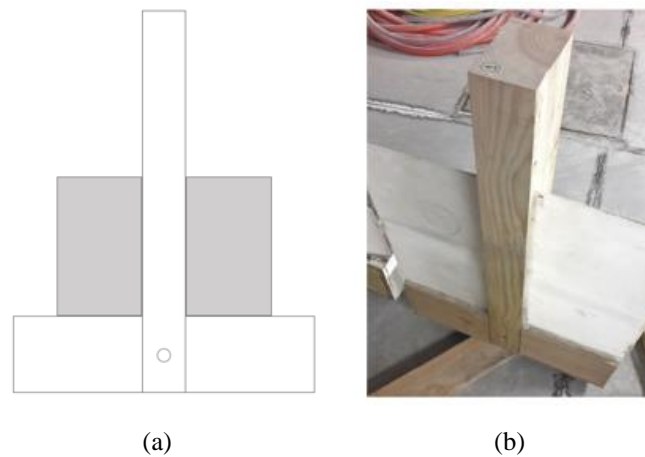


Figura 3.15 -Placa de plástico a representar o preenchimento de uma *timber-frame*: (a) Esquema da localização das placas de plástico; (b) Fotografia de uma ligação com as placas de plásticos.

Para monitorizar a temperatura foram colocadas 5 sondas nos reservatórios com a distribuição indicada na Figura 3.16. O sensor 1 indica a temperatura do tanque A, o sensor 2 mede a temperatura ambiente na vizinhança dos tanques, o sensor 3 mede a temperatura no tanque C e os sensores 4 e o 5 situam-se dentro do tanque B: o sensor 4 está à frente de uma ligação e o sensor 5 está atrás dos aspersores.

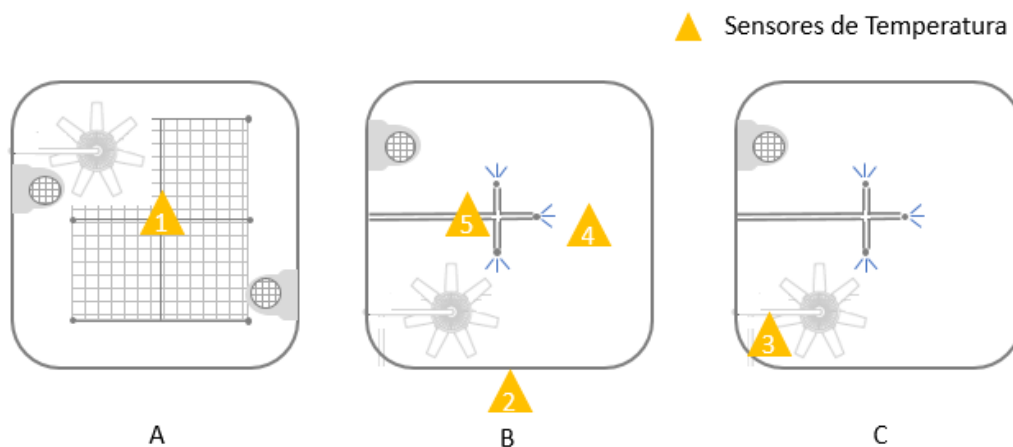
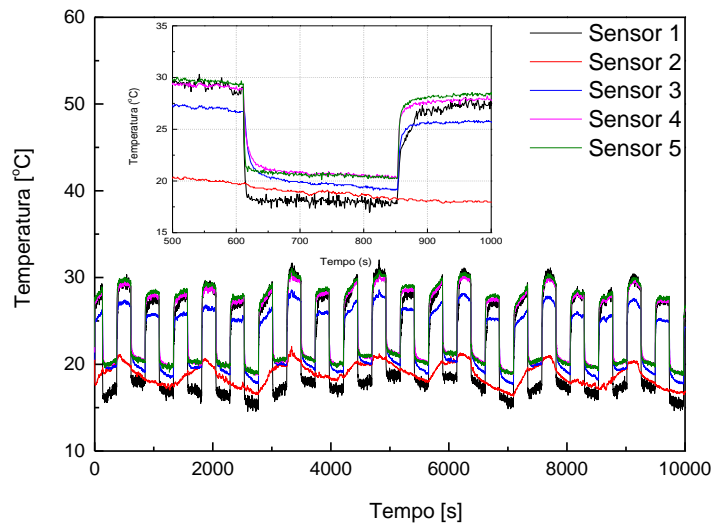


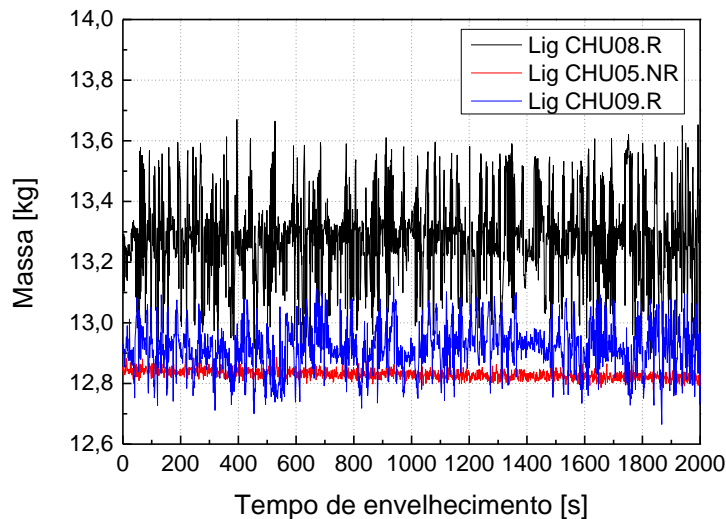
Figura 3.16 - Esquema representativo da localização dos cinco sensores de temperatura nos *set-up* CHU.

Na Figura 3.17 (a) apresenta-se o registo da temperatura medida pelos diferentes sensores em função do tempo, verificando-se que a temperatura ambiente fora dos tanques (sensor 2) apresentou uma variação entre 17°C e 21°C, enquanto dentro dos tanques a temperatura variou de forma cíclica (de 4 em 4h) entre 15°C e 30°C. Esta variação corresponde às etapas do processo de envelhecimento. Dos dados apresentados pode-se também concluir que a temperatura nos 3 tanques é aproximadamente a mesma, à exceção da temperatura registada pelo sensor 3 (colocado no canto do tanque C) que não atinge nem o valor máximo nem o mínimo atingido pelos outros sensores.

Ao longo do envelhecimento também foram colocadas 3 células com o objetivo de analisar a variação do peso das ligações ao longo dos ciclos de aspersão e secagem. No gráfico da Figura 3.17 (b) está representada esta variação. É possível verificar que as ligações reforçadas têm uma variação superior ( $\sim 0,5-0,6$  kg) de peso comparando com a ligação não reforçada ( $\sim 0,1$  kg) isto porque o reforço tem uma alta absorção de água.



(a)



(b)

Figura 3.17 – Controle de propriedades ao longo do envelhecimento por aspersão e secagem: (a) Variação da temperatura ambiente medida através dos sensores de temperatura; (b) variação do peso das ligações.

### 3.5. Inspeção visual após o envelhecimento

#### 3.5.1. Inspeção após ciclos de imersão-secagem

Após o envelhecimento de cada conjunto de ciclos (3, 6 e 12) foi realizada uma inspeção visual aos provetes retirados de forma a identificar os efeitos gerados pela degradação/envelhecimento. É importante realçar que cada ciclo é composto por 4 etapas, e que neste trabalho os provetes foram submetidos a 3, 6 e/ou 12 ciclos. Tanto para o envelhecimento acelerado CHL (sem topos impermeáveis) como para CHL-I (com topos impermeáveis) como para CHL-TR as conclusões obtidas depois da inspeção visual após o envelhecimento foram semelhantes. Desde o primeiro ciclo que foi possível observar os efeitos do envelhecimento através do aparecimento de fendas, resina a sair e deformações físicas da amostra, ver Figura 3.18. No final da primeira etapa do 1º ciclo, que consiste na imersão dos provetes em água, foi possível verificar a absorção de água que provocou uma mudança de cor e o aumento de volume da madeira. As fissuras desenvolveram-se particularmente na fase de secagem, sendo também visível a perda de resina e a deformação.



Figura 3.18 – Fotografias dos diferentes tipos de degradação detetadas após o primeiro ciclo de envelhecimento acelerado CHL. (a) Saída de resina; (b) e (c) fissuras; (d) instabilidade dimensional.

Na Figuras seguintes encontram-se algumas imagens de provetes para diferentes ciclos ao longo do envelhecimento dos provetes onde é visível: (1) o aparecimento e/ou agravamento de fendas (Figuras 3.19 e 3.20); (2) a deformação do provete (Figura 3.21); (3) a saída de resina (Figura 3.22) e (4) a alteração de cor da madeira (Figura 3.23). O facto de os provetes sofrerem sucessivas ações de molhagem e secagem (agressivas) origina deformações significativas como ilustrado na Figura 3.21. A saída de resina também foi bastante frequente, tendo-se verificado que era mais comum haver saída de resina em provetes que possuíam nós.

A Figura 3.24 mostra claramente que as fendas foram criadas logo após o primeiro ciclo, e que os ciclos seguintes apenas as agravaram, aumentando de tamanho e de abertura.

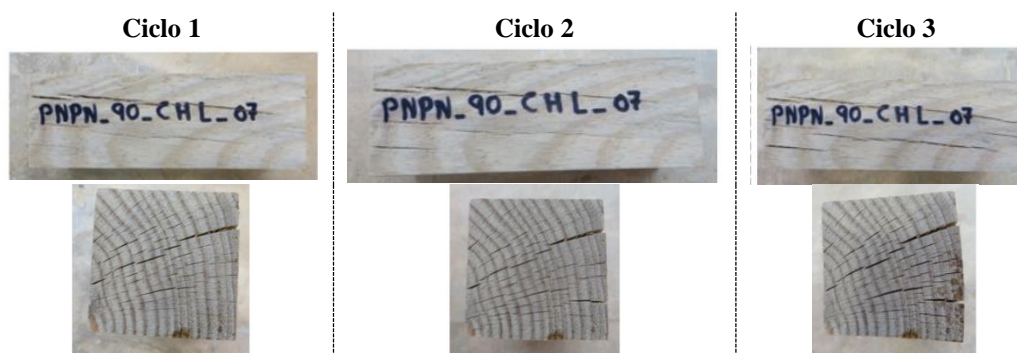


Figura 3.19 - Fotografias do envelhecimento acelerado CHL durante 3 ciclos.



Figura 3.20 - Fotografias do envelhecimento acelerado CHL durante 12 ciclos.

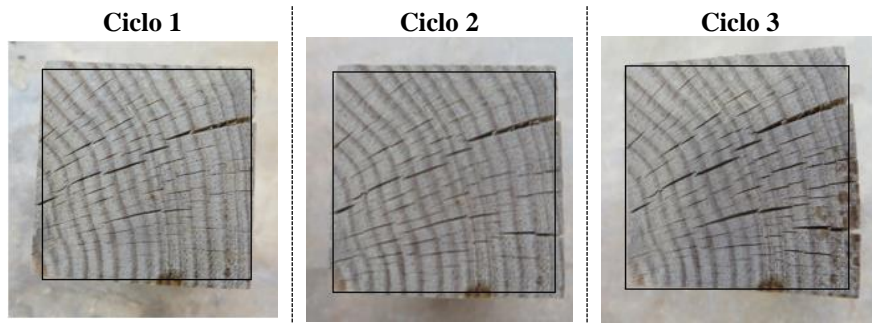


Figura 3.21 - Deformação do provete 07 durante o seu envelhecimento acelerado CHL

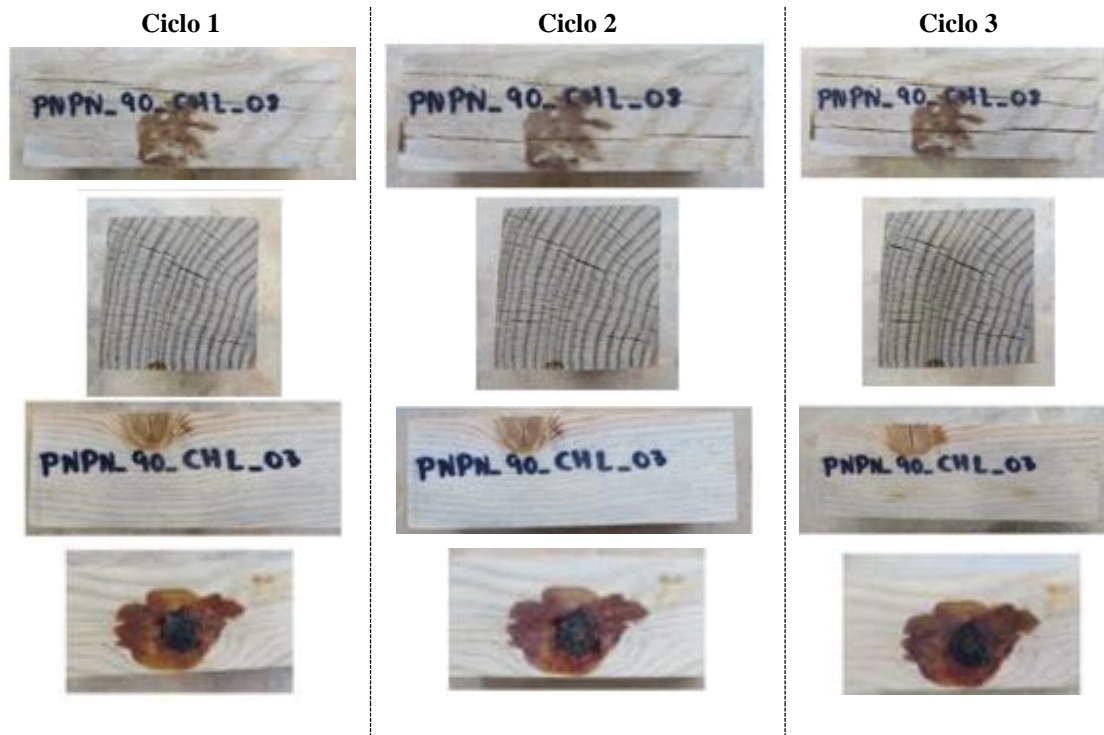


Figura 3.22 - Fotografias de dois exemplos de envelhecimento CHL com saída de resina.

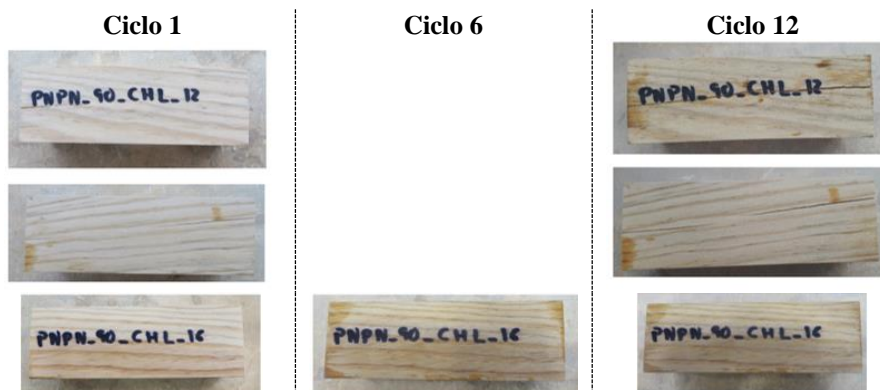


Figura 3.23 - Fotografias demonstrativas da mudança de cor que ocorre durante o envelhecimento CHL dos provetes.



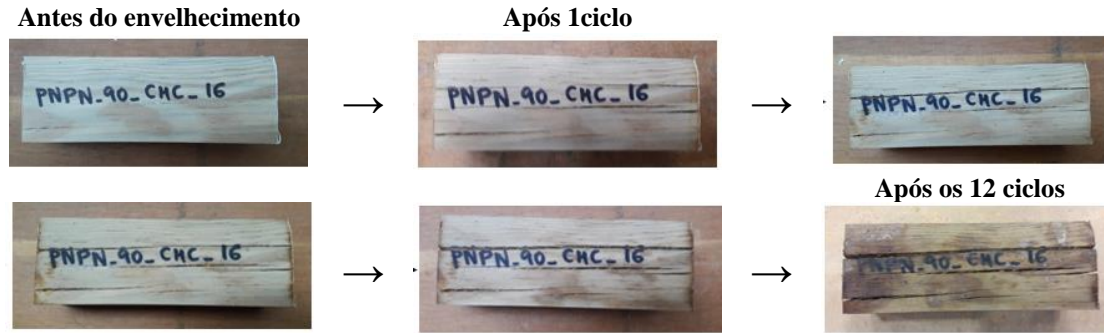


Figura 3.24 - Envelhecimento dos provetes 90 submetidos ao envelhecimento CHL-I.

### 3.5.2. Provetes do tipo CHU

Tanto para os provetes pequenos (#1) como para as ligações (#2) foi feita uma inspeção visual antes e após o envelhecimento. De seguida estão descritos os diferentes defeitos/índices de envelhecimento que foram encontrados ao longo do processo de envelhecimento acelerado CHU juntamente com algumas fotografias demonstrativas do mesmo.

#### i. Inspeção visual dos provetes pequenos

Depois de 2 meses de envelhecimento acelerado do tipo CHU verificaram-se nos provetes pequenos o aparecimento de várias fissuras, variação de dimensões/deformações e em alguns provetes foi visível o efeito do ataque de fungos. Todos estes defeitos foram aumentando com o tempo de envelhecimento. Na Figura 3.25 encontram-se alguns exemplos de defeitos encontrados nos provetes.

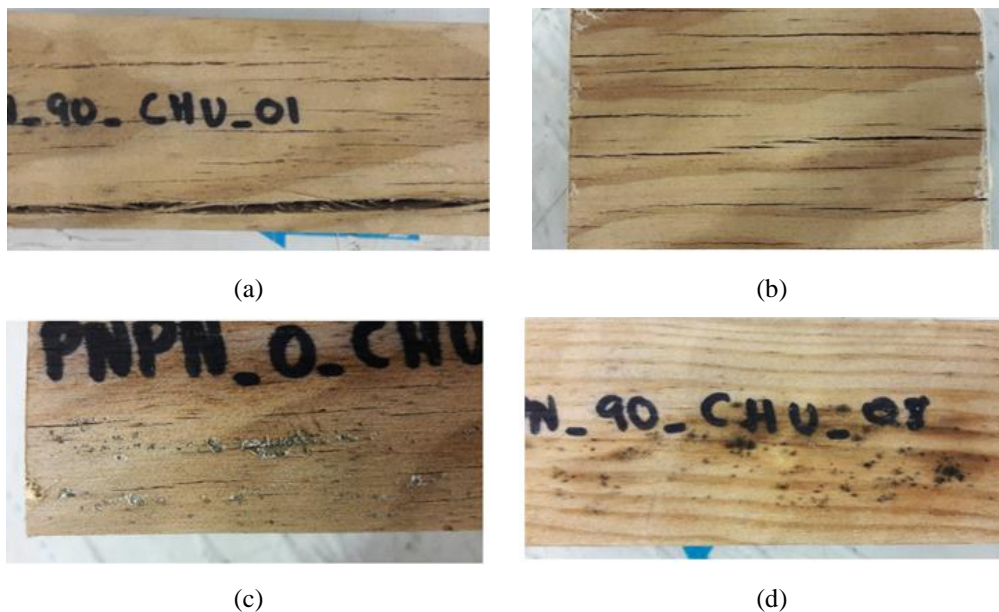


Figura 3.25 - Defeitos encontrados nos provetes pequenos que sofreram envelhecimento CHU: (a) e (b) fissuras, (c) e (d) ataque de fungos.

De seguida estão algumas fotografias que mostram o desenvolvimento dos defeitos ao longo dos 2 meses. Por exemplo, a Figura 3.26 ilustra a evolução das fendas que apareceram no provete PNP<sub>N</sub>\_90\_CHU\_02. Num mês, para além de aumentar a quantidade de fissuras também aumentou a largura e profundidade das mesmas. O mesmo comportamento foi verificado no provete PNP<sub>N</sub>\_0\_CHU\_01 (Figura 3.17) e no provete PNP<sub>N</sub>\_90\_CHU\_01 (Figura 3.28). Neste último provete também é visível o efeito do ataque de fungos.

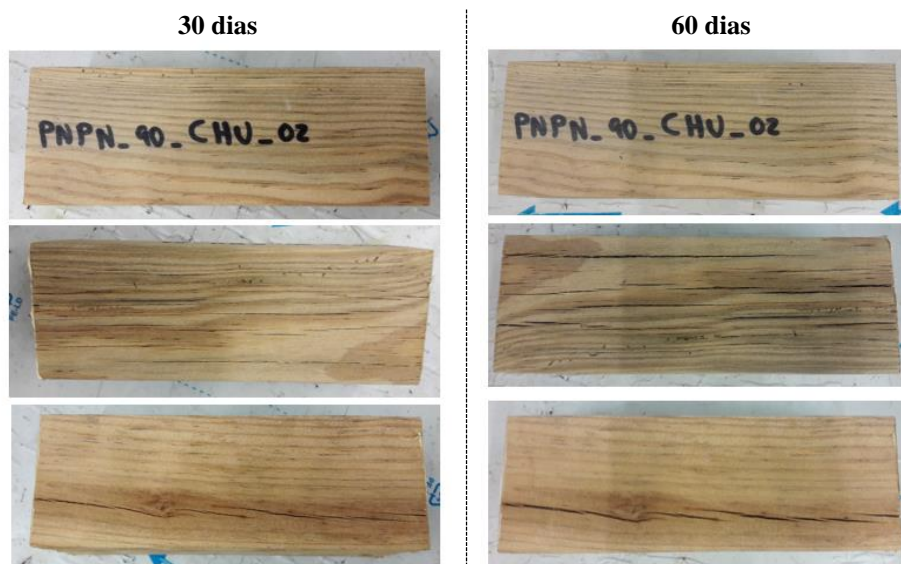


Figura 3.26 - Fotografias do envelhecimento do provete 90\_CHU\_02 submetido ao envelhecimento CHU.



Figura 3.27 - Fotografias do envelhecimento do provete 0\_CHU\_01 submetido ao tipo de envelhecimento CHU.

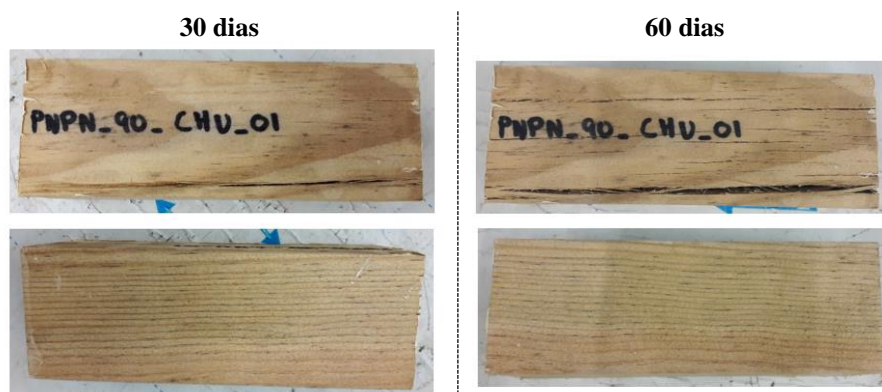


Figura 3.28 - Fotografias do envelhecimento do provete 90\_CHU\_02 submetido ao envelhecimento CHU.

## ii. Inspeção visual das ligações

Relativamente às ligações, também foi feita uma inspeção visual, onde se verificou essencialmente o aparecimento de fendas e a alteração da cor da madeira. Para além de uma inspeção visual, as ligações também foram pesadas.

A Figura 3.29 ilustra a parte da ligação voltada para os aspersores, antes e após o envelhecimento. Na Figura 3.29 (a) e (b) é visível a alteração da cor da madeira, principalmente no prumo que era a zona mais atingida pela água. Na Figura 3.29 (c) e (d) pode observar-se a variação dimensional da viga e do prumo, pelo aumento da distância entre as peças. Na parte de trás desta ligação (parte que não foi atingida diretamente com água), cujas fotografias estão apresentadas na Figura 3.30 verifica-se não houve uma alteração tão acentuada da cor da madeira. No entanto, verifica-se o aparecimento de várias fissuras horizontais na viga. Comportamentos semelhantes em outras ligações são visíveis nas Figuras 3.31 e 3.32.

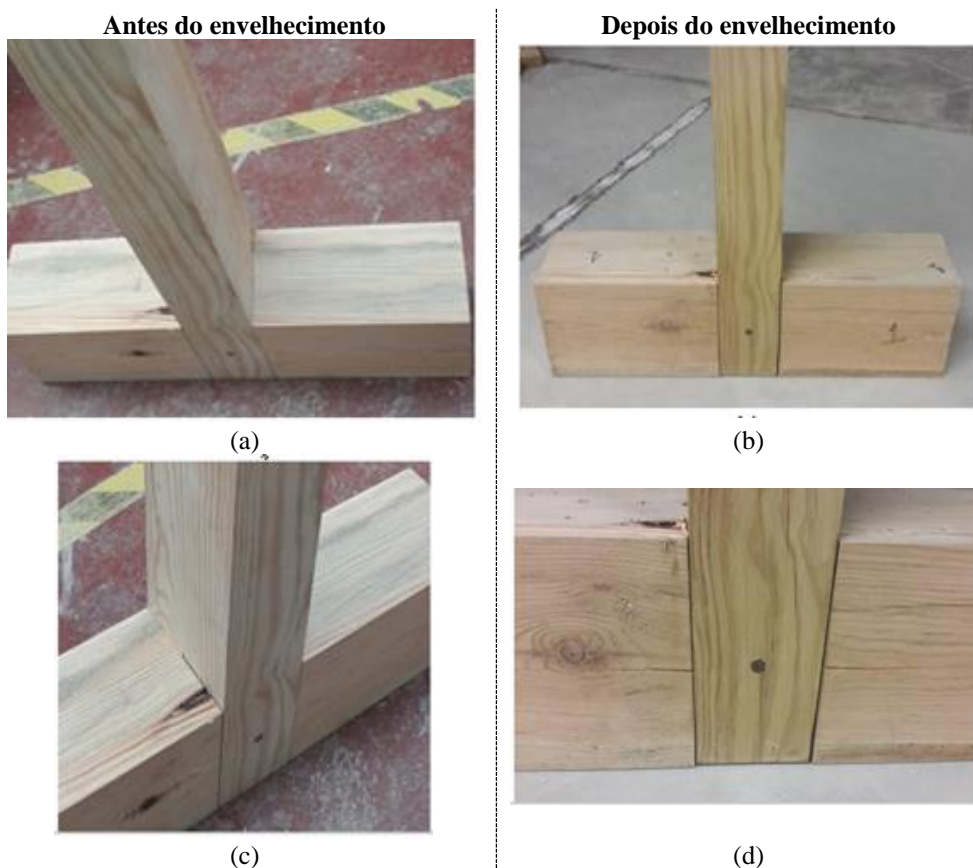


Figura 3.29 - Comparação da ligação 1 antes e após o envelhecimento CHU.

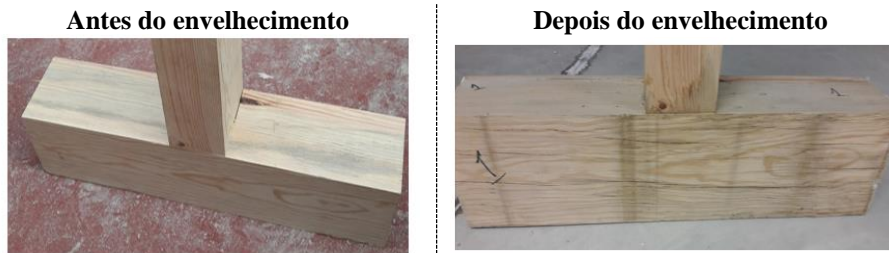


Figura 3.30- Comparação da ligação 1 (parte de trás) antes e após o envelhecimento CHU



Figura 3.31 - Comparação da ligação 2 antes e após o envelhecimento CHU.

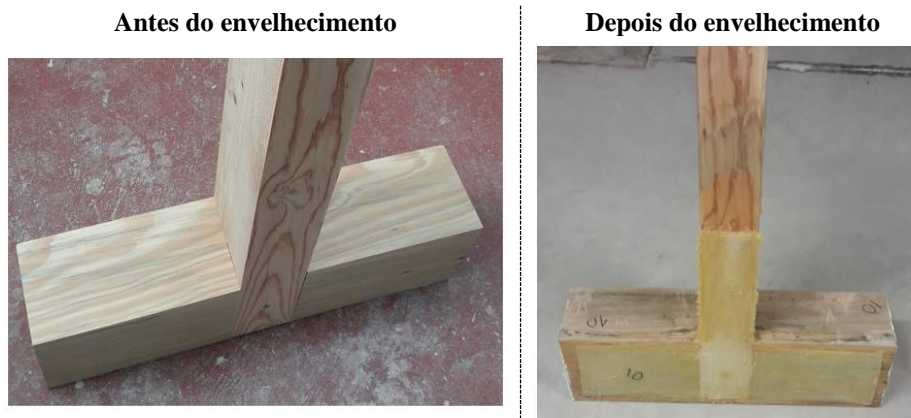


Figura 3.32 - Comparação da ligação 3 antes e após o envelhecimento CHU

Após os dois meses de envelhecimento, tanto os provetes como as ligações foram estabilizados através de uma secagem acelerada mas sem induzir danos, com o auxílio de secadores e de ventoinhas. Este processo de estabilização foi avaliado sendo registado diariamente o peso dos provetes/ligações, o teor de humidade externo e interno e a velocidade das ondas sonoras. O teor de humidade foi registado apenas para as ligações.

### 3.6. Avaliação do teor de humidade

O teor de humidade foi avaliado na parte externa da ligação nos pontos representados na Figura 3.33. Para as ligações reforçadas apenas foi medido o teor de humidade nos pontos G, H, I, J visto que os restantes pontos não são acessíveis devido à presença do reforço.

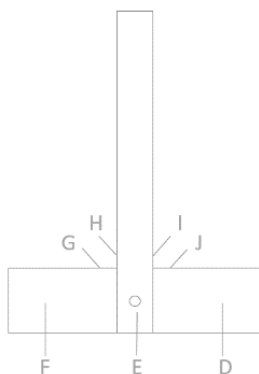
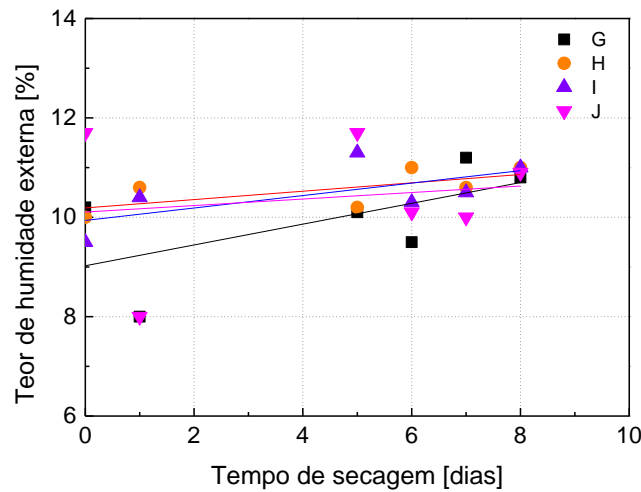
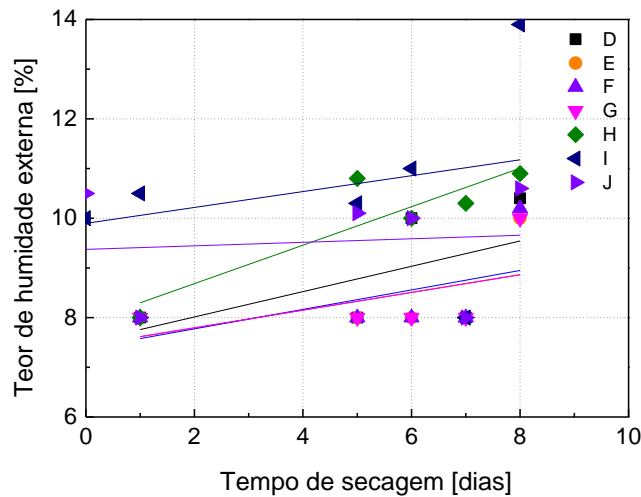


Figura 3.33 - Esquema dos pontos onde foi medido o teor de humidade externo das ligações após o seu envelhecimento.

De seguida encontram-se alguns exemplos representativos da evolução do teor de humidade com o tempo de secagem. De acordo com o gráfico da Figura 3.34, os valores de humidade tendem a convergir para um ponto comum ( $\approx 12\%$ ). Este comportamento deve-se ao facto de a superfície da madeira tender a atingir o equilíbrio com a atmosfera envolvente. A grande dispersão observada nos valores do teor de humidade deverá estar associada ao facto de, durante o processo de secagem, haver transporte de água do interior para o exterior da peça o que dificulta o equilíbrio superficial da madeira.



(a)



(a)

Figura 3.34 - Variação do teor de humidade (externa) em função dos dias de secagem: (a) Ligação reforçada; (b) Ligação não reforçada. As letras correspondem aos pontos de medida da Figura 3.33.

Durante o processo de secagem foi também medido o teor de humidade interno das ligações utilizando as sondas de profundidade do higrómetro. Para tal foram realizados furos com 5 cm de profundidade e 3 mm de diâmetro na viga da ligação de acordo com o esquema indicado na Figura 3.35 nos quais foi medida a humidade com o higrómetro. Entre medições os furos foram tapados com papel para reduzir/evitar a evaporação da água através desse orifício.

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 3.36 para uma das ligações, onde se verifica que o valor do teor de humidade interno em função do tempo de secagem nos diversos pontos apresenta comportamentos diferenciados. Estes resultados parecem demonstrar que o processo de secagem não é uniforme e que não deverá estar completo no período de tempo testado, uma vez que o aumento da humidade em alguns pontos pode indicar que o processo de evaporação

de água de dentro para fora ainda se encontra ativo. Através do cálculo da densidade das ligações verificou-se que mesmo após 2 semanas de secagem estas ainda se encontravam húmidas o que justifica a variabilidade de resultados obtidos.



Figura 3.35 – Localização dos furos feitos para a medição do teor de humidade interno.

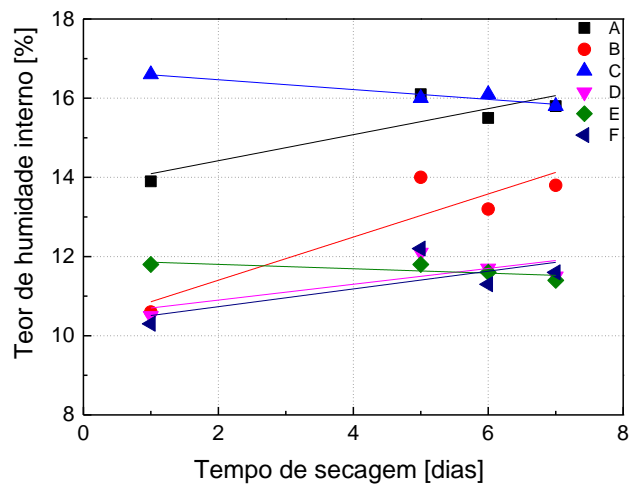
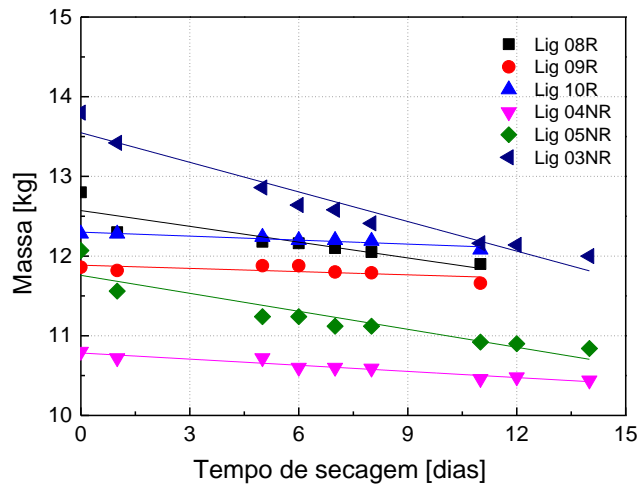


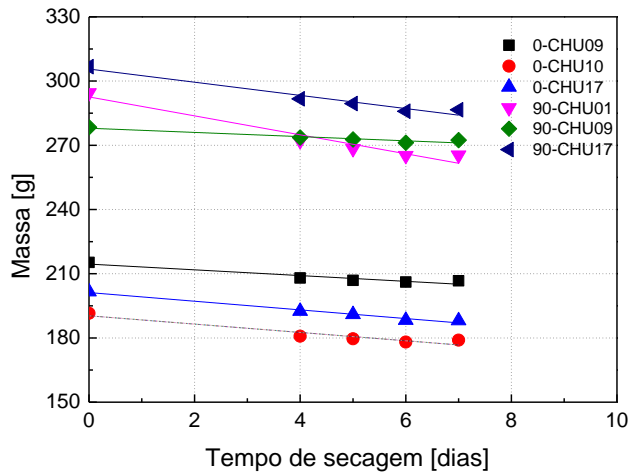
Figura 3.36 – Variação do teor de humidade interno em função do tempo de secagem para uma ligação.

### 3.7. Evolução do peso e da velocidade de ultrassons

Com o objetivo de avaliar a evolução do peso durante o processo de secagem, foram efetuadas pesagens diárias das ligações e dos provetes pequenos. Na Figura 3.37 estão representados dois gráficos que mostram os resultados obtidos. É possível observar que como seria de esperar o peso diminui à medida que a secagem dos provetes se desenvolve, que resulta da perda de água, com menor dispersão de valores relativamente à obtida na leitura direta do teor de humidade.



(a)



(b)

Figura 3.37 - E evolução da massa durante o processo de secagem: a) das ligações – R: reforçadas e NR: não reforçadas; b) dos provetes pequenos

Por outro lado, parece que a perda de água é também mais acentuada nas ligações não reforçadas (~0,02-0,12 g/dia), o indica uma taxa de secagem mais rápida em relação aos provetes reforçados (~0,004-0,007 g/dia).

Nos provetes pequenos também se verifica uma alteração na taxa de secagem de 1.3-2.0 para 1.0-4.4 g/dia para, respetivamente, os provetes a ser ensaiados à compressão paralela às fibras (0°) e perpendicular às fibras (90°). A maior taxa de secagem tendencial nos provetes de 90° pode ser justificada pela sua menor seção transversal. A taxa de secagem média das ligações (#2) é menor do que a dos provetes pequenos (#1) o que deverá estar associado às maiores restrições nas superfícies de contacto direto com a atmosfera nas ligações.



Adicionalmente, foi medida a velocidade de propagação de ultrassons durante o processo de secagem das ligações nos cinco pontos indicados na Figura 3.38: (a) dois, para medir a velocidade que demora a onda a percorrer a viga, um do lado direito (ponto 2) e outro do lado esquerdo do prumo (ponto 1); (b) outro ponto na zona do parafuso para detetar se existia separação entre a viga e o prumo (ponto 3); (c) os outros dois pontos localizados no prumo (ponto 4 e ponto 5).



Figura 3.38 - Esquema dos pontos onde foi retirada a velocidade de ondas ultrassom.

Na Figura 3.39 apresenta-se um exemplo dos resultados obtidos, onde se apresenta o comportamento da velocidade das ondas sonoras em função do tempo de secagem de uma ligação nos pontos referidos anteriormente. O comportamento observado está de acordo com o que foi apresentado por Michael Ramage *et al.* (2016) e F. Feeney *et al.* (1998), isto é, verifica-se que à medida que o teor de humidade diminui, a velocidade das ondas aumenta.

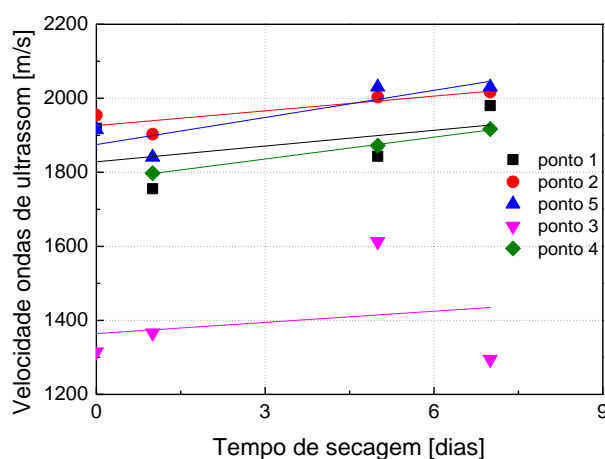


Figura 3.39 - Variação da velocidade do ultrassom na ligação 6 com o tempo de secagem.

A velocidade das ondas de ultrassom também foi medida nos provetes pequenos (#1) e o resultado está apresentado na Figura 3.40. Verifica-se que o comportamento observado nas

ligações também é observado nos provetes, ou seja, a velocidade das ondas tende a aumentar diretamente com o tempo de secagem.

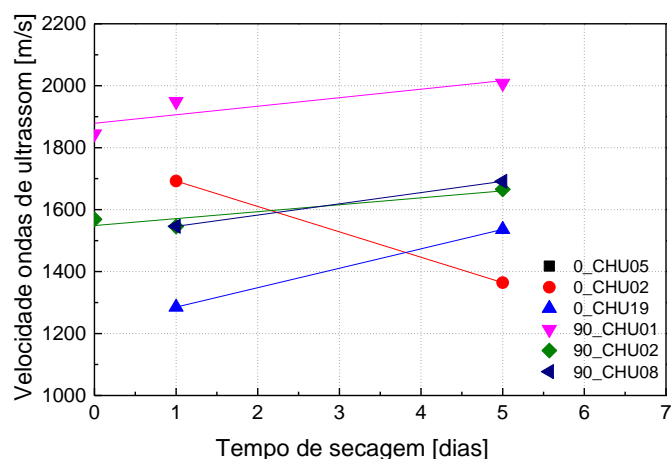


Figura 3.40 - Variação da velocidade das ondas ultrassom com o processo de secagem nos provetes pequenos.

Também foi medida a velocidade ultrassom nos provetes de referência de forma a comparar com os envelhecidos. Na Tabela 3.10 apresentam-se os valores obtidos para os provetes de referência assim como para os envelhecidos. Estes testes foram realizados em duas direções perpendiculares à das fibras da madeira (valores designados como 1 e 2 na Tabela 3.10). Verifica-se que os valores da velocidade nos provetes de referência são superiores aos obtidos nos envelhecidos. A redução da velocidade observada deve-se, muito provavelmente ao facto dos provetes envelhecidos possuírem mais danos o que, segundo o exposto no capítulo 2, provoca um aumento no tempo que demora a percorrer devido às refrações internas. A variação da posição de medida (valores 1 e 2 na Tabela 3.10) não apresenta variações significativas, o que significa que não são afetadas pela distância percorrida (no intervalo testado) mas sim pelo estado do material (defeitos internos).

Tabela 3.10 - Tabela de comparação da velocidade medida com o equipamento de ultrassom entre os provetes pequenos de referência (REF) e os provetes pequenos envelhecidos à chuva (CHU).

		Velocidade (m/s)	
		1	2
<b>0</b>	REF	1,7	1,8
	CHU	1,4	1,3
<b>90</b>	REF	1,8	1,8
	CHU	1,7	1,6

### **3.8. Comentários finais**

Como conclusão desta fase do trabalho pode dizer-se que os ensaios de envelhecimento nos provetes pequenos (#1) e nas ligações (#2) foram realizados com sucesso e permitiram verificar:

- o aparecimento e agravamento de fendas;
- a alteração da cor da madeira;
- o empeno e variação de volume assim como a abertura na junção viga-coluna;
- que os valores de teor de humidade externo, ao longo do processo de secagem, diminuíram como esperado e que este tende, em praticamente todas as amostras, para os 12%;
- o comportamento dos valores da velocidade das ondas ultrassom com o tempo de secagem está de acordo com o esperado.



## **4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA MADEIRA - PROVETES PEQUENOS**

### **4.1. Introdução**

Um dos objetivos principais deste trabalho consiste na avaliação do efeito do envelhecimento da madeira nas suas propriedades mecânicas, nomeadamente resistência à compressão na direção paralela e perpendicular às fibras. Deste modo, após o envelhecimento dos provetes e a sua inspeção visual foi definido um plano de ensaios experimentais para avaliar a resistência do material envelhecido e comparar com a dos provetes de referência (material não envelhecido).

A campanha experimental é composta por um conjunto de ensaios de compressão em pequenos provetes de madeira. Uma vez que a madeira é um material anisotrópico, os ensaios de compressão são realizados na direção paralela às fibras da madeira ( $0^\circ$ ) e na perpendicular às fibras da madeira ( $90^\circ$ ).

Neste capítulo apresenta-se a descrição dos ensaios de compressão uniaxial e dos resultados obtidos em termos de diagramas força-deslocamento, padrões de dano e avaliação das propriedades resistentes. Adicionalmente, discute-se o efeito do envelhecimento nas propriedades mecânicas.

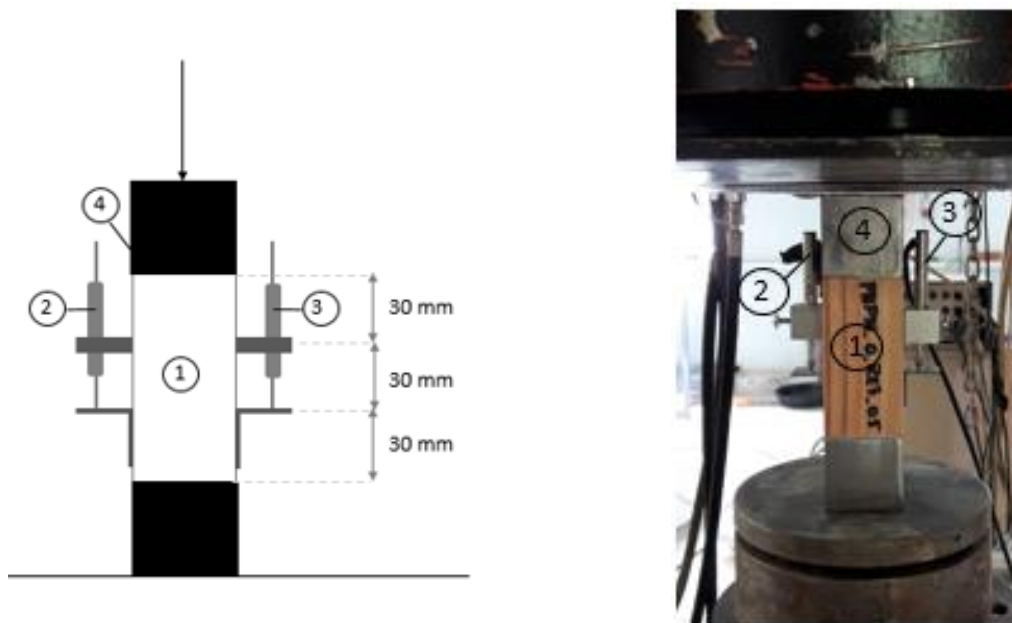
### **4.2. Ensaios de compressão na direção paralela às fibras**

Os ensaios de compressão uniaxial realizados nos provetes pequenos foram efetuados de acordo com a norma europeia (EN 408:2003) no laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST). A dimensão dos provetes foi definida seguindo as indicações de Sobra *et al.* (2015), e consistem numa adaptação das dimensões sugeridas pela norma de ensaio.

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados num pórtico metálico rígido que serve de estrutura de reação. Trataram-se de ensaios por controlo de deslocamento e os dados foram gravados de forma contínua. O esquema de ensaio adotado está indicado na Figura 4.1. De acordo com a norma de ensaios, a carga uniaxial deve ser aplicada a uma velocidade constante e que garanta que a força máxima seja atingida em  $(300 \pm 120)$  s, ou seja, entre 3 min e 7 min. Foram realizados ensaios preliminares para ajustar a velocidade e para que esta exigência da

norma EN 408 (2003) fosse cumprida. A partir destes ensaios foi possível definir a velocidade de ensaio como 0.005 mm/s.

De forma a medir as deformações axiais dos provetes foram colocados dois transdutores de deslocamento (LVDTs) nas superfícies laterais dos provetes de madeira (pontos 2 e 3 da Figura 4.1). Os LVDTs assim colocados apenas medem a deformação que ocorre em 1/3 da peça (fora da região onde ocorre esmagamento, ou seja, afastado das extremidades). Desta forma, o módulo de elasticidade calculado com os dados obtidos por estes LVDTs é mais correto, pois a influência do esmagamento da peça nas extremidades está minimizada.



Legenda: 1. Provette; 2. LVDT; 3. LVDT; 4. Placa onde é aplicada a força

(a)

(b)

Figura 4.1 – Ensaio de compressão uniaxial paralela às fibras (0): (a) esquema do *set-up*; (b) fotografia do *set-up*.

Com base nos diagramas força-deslocamento obtidos dos ensaios experimentais, usa-se as indicações da norma EN408 para obtenção do módulo de elasticidade (equação (4.1)) e da resistência à compressão (equação (4.2));

$$E_{c,0} = \frac{(F_{40} - F_{10}) \cdot h_0}{(w_{40} - w_{10}) \cdot b \cdot l}$$

(4.1)

$$f_{c,0} = \frac{F_{c,0,máx}}{b \cdot l} \quad (4.2)$$

onde,

$F_{40}$ , é a força correspondente a 40% da força máxima do provete;

$F_{10}$ , é a força correspondente a 10% da força máxima do provete;

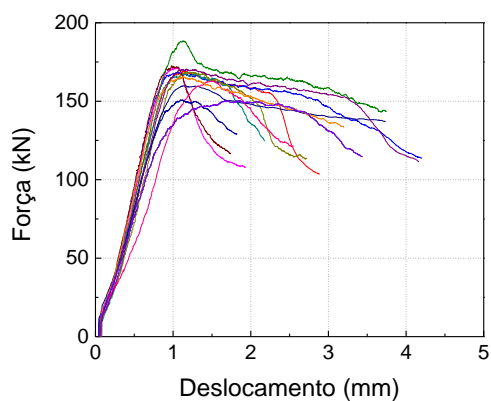
$h_0$ , é a distância em que se está a medir a deformação;

$b \cdot l$ , é a área do provete;

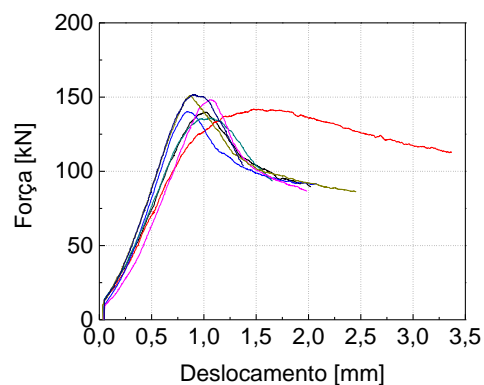
$F_{c,0,máx}$ , é a força máxima atingida.

#### 4.2.1. Diagramas força-deslocamento

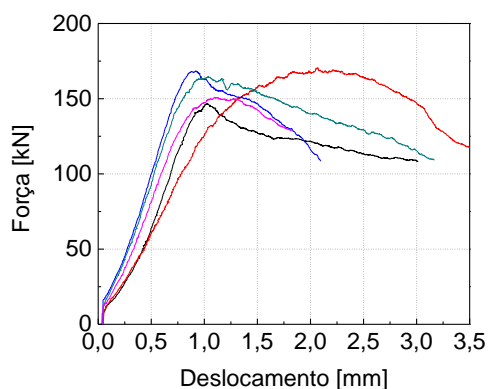
Na Figura 4.2 apresentam-se os diagramas força-deslocamento obtidos nos ensaios de compressão uniaxial. A força consiste no valor registado na célula de carga e os deslocamentos são os registados no LVDT de controlo do ensaio.



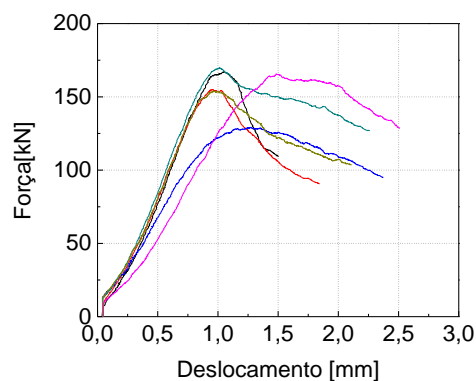
REF



CHL-3 ciclos



CHL - 6 ciclos



CHL - 12 ciclos

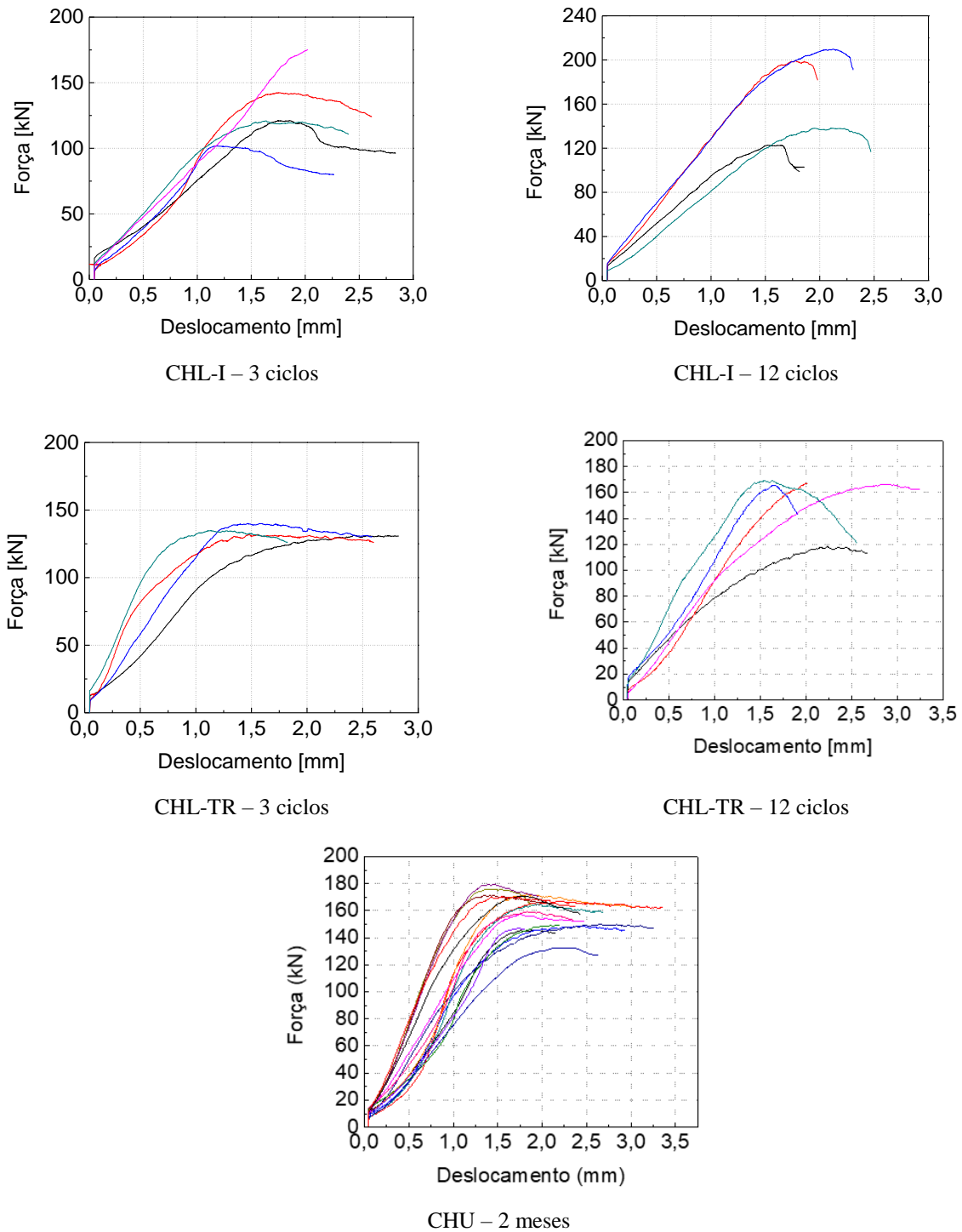


Figura 4.2 – Gráficos força-deslocamento de controlo obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras da madeira em provetes de referência – REF – e envelhecidos por ciclos de imersão e secagem – CHL, CHL-I e CHL-TR – e por ciclos de aspersão e secagem – CHU.

O módulo de elasticidade é obtido a partir do gráfico força deslocamento medido pelos LVDTs laterais (Figura 4.3), pelo declive da zona elástica e linear da curva, entre os 10% e os 40% da força máxima, tal como diz na norma e aplicando a equação 4.1.



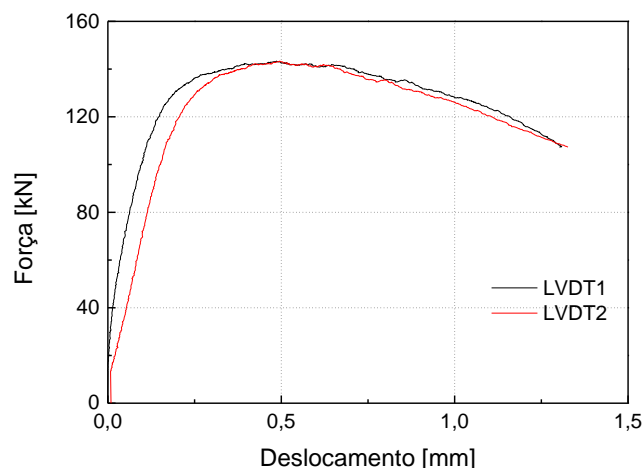


Figura 4.3 – Gráfico exemplificativo da relação força-deslocamento obtido nos LVDTs laterais dos ensaios de compressão paralelos às fibras da madeira de um provete exemplo.

#### 4.2.2. Padrões de dano

O ensaio de compressão uniaxial paralela às fibras da madeira provocou padrões de danos diferentes em função das condições de teste (REF, CHL, CHL-I, CHL-TR e CHU).

Os provetes de referência, sem qualquer tipo de dano/fissuras antes dos ensaios de compressão, apresentavam uma fissura perpendicular às fibras como mostra a Figura 4.4, após os ensaios de compressão.



Figura 4.4 – Fotografias dos padrões de dano obtidos nos provetes pequenos de referência.

No caso dos provetes envelhecidos por ciclos de imersão e secagem – CHL – os provetes após ensaiados apresentavam um esmagamento superior da madeira quando comparados com os de referência. Na Figura 4.5 apresentam-se fotografias dos provetes, envelhecidos durante 3 ciclos,

após realizados os ensaios de compressão. As fotografias ilustram que, tal como nos provetes de referência, os provetes após os ensaios apresentam uma fissura, perpendicular às fibras da madeira e a acompanhar as fissuras já existentes, resultantes do envelhecimento. Relativamente aos provetes envelhecidos durante 6 e 12 ciclos (Figura 4.6) já se verificou que a fissura era mais no sentido das fibras do que no sentido perpendicular como acontecia com os provetes de referência e os envelhecidos por 3 ciclos.

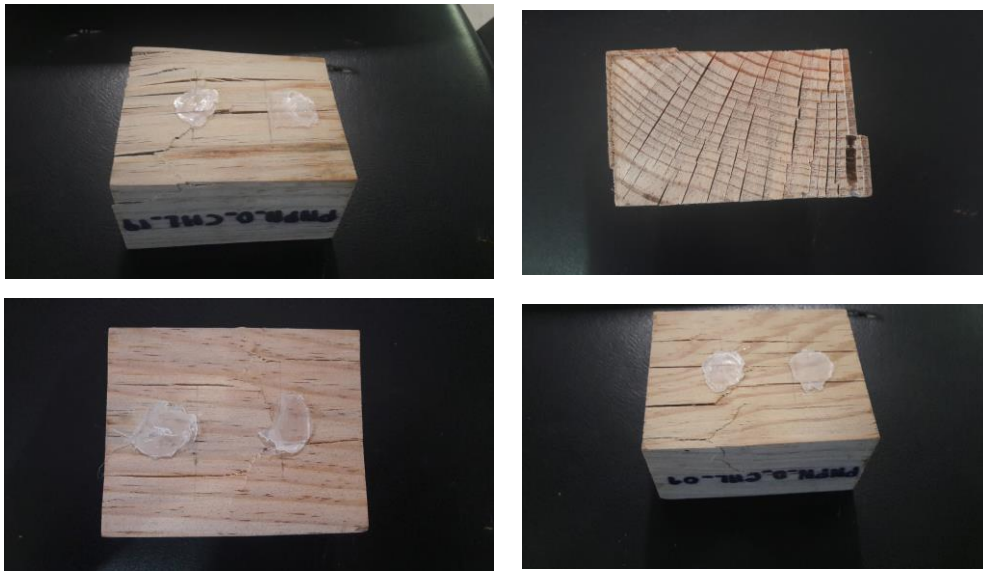


Figura 4.5 –. Fotografias dos padrões de dano em provetes, envelhecidos por ciclos de molhagem e secagem durante 3 ciclos, após os ensaios de compressão uniaxial.



Figura 4.6 –. Fotografias dos padrões de dano em provetes, envelhecidos por ciclos de molhagem e secagem durante 6 e 12 ciclos, após os ensaios de compressão uniaxial.

No caso do resultado dos ensaios de compressão em provetes envelhecidos por ciclos de aspersão e secagem o resultado foi também o aparecimento de fissuras, embora discretas. Foram observadas fissuras quer paralelas quer perpendiculares às fibras da madeira; perpendiculares

às fibras nos provetes de referência (Figura 4.7 – fotografias de cima) e paralelas às fibras nos provetes envelhecidos por ciclos de imersão e secagem (Figura 4.7 – fotografias de baixo).



Figura 4.7 – Fotografias dos padrões de dano em provetes envelhecidos por ciclos de aspersão de água e secagem – CHU.

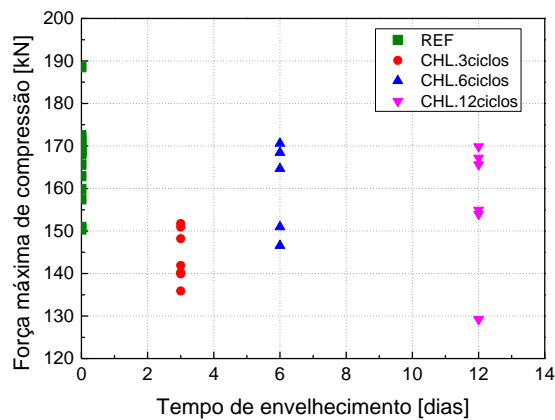
#### 4.2.3. Análise das propriedades mecânicas dos provetes envelhecidos por ciclos de imersão e secagem – CHL, CHL-I e CHL-TR

A Figura 4.8 apresenta a força máxima, que está relacionada com a resistência à compressão, para os provetes de referência e os provetes envelhecidos por um número diferente de ciclos (3, 6 e 12 ciclos) e temperaturas diferentes da água de imersão e de secagem (envelhecimento CHL e CHL-TR). O gráfico da Figura 4.8 (a) ilustra a evolução da resistência máxima com o envelhecimento por imersão em água a  $T=55^{\circ}\text{C}$  e secagem a  $T=105^{\circ}\text{C}$  – o envelhecimento CHL. Neste gráfico estão representados os resultados da resistência máxima de compressão de todos os provetes ensaiados de referência (20 provetes) e de todos os provetes envelhecidos (CHL) para 3, 6 e 12 ciclos (21 provetes). A Figura 4.8 (b) segue a mesma lógica, mas apresenta a evolução da resistência de compressão máxima com o envelhecimento por imersão a  $T=30^{\circ}\text{C}$  e secagem a  $T=80^{\circ}\text{C}$  – o envelhecimento CHL-TR.

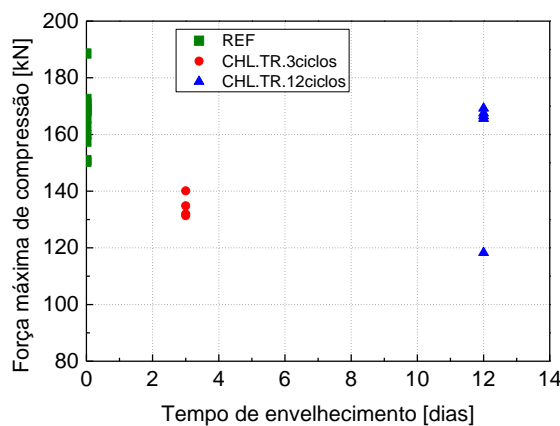
Como é visível nos gráficos apresentados, existe alguma dispersão do valor da força máxima para cada grupo de provetes em análise (REF, CHL, CHL-TR). Por exemplo, os provetes de referência apresentaram uma força máxima que varia entre 150 e 185 kN. Embora a dispersão de valores não possa ser ignorada e dificulte a leitura de uma tendência, é visível: (i) uma diminuição da força máxima para os provetes envelhecidos após 3 ciclos quando comparada com os provetes de referência, independentemente do tipo de envelhecimento a que foram

submetidos e (ii) um ligeiro aumento da força máxima nos ciclos seguintes em relação aos provetes envelhecidos após 3 ciclos mas, ainda inferiores aos valores de referência.

Para uma melhor comparação da variação dos valores da resistência de compressão máxima e do módulo de elasticidade com os diferentes tipos de envelhecimento foram calculados os valores médios que se encontram na Tabela 4.1. Os valores da tabela correspondem à média dos valores da resistência máxima à compressão, da tensão máxima e do módulo de elasticidade de cada conjunto de provetes, isto é, para os provetes de referência, para os provetes envelhecidos por CHL (3, 6 e 12 ciclos), para os provetes envelhecidos CHL-I (3 e 12 ciclos) e para os provetes envelhecidos por CHL-TR (3 e 12 ciclos). Na Tabela 4.1 apresentam-se também os correspondentes valores obtidos para os provetes com topos impermeáveis e que foram submetidos ao mesmo tipo de envelhecimento – CHL-I.



(a)



(b)

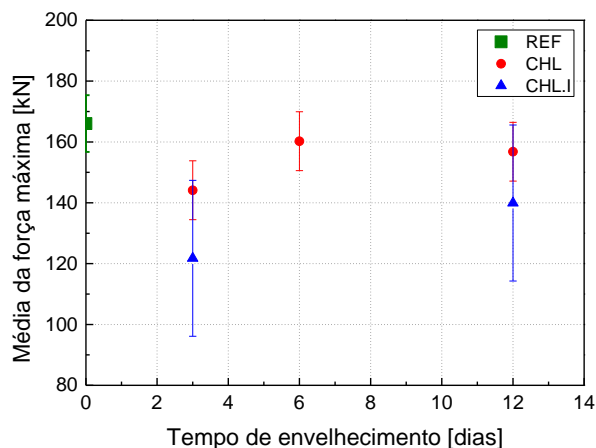
Figura 4.8 – Resistência máxima de compressão de cada provete com o tempo de envelhecimento: (a) envelhecimento por imersão e secagem – CHL; (b) envelhecimento por imersão e secagem com temperaturas alteradas CHL-TR.

Tabela 4.1 - Média dos valores obtidos relativamente à força máxima, à tensão máxima e ao módulo de elasticidade dos provetes ensaiados à compressão paralela às fibras (0).

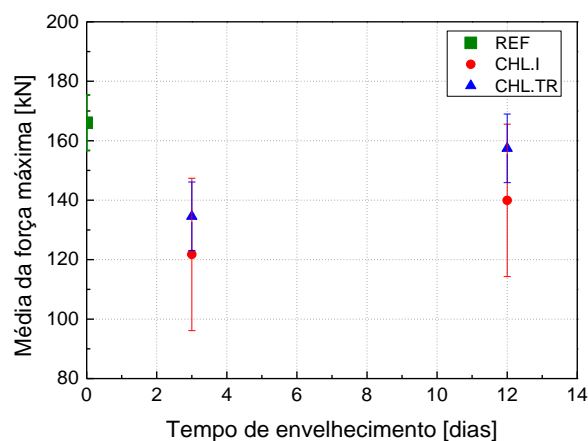
Provetes	Nº de ciclos de envelhecimento	F <sub>c,0</sub> [kN]	σ <sub>c,0</sub> [MPa]	E <sub>c,0</sub> [kN/mm <sup>2</sup> ]
REF	-	166,04 ±5,6%	50,87 ±7,1%	9454,25 ±28,0%
	3	144,12 ±3,9%	44,93 ±4,0%	12604,58 ±33,1%
CHL	6	160,25 ±6,0%	50,91 ±6,9%	11782,17 ±41,7%
	12	156,79 ±8,8%	51,31 ±11,1%	14034,39 ±37,9%
CHL-I	3	121,76 ±11,8%	42,13 ±18,5%	10435,73 ±53,9%
	12	139,90 ±26,4%	47,90 ±28,2%	14756,79 ±96,3%,9
CHL_TR	3	134,57 ±2,6%	41,95 ±2,6%	7351,85 ±24,5%
	12	157,43 ±12,5%	49,08 ±2,9%	11077,01 ±16,3%

Na Figura 4.9 apresentam-se os valores médios da resistência à compressão para as diferentes condições de envelhecimento (CHL/CHL-I/CHL-TR) em função do número de ciclos de envelhecimento: a Figura 4.9 (a) compara os resultados entre o envelhecimento de ciclos de imersão e secagem em provetes com topos impermeáveis – CHL-I – e em provetes com topos não impermeáveis – CHL; a Figura 4.9 (b) compara os resultados obtidos entre efetuar o envelhecimento de imersão e secagem com temperaturas de 55°C e 105°C – CHL-I – e temperaturas de 30°C e 80°C – CHL-TR.

Em todos os 3 casos, observa-se que a resistência à compressão tende a diminuir com o envelhecimento, ou seja, a madeira envelhecida tem uma resistência menor do que a madeira sã. No entanto esta diminuição não é linear pois após 3 ciclos de envelhecimento há uma diminuição acentuada da resistência à compressão, seguida de um aumento nos valores para 6 e 12 ciclos, sendo que estes valores continuam inferiores aos obtidos nos provetes de referência. Nos provetes de referência, a diminuição da resistência à compressão é de ~20% após 3 ciclos de envelhecimento, de ~3% após 6 ciclos de envelhecimento e de ~10% após 12 ciclos de envelhecimento. É de referir ainda que se regista uma diminuição da resistência no final de 12 ciclos de envelhecimento em relação ao valor médio que se regista após 6 ciclos.



(a)



(b)

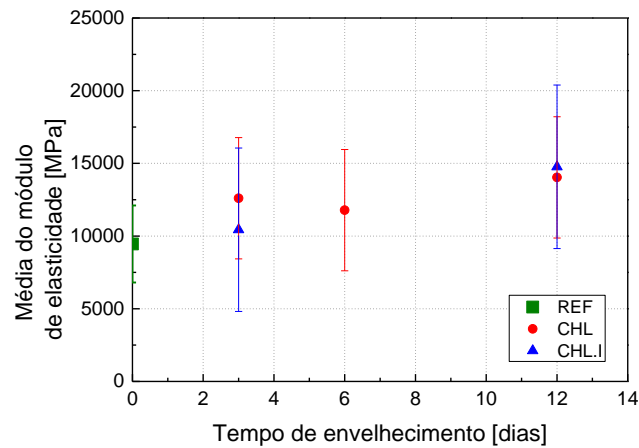
Figura 4.9 – Variação dos valores médios da resistência à compressão, a 0° das fibras, em função do tempo de envelhecimento assim como o tipo de envelhecimento: (a) para provetes com topos impermeáveis (CHL-I) e topos não impermeáveis (CHL) envelhecidos; (b) para provetes envelhecidos com temperaturas de 55°C e 105°C (CHL-I) e temperaturas de 30°C e 80°C (CHL-TR).

Através dos gráficos apresentados na Figura 4.9 é ainda possível comparar os valores médios da resistência à compressão para diferentes condições de envelhecimento:

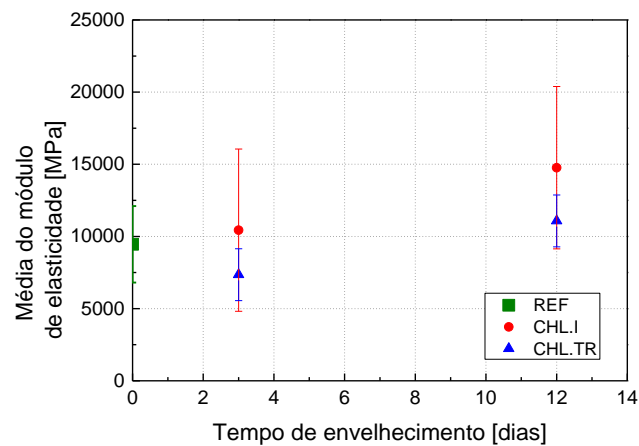
- ao contrário do que seria de esperar, a impermeabilização dos topos – CHL-I – conduziu a valores de resistência máxima inferiores, quando comparados com os valores obtidos nos provetes não impermeabilizados – CHL – após 3 e 12 ciclos (Figura 4.9 (a)). Esperava-se que a impermeabilização tivesse um efeito benéfico dado que se admite que esta evitaria a absorção de água na direção paralela às fibras e pudesse resultar num menor efeito do envelhecimento. A impermeabilização dos topos dos provetes provocou uma redução da resistência máxima à compressão de 16% e 10% após, respetivamente, 3 e 12 ciclos de envelhecimento;

- no estudo do efeito da redução da temperatura de imersão e de secagem foram comparados os resultados do envelhecimento com ciclos de imersão (30°C) e de secagem (80°C) – CHL-TR – com os resultados obtidos no envelhecimento com ciclos de imersão (55°C) e de secagem (105°C) – CHL-I (Figura 49 (b)). Deste estudo concluiu-se que a redução da temperatura provocou um menor efeito do envelhecimento nos provetes, pois a resistência à compressão é 10 vezes superior ao fim de 3 ciclos e 12 vezes superior ao fim de 12 ciclos para os provetes envelhecidos em temperaturas menores do que os envelhecidos a temperaturas superiores.

A Figura 4.10 ilustra a variação dos valores médios do módulo de elasticidade dos provetes em função do tipo de envelhecimento a que foram submetidos e do número de ciclos a que foram expostos e compara com o módulo de elasticidade dos provetes de referência. A Figura 4.10 (a) compara os resultados entre o envelhecimento de ciclos de imersão e secagem em provetes com topos impermeáveis – CHL-I – e em provetes com topos não impermeáveis – CHL. A Figura 4.10 (b) compara os resultados obtidos entre efetuar o envelhecimento de imersão e secagem com temperaturas de 55°C e 105°C – CHL-I – e temperaturas de 30°C e 80°C – CHL-TR.



(a)



(b)

Figura 4.10 – Variação dos valores médios do módulo de elasticidade, a  $0^\circ$  das fibras, em função do tempo de envelhecimento assim como o tipo de envelhecimento (a) comparar envelhecimento com topos impermeáveis – CHL-I – e topos não impermeáveis – CHL; (b) comparar envelhecimento com temperaturas de  $55^\circ\text{C}$  e  $105^\circ\text{C}$  – CHL-I – e temperaturas de  $30^\circ\text{C}$  e  $80^\circ\text{C}$  – CHL-TR.

Em ambos os gráficos a tendência que se observa é que o módulo de elasticidade tende a aumentar com o tempo de envelhecimento a que o provete é exposto. Relacionando com o valor de referência, após 3 ciclos de envelhecimento o módulo de elasticidade aumenta cerca de  $\sim 20\%$ , após 6 ciclos aumenta  $\sim 25\%$  e após 12 ciclos tem um aumento de  $\sim 35\%$ .

Comparando as diferentes variações de métodos de envelhecimento efetuados e a sua influência no módulo de elasticidade pode-se concluir que tanto o facto de os provetes terem os topos impermeáveis ou não impermeáveis (Figura 4.10 (a)) ou sofrerem temperaturas de imersão e secagem mais altas ou mais baixas (Figura 4.10 (b)) não tem qualquer influência no módulo de elasticidade. A variação de valores registada nos gráficos deve-se à variabilidade da própria

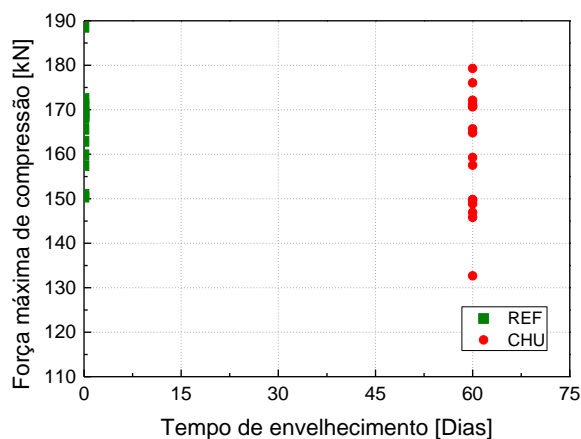


madeira visto os desvios obtidos se encontram dentro da margem de erro de cada grupo de provetes testados (ver Tabela 4.1 ou barras de erro nos gráficos da Figura 4.10).

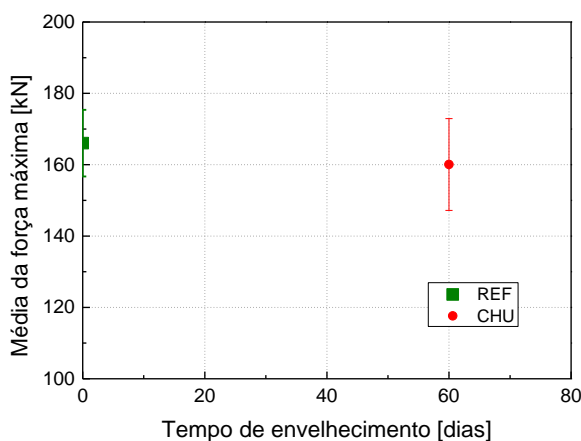
Com os vários ciclos de molhagem e secagem, o teor de água intrínseca nas fibras da madeira vai diminuindo provocando uma diminuição da capacidade de deformação das fibras (ligações mais rígidas) o que pode levar ao aumento do módulo de elasticidade.

#### 4.2.4. Análise das propriedades mecânicas dos provetes envelhecidos por ciclos de aspersão e de secagem – CHU

Segue-se o estudo do efeito do envelhecimento por ciclos de aspersão e de secagem nos resultados obtidos pelos ensaios de compressão paralelos às fibras da madeira. Na Figura 4.11 (a) estão apresentados os resultados da resistência máxima obtidos em todos os ensaios de compressão na direção paralela às fibras da madeira antes e após o processo de envelhecimento com base em ciclos de aspersão de água e secagem – CHU. Verifica-se que em ambos os casos a variabilidade de resultados é bastante elevada, o que é justificado pela madeira ser um material natural. A Figura 4.11 (b) ilustra o gráfico da média dos valores do gráfico da Figura 4.11 (a) que se encontram resumidos na Tabela 4.2 juntamente com outros parâmetros como a tensão e o módulo de elasticidade.



(a)



(b)

Figura 4.11 - Variação da resistência à compressão entre os provetes de referência e os provetes envelhecidos por ciclos de aspersão e secagem – CHU: (a) Gráfico força-deslocamento com os resultados de todos os provetes ensaiados; (b) Gráfico da média da força máxima obtida nos ensaios.

Tabela 4.2 – Média dos valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras dos provetes de referência e dos provetes envelhecidos por ciclos de aspersão e de secagem – CHU.

Provetes	$F_{c,0}$		$\sigma_{c,0}$		$E_{c,0}$	
	[kN]		[MPa]		[kN/mm <sup>2</sup> ]	
<b>REF</b>	166,04	±5,6%	50,87	±7,1%	9454,25	±28,0%
<b>CHU</b>	160,07	±8,1%	49,80	±8,0%	11414,83	±35,3%

Apesar da dispersão de valores é possível observar, através da Figura 4.11 (b), que este tipo de envelhecimento origina uma pequena redução de 4% da resistência da madeira quando comparada com os valores da resistência dos provetes de referência.

Na Figura 4.12 está o gráfico ilustrativo dos valores do módulo de elasticidade antes e após o processo de envelhecimento que se encontram na Tabela 4.2. Através deste gráfico conclui-se que o módulo de elasticidade dos provetes envelhecidos durante 2 meses por ciclos de aspersão e secagem teve um aumento de 2% em relação aos provetes de referência.

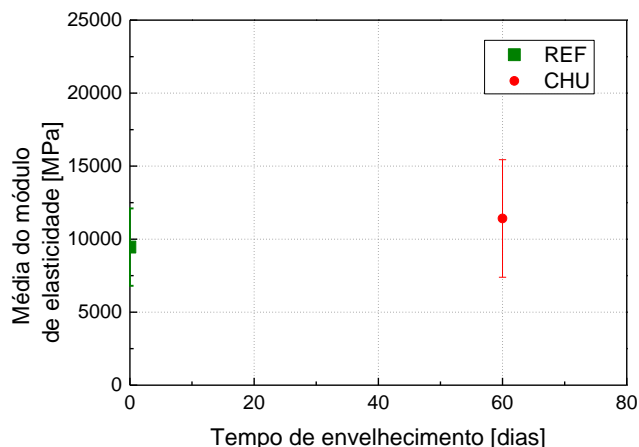


Figura 4.12 - Gráfico da média do módulo de elasticidade dos provetes de referência e os provetes envelhecidos por ciclos de aspersão e secagem – CHU.

### 4.3. Ensaios de compressão na direção perpendicular às fibras

Os ensaios de compressão uniaxial na direção perpendicular às fibras (90) foram realizados com base na norma ASTM D143 (2014), no laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Os ensaios foram realizados num pórtico metálico ao qual está ligado um atuador hidráulico de capacidade de uma 100kN. Neste caso, os ensaios foram também realizados em controlo de deslocamento e com gravação contínua dos resultados. Os ensaios foram realizados com uma velocidade de 0.0012 mm/s.

Adotaram-se para estes provetes as dimensões de 50x50x150 mm<sup>3</sup>, tal como definido na norma e ilustrado na Figura 4.13.



Figura 4.13 - Provede 90 exemplo.

Nestes ensaios a carga foi aplicada através de uma placa metálica de 50x50x30 mm<sup>3</sup> colocada na superfície superior do provete como está demonstrado na Figura 4.14 para garantir a distribuição uniforme da mesma.

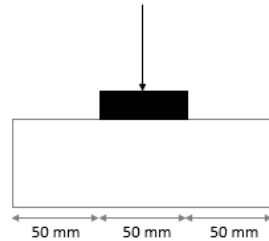
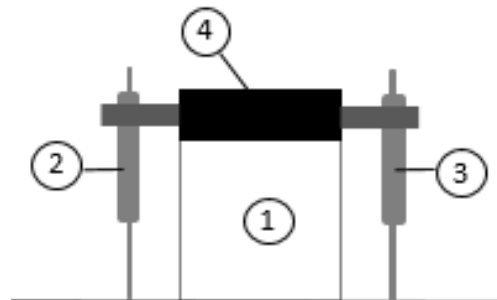
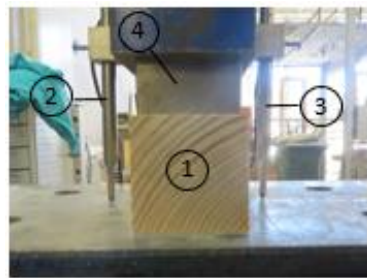


Figura 4.14 - Esquema da localização da placa onde a carga é aplicada no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Foram colocados dois transdutores de deslocamento (LVDTs) para medir o esmagamento de cada lado do provete (Figura 4.15).



- 1 Provete – vista lateral
- 2 LVDT 1
- 3 LVDT 2
- 4 Placa onde se aplica a força

Figura 4.15 - *Set-up* dos ensaios de compressão perpendicular às fibras.

Como neste ensaio de compressão perpendicular às fibras, é praticamente impossível obter a força máxima, devido à grande capacidade de deformação na madeira, a norma EN408 (2003) apresenta um método para estimar o valor de força máxima. Segundo este método, a força máxima corresponde ao ponto de interseção entre a curva experimental e uma reta paralela à reta definida na zona 10% e 40% da força máxima da curva força-deslocamento experimental (Figura 4.16).

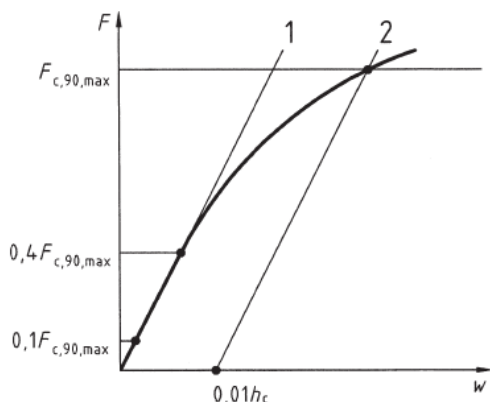
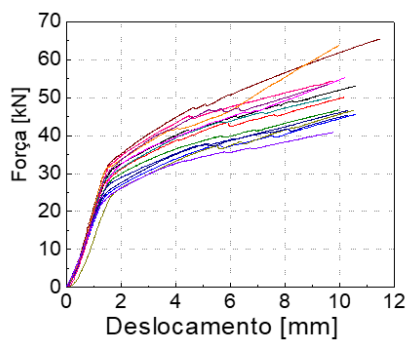


Figura 4.16 – Diagrama força-deslocamento (compressão) (EN 408, 2003)

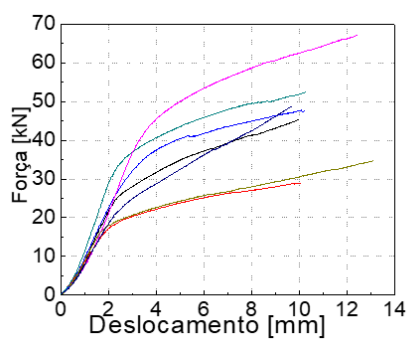
Sabendo a força máxima, o módulo de elasticidade e a tensão são obtidas pela aplicação das equações referidas na norma EN408 (2003) e apresentadas neste capítulo como equação 4.1 e 4.2.

#### 4.3.1. Diagramas força-deslocamento

Na Figura 4.17 apresentam-se os diagramas força-deslocamento obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras da madeira. A força consiste no valor registado na célula de carga e os deslocamentos resulta ao deslocamento de controlo do ensaio. Aplicando o método referido na norma e ilustrado na figura 4.9, obteve-se a resistência máxima para cada provete estudado e o módulo de elasticidade.



REF



CHL-3 ciclos

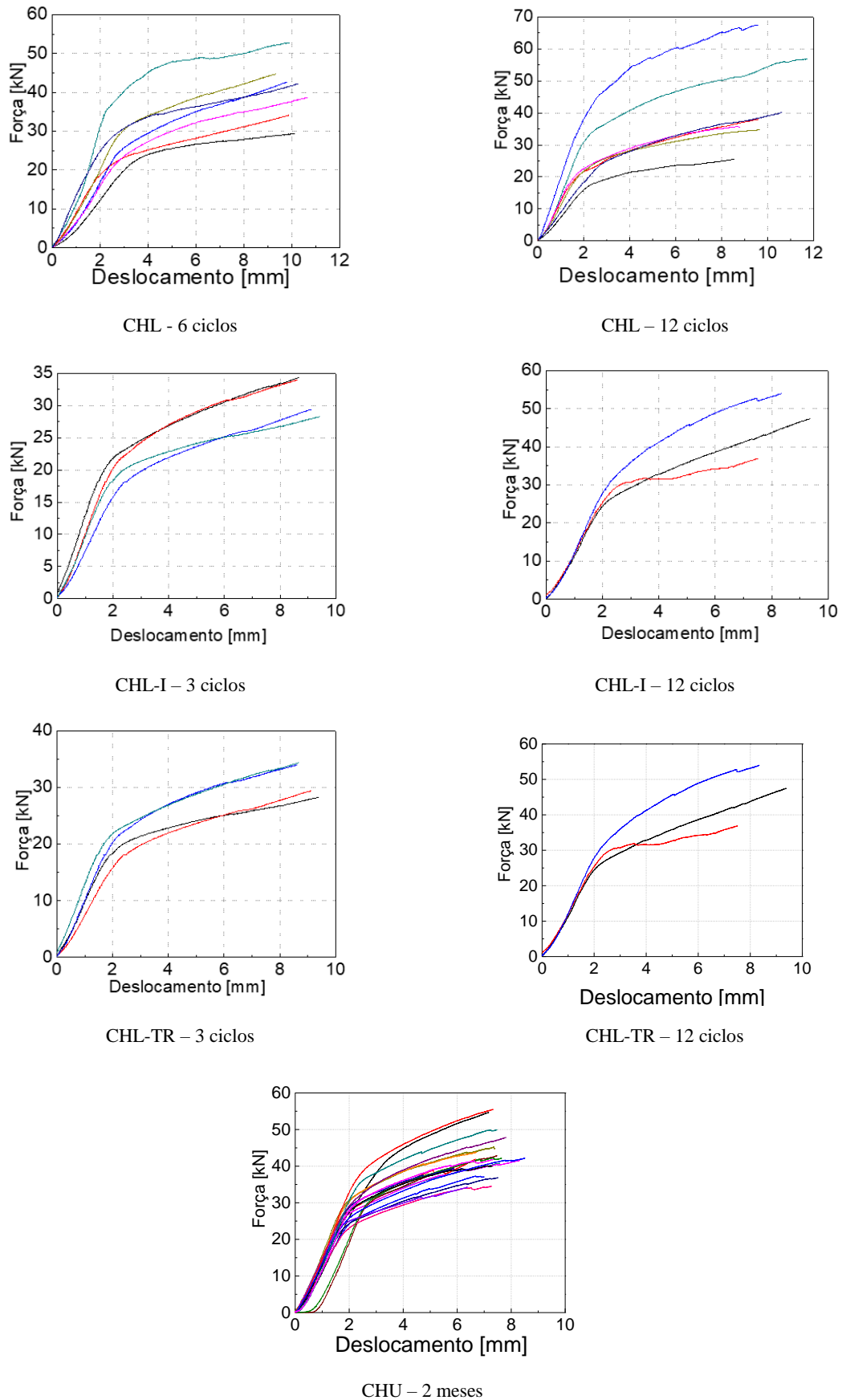


Figura 4.17 – Gráfico força-deslocamento de controlo dos ensaios de compressão perpendiculares às fibras da madeira em provetes de referência – REF, envelhecidos por ciclos de imersão e secagem – CHL, CHL-I e CHL-TR, e, por ciclos de aspersão e secagem – CHU.

#### 4.3.2. Padrões de dano

O ensaio de compressão paralela às fibras da madeira provocou padrões de danos diferentes nos diferentes provetes (REF, CHL, CHL-I, CHL-TR e CHU).

Em todos os provetes ensaiados, foi visível o esmagamento do provete e o aparecimento de fissuras, no sentido das fibras da madeira, na parte superior junto aos topos como mostra a Figuras 4.18 e 4.19. De referir, no entanto que nos provetes envelhecidos estas fissuras não são tão visíveis como nos provetes de referência. Como os provetes envelhecidos, antes dos ensaios, já possuíam pequenas fissuras devido ao processo de envelhecimento, tornava o processo de fissurar menos agressivo e com maior probabilidade seguir as fissuras já existentes.

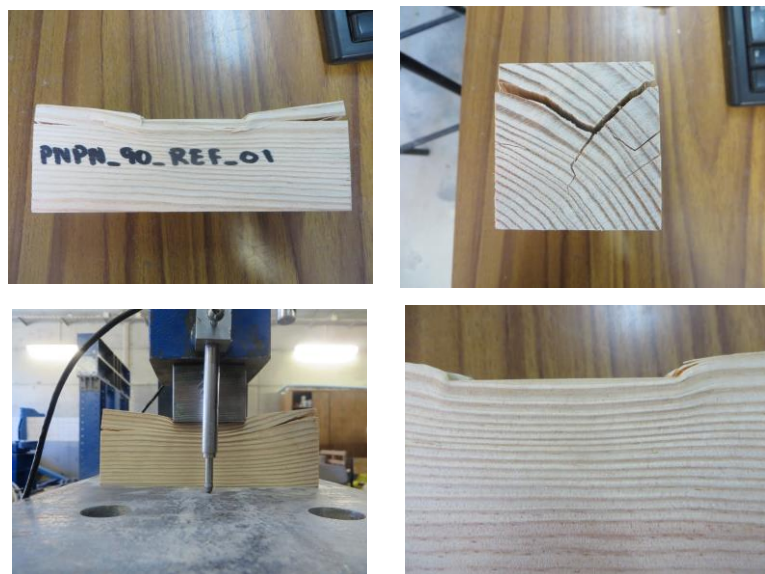


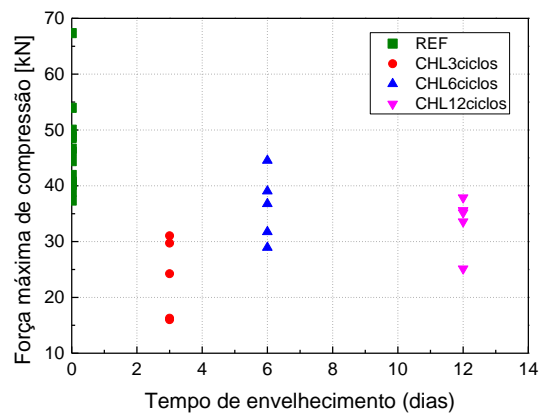
Figura 4.18 –. Fotografias dos padrões de danos em provetes pequenos de referência.



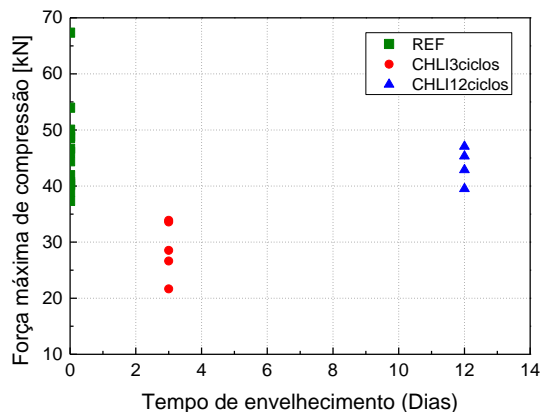
Figura 4.19 –. Fotografias dos padrões de danos em provetes pequenos envelhecidos por ciclos de imersão e secagem.

### 4.3.3. Análise das propriedades mecânicas dos provetes envelhecidos por ciclos de imersão e secagem – CHL, CHL-I e CHL-TR

A Figura 4.20 apresenta o valor da resistência à compressão obtida nos provetes para diferente número de ciclos de envelhecimento e para os diferentes processos de envelhecimento (envelhecimento CHL e CHL-I), juntamente com os resultados obtidos nos provetes de referência. O gráfico da Figura 4.20 (a) ilustra a evolução da resistência máxima com o envelhecimento por imersão e secagem para provetes com os topos não impermeáveis – CHL. Estão então representados os resultados da resistência máxima de compressão de todos os provetes ensaiados de referência (20 provetes) e de todos os provetes envelhecidos (CHL) para 3, 6 e 12 ciclos (21 provetes). Na Figura 4.20 (b) segue a mesma lógica que a Figura 4.20 (a) mas apresenta a evolução da resistência de compressão máxima com o envelhecimento por imersão e secagem, mas para provetes com os topos impermeáveis – CHL-I.



(a)



(b)

Figura 4.20 – Gráfico de resistência máxima de compressão de cada provete com o tempo de envelhecimento: (a) envelhecimento por imersão e secagem – CHL; (b) envelhecimento por imersão e secagem em provetes com os topos impermeáveis CHL-I.



Ao observar os gráficos da Figura 4.20 as conclusões são semelhantes às retiradas dos provetes ensaiados à compressão no sentido paralelo às fibras da madeira: (i) existe alguma dispersão significativa do valor da resistência máxima dentro de cada grupo de provetes em análise (por exemplo, a força máxima dos provetes de referência varia entre 40 e 65 kN); (ii) é clara uma diminuição da força máxima para os provetes envelhecidos após 3 ciclos quando comparada com os provetes de referência, independentemente do tipo de envelhecimento a que foram submetidos e (iii) um ligeiro aumento da força máxima nos ciclos seguintes (6 e 12) em relação aos provetes envelhecidos após 3 ciclos mas ainda inferiores aos valores de referência.

A Tabela 4.3 apresenta o resumo da média dos valores de força máxima, tensão e módulo de elasticidade, obtidos para cada conjunto de provetes, isto é, para os provetes de referência, para os provetes envelhecidos por CHL (3, 6 e 12 ciclos), para os provetes envelhecidos CHL-I (3 e 12 ciclos) e para os provetes envelhecidos por CHL-TR (3 e 12 ciclos). Nesta tabela confirma-se que nos provetes que foram submetidos com envelhecimento por imersão e secagem para temperaturas inferiores (30°C e 80°C) – CHL-TR – tiveram um comportamento semelhante ao verificado nos gráficos anteriores (Figura 4.20).

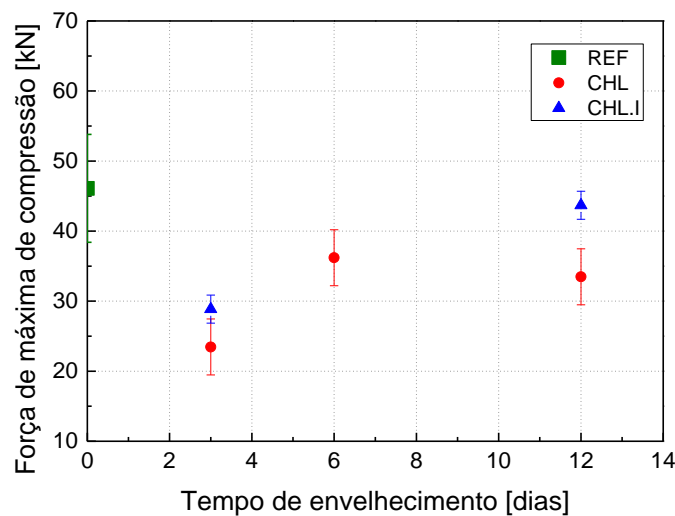
Tabela 4.3 - Média dos valores obtidos relativamente à força máxima, à tensão máxima e ao módulo de elasticidade dos provetes ensaiados à compressão perpendicular às fibras (90°).

Provetes	Nº de ciclos de envelhecimento	$F_{c,0}$ [kN]	$\sigma_{c,0}$ [MPa]	$E_{c,0}$ [kN/mm <sup>2</sup> ]
REF	-	46,10 ±16,9%	17,38 ±17,3%	1443,36 ±23,9%
	3	23,46 ±27,3%	13,82 ±37,6%	531,22 ±70,7%
CHL	6	36,20 ±15,1%	15,04 ±18,6%	391,92 ±38,5%
	12	33,48 ±13,1%	15,28 ±30,8%	527,47 ±40,6%
CHL-I	3	28,86 ±15,8%	10,82 ±15,7%	355,70 ±21,5%
	12	43,69 ±6,5%	18,22 ±12,6%	515,90 ±12,5%
CHL-TR	3	26,16 ±5,2%	10,35 ±29,0%	390,11 ±46,4%
	12	53,33 ±8,1%	22,07 ±11,8%	603,75 ±20,6%

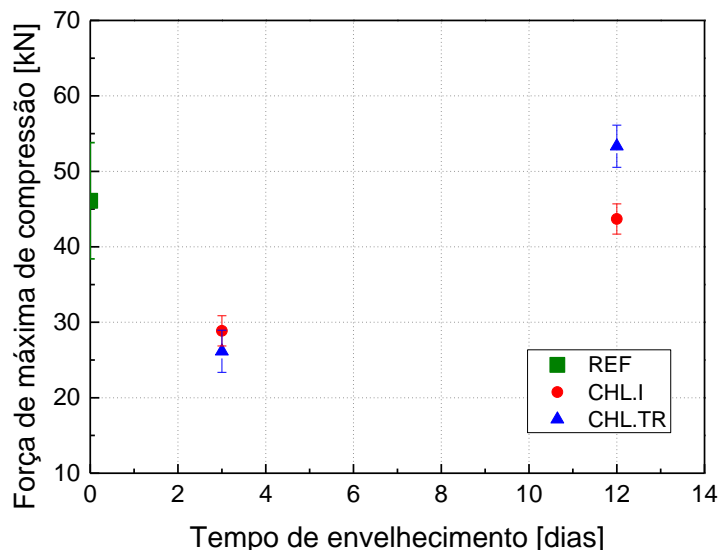
Na Figura 4.21 apresentam-se dois gráficos com os valores médios da resistência à compressão para as diferentes condições de envelhecimento (CHL/CHL-I/CHL-TR) em função do número de ciclos de envelhecimento: a Figura 4.21 (a) compara os resultados entre o envelhecimento de ciclos de imersão e secagem em provetes com topos impermeáveis – CHL-I – e em provetes com topos não impermeáveis – CHL; a Figura 4.21 (b) compara os resultados obtidos entre efetuar o envelhecimento de imersão e secagem com temperaturas de 55°C e 105°C – CHL-I – e temperaturas de 30°C e 80°C – CHL-TR.

Tal como foi concluído para os provetes ensaiados à compressão paralela às fibras, é possível observar que a madeira envelhecida por qualquer tipo de envelhecimento diminui a resistência

comparando com a madeira sã. Também se verifica que esta diminuição não é linear, tal como já foi dito anteriormente, pois após 3 ciclos de envelhecimento há uma diminuição acentuada da resistência à compressão, seguida de um aumento da resistência para 6 e 12 ciclos, sendo que estes valores continuam inferiores aos de referência. Em relação à resistência à compressão dos provetes de referência, a diminuição da resistência é de ~43% após 3 ciclos de envelhecimento, de ~21% após 6 ciclos de envelhecimento e de ~16% após 12 ciclos de envelhecimento.



(a)



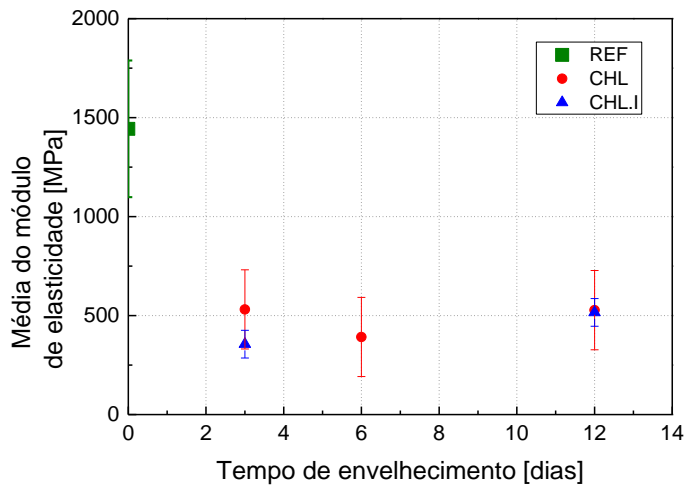
(b)

Figura 4.21 – Variação dos valores médios da resistência à compressão, a 90° das fibras, em função do tempo de envelhecimento assim como o tipo de envelhecimento (a) comparar envelhecimento com topos impermeáveis – CHL-I – e topos não impermeáveis – CHL; (b) comparar envelhecimento com temperaturas de 55°C e 105°C – CHL-I – e temperaturas de 30°C e 80°C – CHL-TR.

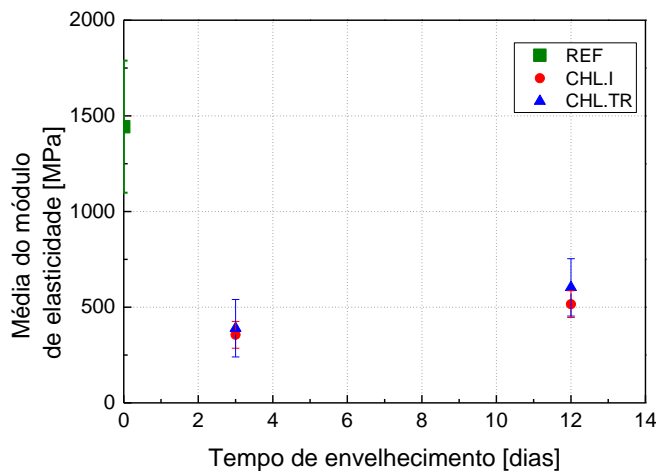
Através dos gráficos apresentados na Figura 4.21 é ainda possível comparar os valores médios da resistência à compressão para diferentes condições de envelhecimento:

- Contrariamente ao que aconteceu com os provetes ensaiados à compressão paralela às fibras, a impermeabilização dos topos – CHL-I – conduziu a valores de resistência máxima superiores, quando comparados com os valores obtidos nos provetes não impermeabilizados – CHL – após 3 e 12 ciclos (Figura 4.21 (a)). Como era de esperar a impermeabilização teve um efeito benéfico uma vez que evita a absorção de água na direção paralela às fibras (direção preferencial de absorção da água) resultando num menor efeito do envelhecimento. Outro fator a considerar, para a diferença de resultados entre os provetes ensaiados paralelamente e perpendicularmente às fibras é o facto dos segundos terem uma menor secção logo menor distância periferia/centro da peça. A impermeabilização dos topos dos provetes, ensaiados a 90° das fibras, provocou um aumento da resistência máxima à compressão de 23% após 3 ciclos de envelhecimento e de 43% após 12 ciclos de envelhecimento.
- No estudo do efeito da redução da temperatura de imersão e de secagem foram comparados os resultados do envelhecimento com ciclos de imersão (30°C) e de secagem (80°C) – CHL-TR – com os obtidos no envelhecimento com ciclos de imersão (55°C) e de secagem (105°C) – CHL-I (Figura 4.21 (b)). Deste estudo não se retirou uma tendência claro do efeito de redução da temperatura. A resistência à compressão é 9 % inferior ao fim de 3 ciclos e 22 % superior ao fim de 12 ciclos para os provetes envelhecidos em temperaturas menores do que os envelhecidos a temperaturas superiores.

Na Figura 4.22 apresenta-se os valores médios do módulo de elasticidade dos provetes em função do tipo de envelhecimento a que foram submetidos e do número de ciclos a que foram expostos e compara com o módulo de elasticidade dos provetes de referência. A Figura 4.22 (a) compara os resultados entre o envelhecimento de ciclos de imersão e secagem em provetes com topos impermeáveis – CHL-I – e em provetes com topos não impermeáveis – CHL. A Figura 4.22 (b) compara os resultados obtidos entre efetuar o envelhecimento de imersão e secagem com temperaturas de 55°C e 105°C – CHL-I – e temperaturas de 30°C e 80°C – CHL-TR.



(a)



(b)

Figura 4.22 –. Variação dos valores médios do módulo de elasticidade, a 90° das fibras, em função do tempo de envelhecimento assim como o tipo de envelhecimento (a) comparar envelhecimento com topos impermeáveis – CHL-I – e topos não impermeáveis – CHL; (b) comparar envelhecimento com temperaturas de 55°C e 105°C – CHL-I – e temperaturas de 30°C e 80°C – CHL-TR.

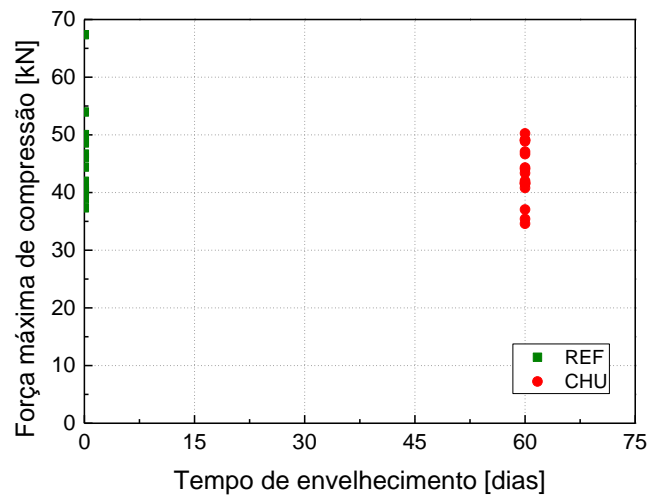
Em ambos os gráficos é possível observar que há uma diminuição significativa do módulo de elasticidade nos provetes envelhecidos quando comparados com os de referência. Relativamente aos valores obtidos para os provetes de referência, após 3 ciclos de envelhecimento o módulo de elasticidade diminui cerca de ~70%, após 6 ciclos diminui ~73% e após 12 ciclos tem uma diminuição de ~62%. Este comportamento é contrario ao que se verificou nos provetes ensaiados à compressão, segundo a direção paralela às fibras da madeira, o que poderá estar relacionado com a anisotropia da madeira. O módulo de elasticidade na direção perpendicular às fibras é muito inferior (passa de ~9400 para ~1400 kN/mm<sup>2</sup>), logo

mais sensível nessa direção ao efeito do envelhecimento, por formação de defeitos internos no material. Verifica-se que, com o envelhecimento da madeira, há um aumento da rigidez na direção paralela às fibras e uma diminuição na direção perpendicular.

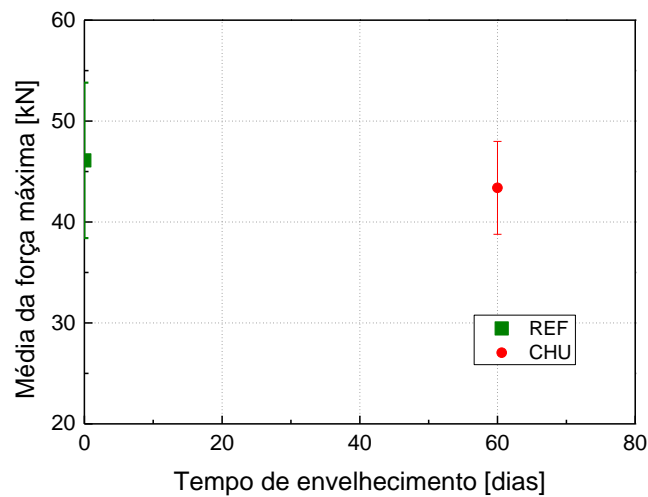
Comparando as diferentes variações de métodos de envelhecimento efetuados e a sua influência no módulo de elasticidade pode-se concluir que, independentemente de os provetes terem os topos impermeáveis ou não impermeáveis (Figura 4.22 (a)), sofrerem temperaturas de imersão e secagem mais altas ou mais baixas (Figura 4.22 (b)) não tem influência significativa no módulo de elasticidade.

#### 4.3.4. Análise das propriedades mecânicas dos provetes envelhecidos por ciclos de aspersão e de secagem – CHU

Segue-se o estudo do efeito do envelhecimento por ciclos de aspersão e de secagem nos resultados obtidos pelos ensaios de compressão perpendiculares às fibras da madeira. Na Figura 4.23 estão apresentados os resultados da resistência máxima obtidos em todos os ensaios antes e após o processo de envelhecimento. Na Figura 4.23 (a) ilustra a dispersão nos valores obtidos que é justificada pela madeira ser um material natural. A Figura 4.23 (b) mostra a média dos valores da resistência e a margem de erro obtida. Estes dados encontram-se resumidos na Tabela 4.4 juntamente com outros parâmetros como a tensão e o módulo de elasticidade.



(a)



(b)

Figura 4.23 - Gráfico da força-tempo de envelhecimento para os provetes envelhecidos por CHU: (a) força máxima obtida nos ensaios de todos os provetes de referência e envelhecidos por CHU; (b) média da força máxima obtida

Tabela 4.4 - Resumo da média dos valores de força, tensão e módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras dos provetes envelhecidos (CHU)

Provetes	$F_{c,0}$		$\sigma_{c,0}$		$E_{c,0}$	
		[kN]		[MPa]		[kN/mm <sup>2</sup> ]
REF	46,10	±16,9%	17,38	±16,7%	1443,36	±23,9%
CHU	43,38	±10,7%	17,58	±14,2%	546,74	±17,3%

Apesar da dispersão de valores é possível observar, através da Figura 4.23 (b), que este tipo de envelhecimento origina uma pequena redução de ~6% da resistência à compressão da madeira quando comparada com os valores da resistência dos provetes de referência, comportamento similar ao obtidos nos provetes ensaiados à compressão paralela às fibras da madeira.

A Figura 4.24 mostra como varia o módulo de elasticidade com o envelhecimento por ciclos de aspersão e secagem. Pode-se concluir que os provetes envelhecidos durante 2 meses tiveram uma diminuição do valor do módulo de elasticidade de ~62% em relação aos provetes de referência.

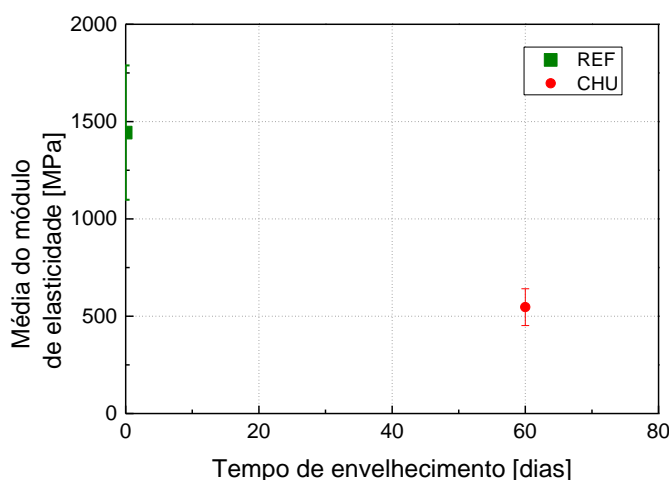


Figura 4.24 - Variação do módulo de elasticidade antes e após o envelhecimento por ciclos de aspersão e secagem – CHU.

#### 4.4. Comentários finais

Relativamente aos ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras da madeira, nos provetes de referência e nos provetes envelhecidos por CHL, CHL-I, CHL-TR e, dentro de cada tipo de envelhecimento, envelhecidos com diferentes números de ciclos, pode dizer-se que o comportamento geral é uma diminuição das propriedades da madeira quando envelhecida por 3 ciclos, independentemente do tipo de envelhecimento. Quando o tempo de envelhecimento é mais prolongado, ou seja, para os provetes envelhecidos durante 6 e 12 ciclos ocorre uma melhoria das propriedades da madeira em estudo.

Em termos gerais os três tipos de envelhecimento por imersão/secagem testados deram aproximadamente os mesmos resultados. Relativamente ao quarto tipo de envelhecimento, envelhecimento por aspersão/secagem, a conclusão foi que houve uma diminuição de

resistência da madeira com o envelhecimento. De seguida apresentam-se resumidas as principais conclusões:

- a impermeabilização do sentido longitudinal dos provetes de madeira não fortalece o material;
- realizar o método de envelhecimento proposto por McNatt e Link (1989) ou um método semelhante, mas com temperaturas encontradas no dia-a-dia não tem influência significativa na resistência da madeira;
- independentemente do tipo de envelhecimento, a madeira parece perder resistência ao fim de três ciclos mas nos ciclos seguinte aumenta ligeiramente a sua resistência.
- a resistência da madeira no sentido perpendicular às fibras é inferior à resistência no sentido paralelo às fibras;
- verificou-se que o envelhecimento por CHU resultava numa deterioração da resistência da madeira tanto no sentido das fibras da madeira como no sentido perpendicular;
- em termos relativos, os efeitos do envelhecimento são mais significativos na direção perpendicular à das fibras da madeira.



## 5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS LIGAÇÕES

### 5.1. Introdução

Neste capítulo analisa-se o comportamento mecânico das ligações tradicionais (meia madeira) representativas de paredes de madeira características de edifícios pombalinos e anteriormente descritas (Capítulo 3) a esforços de tração. Para este efeito, foi definida uma campanha de ensaios de tração cíclica (*pull-out*) em ligações que foram sujeitas a um período de envelhecimento através de ciclos de molhagem por aspersão e secagem (Capítulo 3) e em ligações que não foram sujeitas e nenhum tipo de envelhecimento (referência). O objetivo é avaliação o efeito do envelhecimento na deterioração das ligações e consequentemente no comportamento mecânico das ligações após de ser submetidas a ciclos de aspersão/secagem. Como já foi referido no Capítulo 3, algumas dessas ligações foram reforçadas com fibra de vidro (G-FRP). Em todas as ligações foram realizados ensaios *pull-out* cíclicos seguindo as recomendações de autores que efetuaram ensaios na mesma linha de investigação (Poletti, 2013; Isopescu, 2016).

Neste capítulo apresentam-se os detalhes dos ensaios de tração cíclica nas ligações, apresenta-se uma discussão dos principais resultados, nomeadamente diagramas de força-deslocamento de onde são retirados alguns dos parâmetros fundamentais para a caracterização de uma ligação, como a força máxima, a rigidez, a capacidade de deslocamento e a energia dissipada.

### 5.2. Esquema de ensaio e Procedimentos

Os ensaios cíclicos de tração (*pull-out*) foram realizados segundo a norma EN 12512 (2001). Nestes ensaios, a viga da ligação encontra-se ancorada à laje de reação para evitar qualquer deslocamento horizontal da mesma. O poste é ligado ao atuador hidráulico através de perfil em forma de U ancorado no topo do poste dimensionada de forma a ser possível a aplicação da carga durante os ensaios cíclicos (Figura 5.1). Para evitar dano ou falhas locais na interação entre a peça de ancoragem e a ligação, esta foi reforçada na parte superior do poste (Figura 5.2). Este reforço foi realizado após o envelhecimento das ligações uma vez que de acordo com os resultados apresentados por Isopescu (2016), o reforço da ligação antes do envelhecimento resultou em problemas, dificultando a obtenção de conclusões.

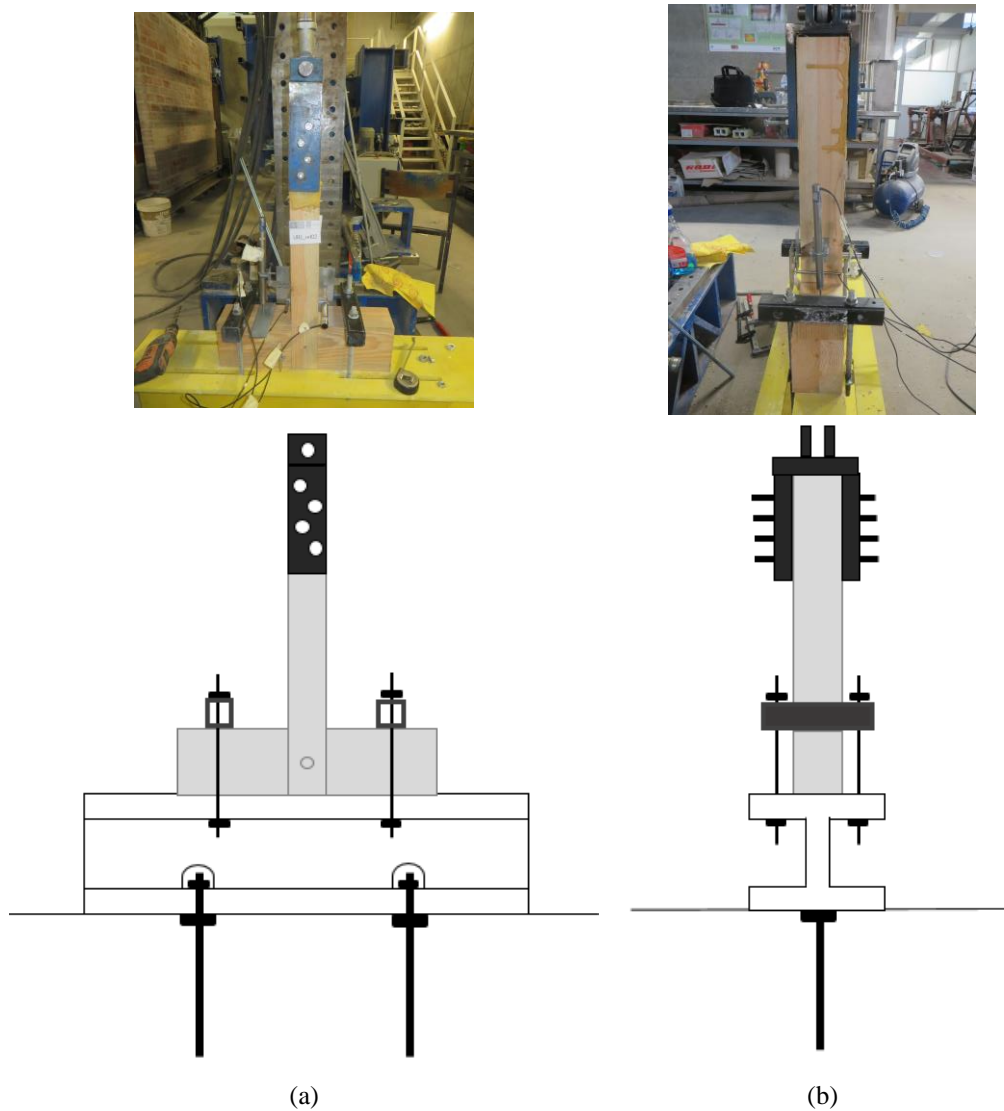


Figura 5.1 - *Set-up* dos ensaios *pull-out* realizados nas ligações. (a) vista frontal; (b) vista lateral

O reforço localizado em ambas as faces do poste foi realizado com duas camadas uniaxiais de fibra de vidro (GFRP uniaxiais) com dimensões de  $25 \times 8 \text{ cm}^2$  impregnadas em resina epóxi, tal como foi efetuado para o reforço da ligação. As fibras de vidro foram colocadas de forma a ficarem perpendiculares às fibras da madeira, seguindo o procedimento descrito no capítulo 3 (secção 3.3.2).

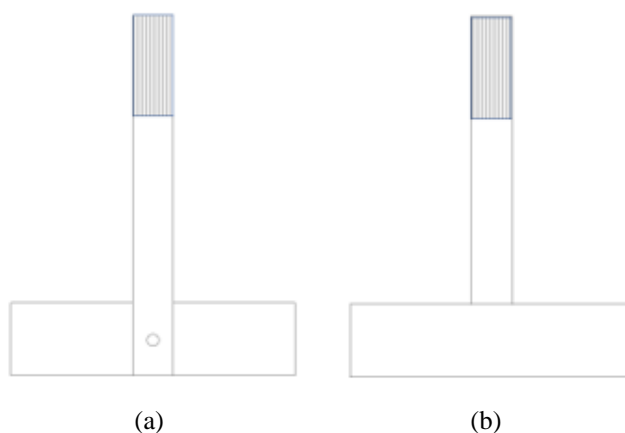


Figura 5.2 - Reforço das ligações antes dos ensaios *pull-out*: (a) parte da frente da ligação; (b) parte de trás da ligação.

A Figura 5.3 ilustra o esquema de ensaio e da instrumentação adotada. O atuador hidráulico tem uma capacidade máxima de 150kN e permite deslocamentos até 200 mm.

O sistema de medição dos deslocamentos das ligações durante os ensaios engloba quatro transdutores de deslocamento linear (LVDTs) colocados em posições estratégicas de forma a registar as deformações mais significativas, ver Figura 5.3. O LVDT 1 regista o deslocamento da viga relativamente à sua ancoragem ao chão (o resultado deve ser nulo de forma a confirmar que não há movimento vertical da viga). O LVDT 2 é o transdutor de controlo e mede o deslocamento vertical do poste em relação à viga (a abertura da meia madeira) e os LVDTs 3 e 4 registam a abertura da ligação na direção perpendicular ao plano. Os LVDTs 3 e 4 são importantes porque como a ligação é unida por um prego e este tem um comportamento elástico-plástico, pelo que a ligação sofre uma rotação. No trabalho desenvolvido, esta rotação é bastante visível nos ensaios realizados a ligações não reforçadas e será explicada posteriormente.

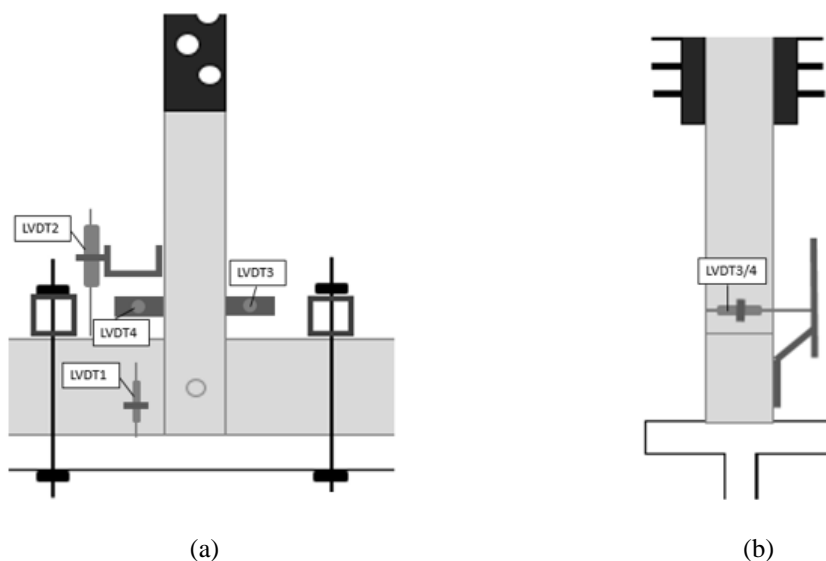


Figura 5.3 - Pormenor do *set-up* com os LVDT's: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.

Os ensaios foram realizados no laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho. O procedimento utilizado para estudar as ligações não reforçadas e as reforçadas foi alterado de acordo com as diferentes condições de rigidez inicial dos dois tipos de ligações. Na Figura 5.4 apresentam-se gráficos deslocamento-tempo dos procedimentos adotados para os dois tipos de provete. Os procedimentos foram adotados baseados na norma EN 12512 (2001) e nos ensaios monotónicos realizados em trabalhos anteriores nesta tipologia de ligações (Poletti 2013).

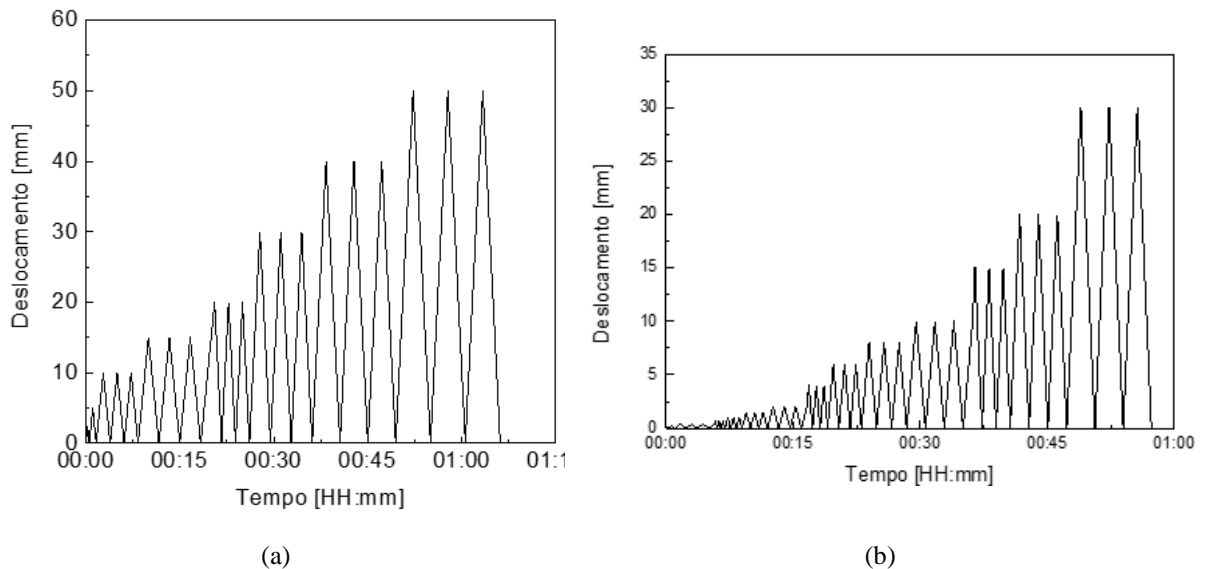


Figura 5.4 - Procedimentos utilizados nos ensaios *pull-out* cíclicos: (a) ligações não reforçadas; (b) Ligações reforçadas.

### 5.3. Análise de resultados

Dos ensaios cíclicos de *pull-out* é possível obter os gráficos força-deslocamento de cada ligação que representam o comportamento da ligação a esforços de tração. Na Figura 5.5 apresentam-se os diagramas força-deslocamento tipo obtidos numa ligação não reforçada e numa ligação reforçada. Através destes gráficos é possível verificar que tanto as ligações reforçadas como as não reforçadas têm um comportamento linear inicial que depois passa a um comportamento não linear até ao fim do ensaio.

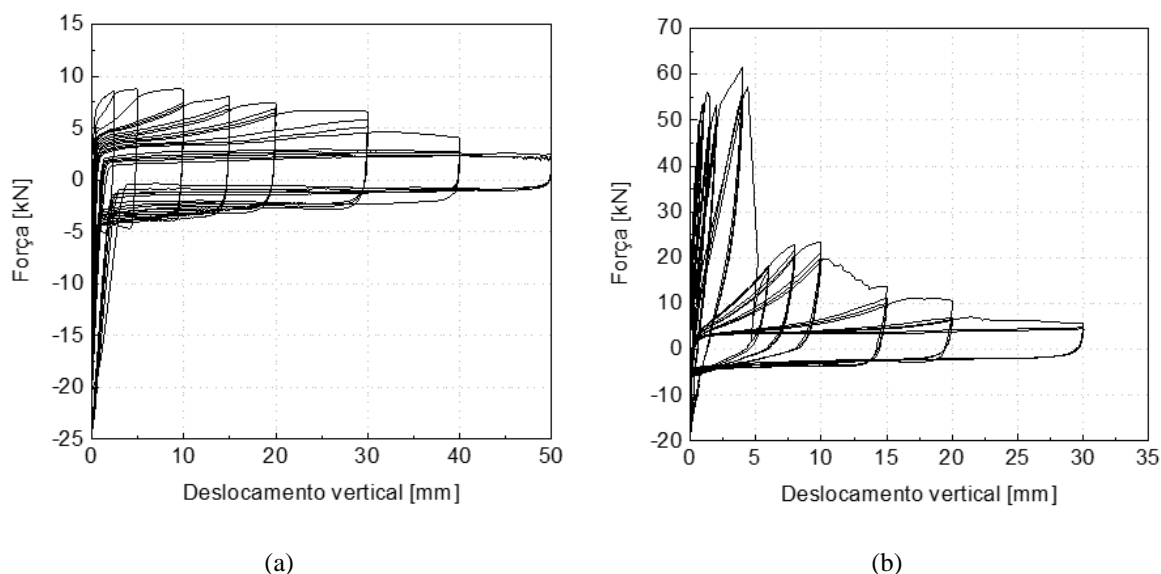


Figura 5.5 - Gráficos exemplificativos de força-deslocamento dos ensaios *pull-out* das ligações: (a) não reforçadas; (b) reforçadas.

No entanto, o comportamento dos dois tipos de ligação é substancialmente diferente, pelo facto de na ligação reforçada o material compósito condicionar o comportamento da ligação. Nas ligações reforçadas o comportamento linear é mais prolongado do que nas ligações não reforçadas. A capacidade para resistir a esforços de tração é também substancialmente diferente, sendo a ligação reforçada mais de 6 vezes mais resistente. A ligação não reforçada apresenta uma grande capacidade para dissipar energia, verificando-se uma degradação da resistência de aproximadamente 50%. No caso da ligação reforçada, verifica-se uma perda de resistência após a fendilhação do material de reforço. A partir deste ponto, a ligação apresenta um comportamento muito próximo do comportamento de uma ligação não reforçada. Verifica-se que no caso da ligação não reforçada verifica-se uma resistência de compressão muito significativa na fase de descarga, o que está associado à repenetração do prego na madeira. Apesar da escala ser diferente, verifica-se que o comportamento na ligação reforçada também é semelhante, o que significa que o prego também funciona no caso do reforço.

Com este tipo de diagramas é também possível obter a resistência máxima, estudar a variação da rigidez da ligação ao longo do ensaio, estudar a degradação da capacidade e a energia dissipada por ciclos.

### 5.3.1. Ligações não reforçadas

Durante a realização destes ensaios foi possível verificar um comportamento semelhante em todas as ligações, independentemente de serem de referência ou envelhecidas. A resposta da ligação ao ensaio é caracterizada por:

- i) um movimento ascendente do prumo (Figura 5.6 (a)) quando puxado o que provoca uma deformação no prego (Figura 5.7);
- ii) um movimento descendente do prumo, quando este é solto, não para a posição inicial, mas sim com uma deslocamento para fora do plano devido à deformação plástica do prego (Figura 5.6 (b)).

Na Figura 5.8 está representado um diagrama exemplo que relaciona a evolução do deslocamento do prumo para fora do plano ao longo do ensaio. Como já foi referido anteriormente (ver Figura 5.3) o LVDT3 regista o deslocamento do prumo para fora do plano do lado direito enquanto que o LVDT4 regista o deslocamento do lado esquerdo da ligação.



Figura 5.6 - Movimento da ligação durante o ensaio *pull-out*: (a) movimento ascendente da ligação; (b) deslocamento para fora do plano.

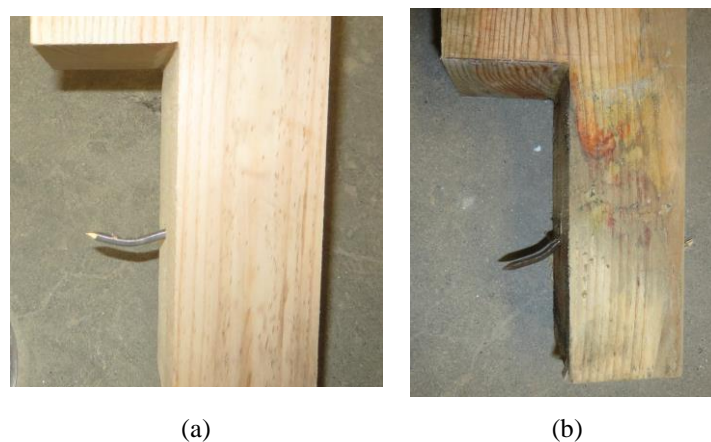


Figura 5.7 - Deformação plástica do prego: (a) numa ligação de referência; (b) numa ligação envelhecida.

No gráfico da Figura 5.8 é possível verificar que nas fases em que o prumo está a ser tracionado não há deslocamento deste para fora do plano. Durante as descargas existe um aumento do deslocamento do prumo confirmando então que a deformação plástica do prego provoca uma impossibilidade do prumo voltar à sua posição inicial, o que já tinha sido visualizado durante os ensaios. Assim, ao longo do ensaio a ligação exibe valores de deslocamento para fora do plano crescente, ou seja, valores de abertura da ligação crescentes.

Os valores de deslocamentos para fora do plano são maiores quanto maior for a deformação vertical aplicada, ou seja, quanto maior for a deformação plástica do prego. No final dos ensaios foi observada uma abertura permanente nas ligações, neste exemplo de 30mm, sendo maior na parte inferior do poste e mais baixo na parte superior. Tanto nas ligações de referência (REF) como nas ligações envelhecidas (CHU), o valor foi sempre aproximadamente de 30 mm e o comportamento semelhante ao do gráfico da Figura 5.8.

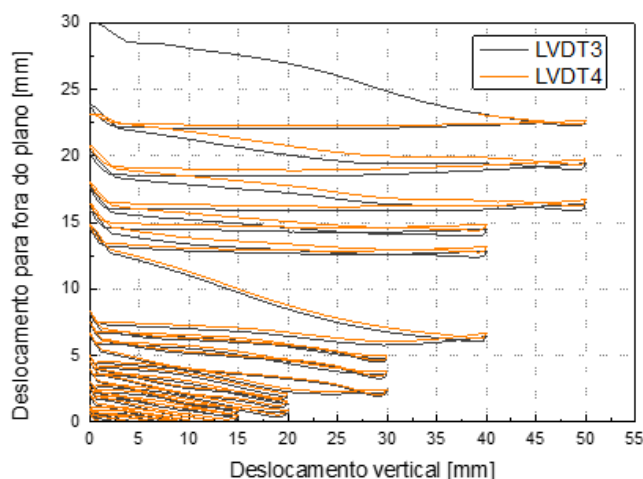


Figura 5.8 – Evolução do deslocamento para fora do plano ao longo do ensaio de *pull-out*.

Após os ensaios foi possível verificar a deformação plástica do prego tanto nas ligações de referência (Figura 5.7 (a)) como nas ligações envelhecidas (Figura 5.7 (b)). Nas ligações envelhecidas, o prego apresentava sinais de ferrugem assim como a madeira em torno do prego tinha sinais de alteração de cor, devido às fases de aspersão durante o envelhecimento.

Analisando o gráfico da Figura 59, onde se apresenta a evolução do deslocamento vertical com a força registada na célula de carga, verifica-se que a força máxima de compressão é de 40kN no caso da ligação não envelhecida e de 25kN nas ligações envelhecidas.

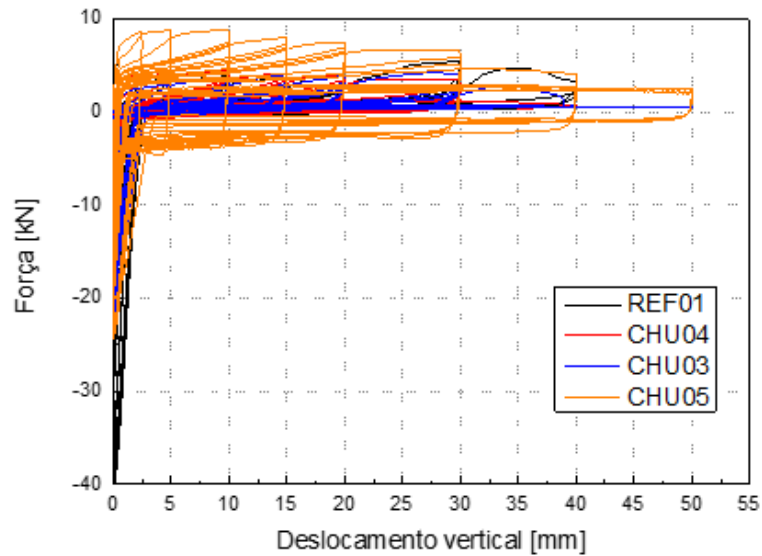


Figura 5.9 – Gráfico força-deslocamento das ligações não reforçadas.

A redução da força nas ligações envelhecidas pode estar associada ao facto da madeira envelhecida ser menos “rígida”, facilitando assim a sua deformação em torno do prego, o que faz com que o prego não se deforme tanto mas mude de posição e sofra uma rotação (Figura 5.7 (b) e Figura 5.10)



Figura 5.10 - Fotografia do interior da viga de uma ligação envelhecida.

A Figura 5.11 apresenta um diagrama força-deslocamento típico obtido nos ensaios de ligações não reforçadas. Observa-se que o diagrama é caracterizado por uma alta rigidez inicial e um comportamento inicial não linear. Neste diagrama é possível verificar que nas zonas de descarga existe uma perda imediata de força seguida de forças de compressão. Estas forças de compressão estão relacionadas com a deformação plástica do prego que dificulta o regresso da ligação à posição inicial.



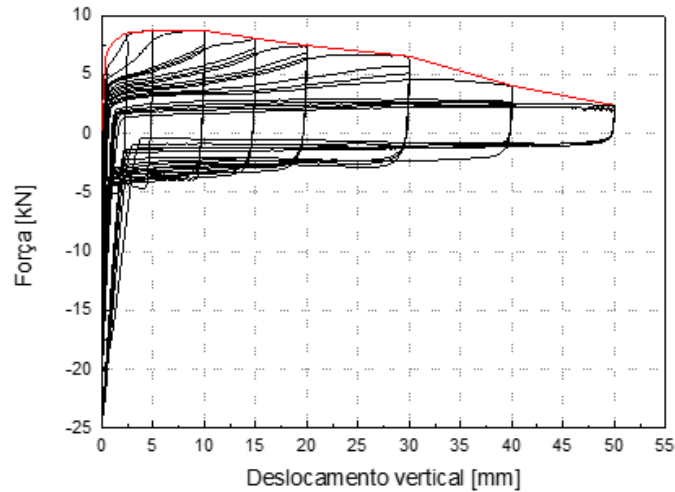


Figura 5.11 - Evolução da força ao longo do ensaio de uma ligação não reforçada com a representação da envolvente da força máxima dos primeiros ciclos.

Foi avaliada a evolução da rigidez das ligações e para o efeito foi calculada a rigidez secante para cada ciclo como a inclinação das retas que unem a origem aos pontos correspondentes à força máxima, ver Figura 5.12. A variação da rigidez apresenta-se na Figura 5.13 para as ligações envelhecidas e não envelhecidas.

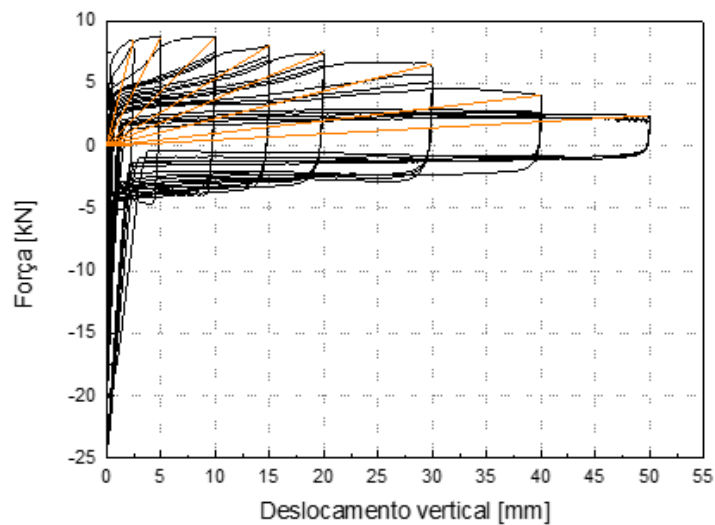


Figura 5.12 -Representação da rigidez de uma ligação não reforçada ao longo do ensaio *pull-out* num gráfico força-deslocamento.

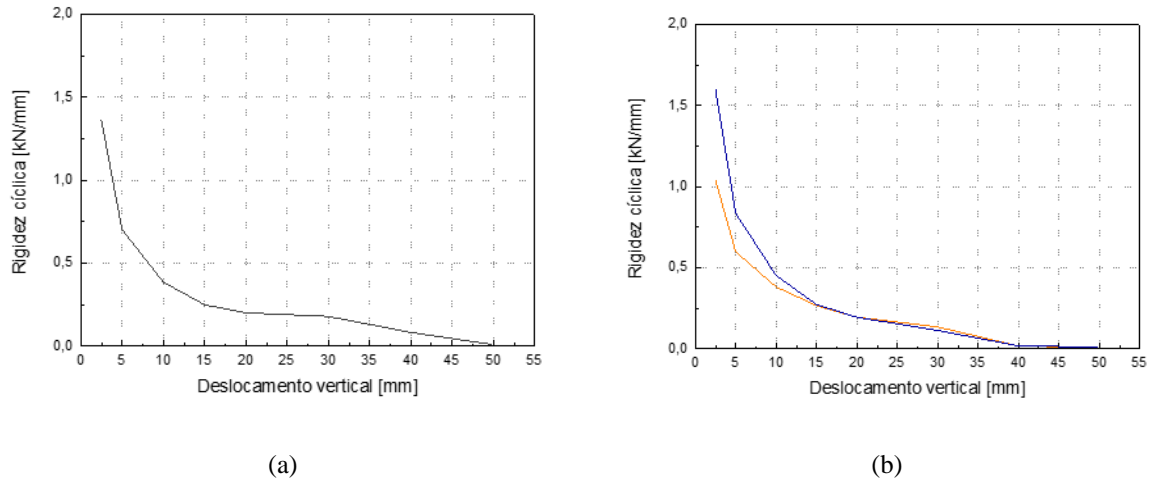


Figura 5.13 - Variação da rigidez durante os ciclos do ensaio *pull-out* de ligações não reforçadas: (a) ligação de referência; (b) ligação envelhecida.

Conclui-se que tanto para as ligações envelhecidas (Figura 5.13 (b)) como para as de referência (Figura 5.13 (a)), a diminuição de rigidez ao longo do ensaio é semelhante: (1) tem uma diminuição exponencial; (2) tem um decréscimo de rigidez maior até aos ~10mm. A forte degradação da rigidez cíclica está associada ao comportamento não linear evidenciado pelas ligações.

Também se estudou a quantidade de energia dissipada ao longo do ensaio. A energia dissipada de cada ciclo corresponde à área correspondente a cada ciclo do gráfico força-deslocamento. Por exemplo, na Figura 5.14 está representado um gráfico força-deslocamento para três ciclos correspondentes a um deslocamento de 10mm. Para além de se verificar que é necessária mais força para atingir os 10mm no 1º ciclo do que nos seguintes também se verifica que a área é maior, o que significa que é libertada mais energia no primeiro ciclo do que nos que se seguem.

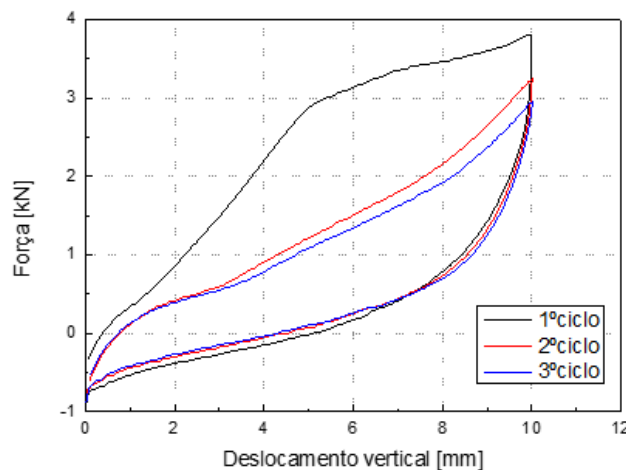


Figura 5.14 - Variação da rigidez com os ciclos do ensaio *pull-out* de uma ligação não reforçada.

A Figura 5.15 ilustra este estudo para uma ligação exemplo, onde se confirma o referido anteriormente: (1) o primeiro ciclo é o que liberta mais energia; (2) a curva da energia dissipada do segundo ciclo e do terceiro são semelhantes porque são repetições do procedimento efetuado para o primeiro ciclo.

Comparando os gráficos relativos a ligações de referência (Figura 5.15 (a)) e a ligações envelhecidas (Figura 5.15 (b)) vê-se uma pequena redução da energia dissipada nos ensaios das ligações envelhecidas, provavelmente devido aos danos que o envelhecimento provocou na madeira.

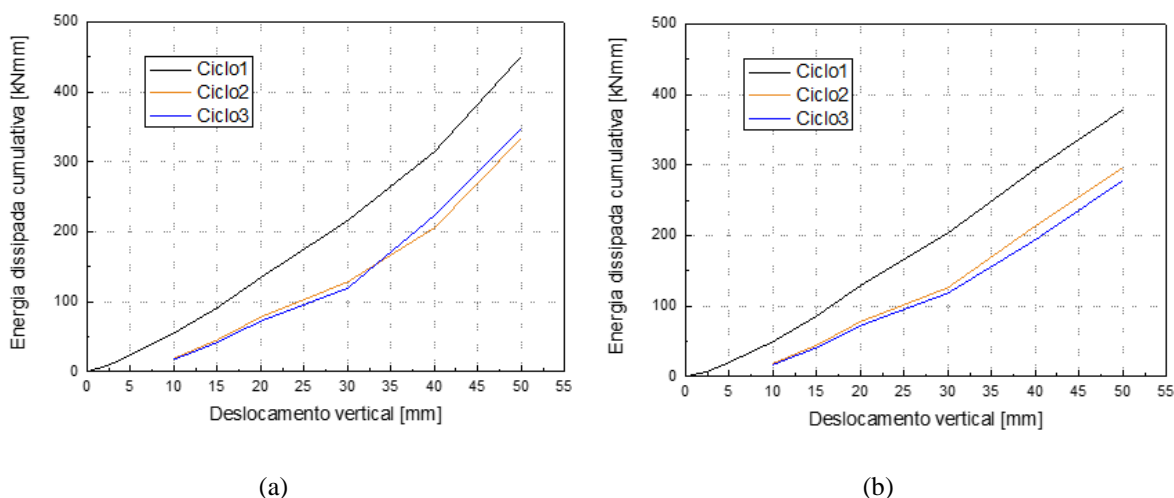


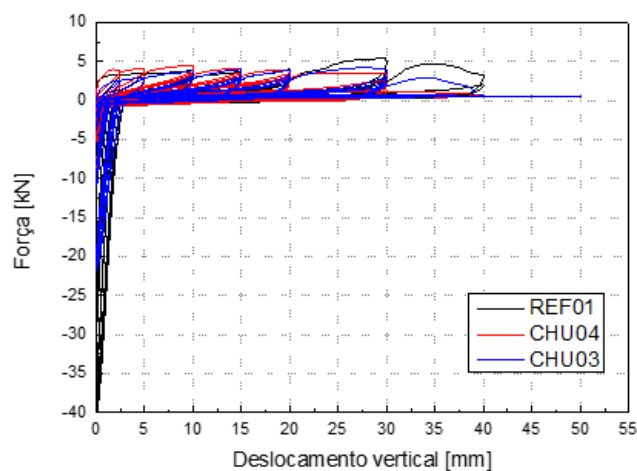
Figura 5.15 - Gráfico comparativo da energia dissipada ao longo do ensaio *pull-out* por ciclos: (a) Ligação de referência; (b) Ligação envelhecida.

Comparando os resultados obtidos nos ensaios realizados nas ligações não reforçadas, a principal conclusão é que não existe grande diferença nos parâmetros medidos entre as ligações que foram envelhecidas por aspersão/secagem (CHU) e as ligações não envelhecidas (REF). A Tabela 5.1 resume os resultados obtidos nestes ensaios, para as ligações de referência e envelhecidas, relativamente à força máxima e à rigidez inicial das ligações. No caso da força máxima consegue-se verificar uma pequena redução no valor da força máxima das ligações envelhecidas relativamente à referência.

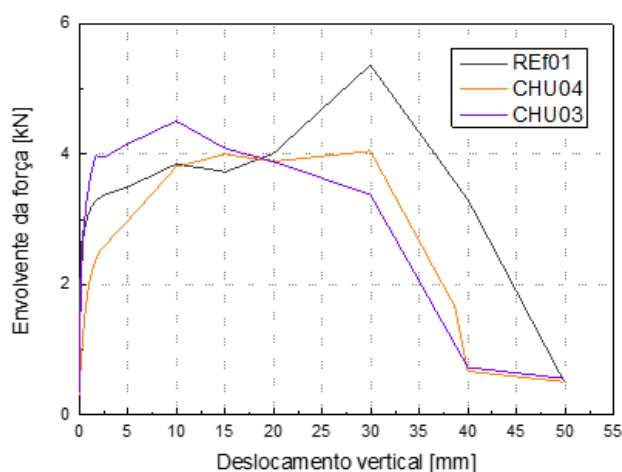
Tabela 5.1 – Força máxima e rigidez inicial das ligações não reforçadas (de referência e envelhecidas).

	$F_{max}$ (kN)	$k_{in}$ (kN/mm)
<b>REF-8</b>	5,54	2,51
<b>REF-11</b>	5,37	15,93
<b>CHU-1</b>	4,19	1,95
<b>CHU-3</b>	4,51	11,17

A Figura 5.16 (a) mostra os diagramas força-deslocamento com todos os ensaios realizados nas ligações não reforçadas. Consegue-se verificar que em termos de força de tração não há grandes variações enquanto a força de compressão é muito superior para as ligações de referência do que as envelhecidas, como já foi referido anteriormente. Na Figura 5.16 (b) está a envolvente da força máxima para os primeiros ciclos de forma a ser mais fácil a leitura do gráfico.



(a)



(b)

Figura 5.16 – Gráficos comparativos da variação da força ao longo dos ensaios de todas as ligações não reforçadas: (a) Gráfico força-deslocamento; (b) Envolvente da força máxima atingida em cada ciclo.

No gráfico da Figura 5.17 estão representadas as curvas de dissipação de energia por ciclo ao longo de todos os ensaios realizados em ligações não reforçadas. O gráfico mostra uma ligeira redução da energia dissipada nas ligações envelhecidas quando comparadas com as ligações de referência. Esta redução é tão pequena que se pode concluir que o envelhecimento efetuado não influenciou significativamente a dissipação de energia.

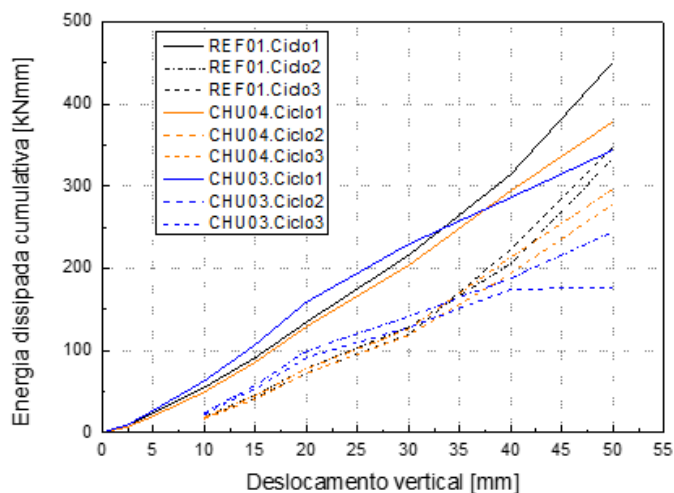


Figura 5.17 – Energia dissipada ao longo dos ensaios pull out em ligações não reforçadas.

Após os ensaios terminarem, foi medido o teor de humidade nas zonas da ligação junto ao prego, ou seja, na zona da viga e do prumo que não tinham contacto com o exterior e portanto diferentes condições de secagem. Verificou-se que as ligações de referência tinham um teor de humidade entre 8 e 10% enquanto as ligações envelhecidas tinham um teor de humidade entre 14 e 30%. Na Figura 5.18 consegue-se verificar que a madeira se encontrava muito mais seca no exterior do que nas zonas interiores de contacto madeira/madeira.



Figura 5.18 – Fotografia da parte interior de uma ligação envelhecida.

### 5.3.2. Ligações reforçadas

Relativamente aos ensaios *pull-out* em ligações reforçadas, o comportamento visualizado durante os mesmos, era semelhante para as ligações envelhecidas (CHU) e as não envelhecidas (REF). A resposta do ensaio é caracterizada por: (i) tentativa de movimento ascendente do prumo; (ii) descarga do prumo de forma a voltar à posição inicial; (iii) descolagem do reforço da parte de trás da ligação (parte em que não se vê o prego) de forma a permitir a ascensão do prumo (Figura 5.19 (a)); (iv) rompimento do reforço da parte da frente da ligação de forma a permitir a tentativa do prumo voltar à posição inicial e a ascensão do mesmo (Figura 5.19 (b)). O quarto ponto (iv) deve-se à deformação plástica do prego tal como foi explicado para as ligações não reforçadas. Esta deformação não permite que o prumo volte ao ponto inicial criando tensão na fibra da frente.



Figura 5.19 -Fotografias de um ensaio *pull-out* numa ligação reforçada e o comportamento do reforço ao longo do ensaio: (a) cedência da cola epoxy e descolamento do reforço na parte de trás da ligação; (b) deformação/rutura da fibra de vidro na parte frontal da ligação

Na Figura 5.20 está representada a evolução do deslocamento do prumo para fora do plano ao longo dos ensaios de ligações de referência e de ligações envelhecidas. Os LVDT3 e LVDT4 registam o deslocamento do prumo para fora do plano do lado direito e esquerdo da ligação, respetivamente (ver Figura 5.3).

Dos gráficos consegue-se concluir que, tanto para ligações envelhecidas como para não envelhecidas, há dois pontos de interesse: (i) quando se aplica 5 mm de deslocamento vertical, o deslocamento para fora do plano sofre um grande aumento, o que significa que foi o momento em que o reforço da parte de trás da ligação se separou; (2) quando se aplica um deslocamento de 20 mm o comportamento da ligação assemelha-se ao verificado nas ligações não reforçadas, o que significa que aproximadamente aos 20mm o reforço deixa de fazer efeito. Uma diferença visível entre os gráficos analisados é que existe um maior deslocamento na ligação de referência

(Figura 5.20 (a)) do que na ligação envelhecida (Figura 5.20 (b)). Tal como para as ligações não reforçadas, também estes gráficos confirmam que a deformação plástica do prego provoca uma impossibilidade do prumo voltar à sua posição inicial, o que já tinha sido visualizado durante os ensaios. Assim, ao longo do ensaio a ligação exibe valores de deslocamento para fora do plano crescente, ou seja, valores de abertura da ligação crescentes.

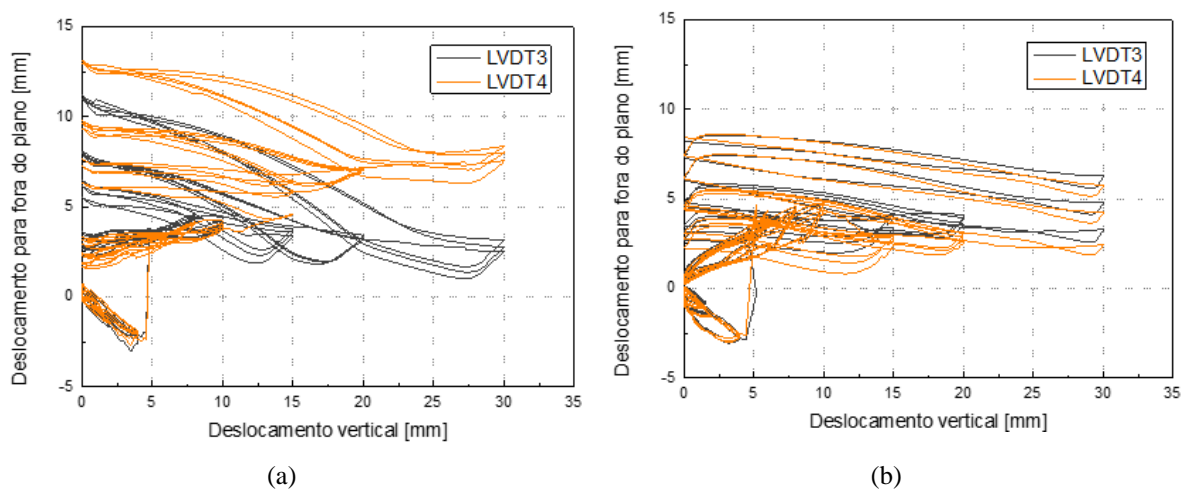


Figura 5.20 – Variação do deslocamento do prumo para fora do plano ao longo do ensaio *pull-out* de ligações reforçadas: (a) ligação de referência; (b) ligação envelhecida.

Os valores de deslocamentos para fora do plano são maiores quanto maior for a deformação vertical aplicada, ou seja, quanto maior for a deformação do prego. No final dos ensaios foi observada uma abertura permanente nas ligações, sendo maior na parte inferior do poste e mais baixo na parte superior. Tanto nas ligações de referência (REF) como nas ligações envelhecidas (CHU) o valor foi sempre aproximadamente de 10 mm.

A Figura 5.21 apresenta diagramas força-deslocamento típicos obtidos nos ensaios de ligações reforçadas de referência e envelhecidas. Nestes gráficos é possível verificar que nas zonas de descarga existe uma perda imediata de força seguida de um aumento muito rápido das tensões de compressão. Estas forças de compressão estão relacionadas com a deformação plástica do prego que dificulta o regresso da ligação à posição inicial. Tanto no gráfico relativo a ligações de referência (Figura 5.21 (a)) como no gráfico relativo a ligações envelhecidas (Figura 5.21 (b)) é possível verificar que aproximadamente quando o deslocamento vertical é da ordem dos 5mm há uma grande queda no valor da força. Este decréscimo de força corresponde ao descolamento do reforço da parte de trás da ligação.

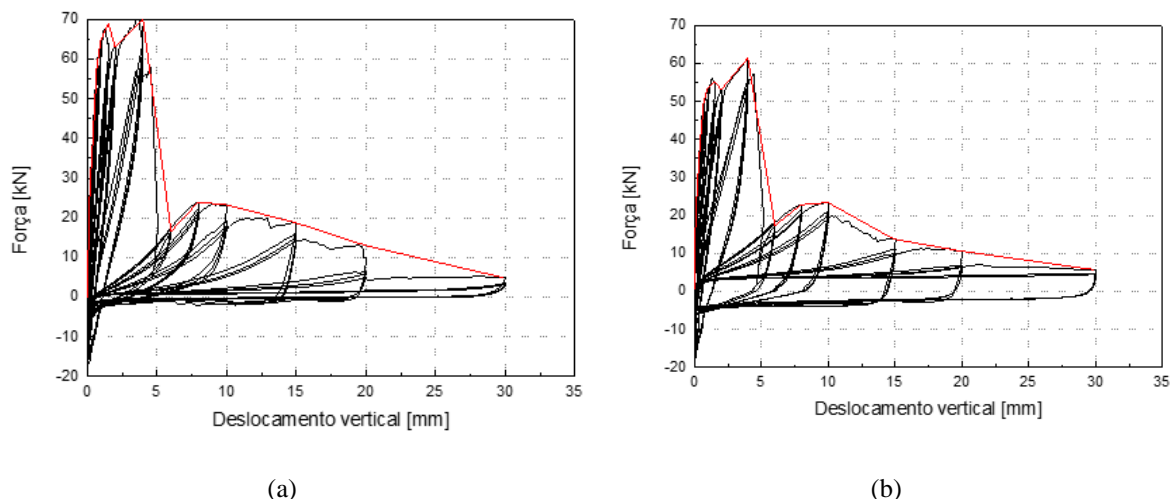


Figura 5.21 – Gráficos força-deslocamento de ensaios *pull-out* em ligações reforçadas: (a) ligação de referência; (b) ligação envelhecida.

Tal como foi feito para as ligações não reforçadas, também foi analisada a evolução da rigidez ao longo do ensaio das ligações reforçadas. O método para cálculo da rigidez secante utilizado foi o mesmo que está descrito na seção 5.3.1. Através dos diagramas ilustrados na Figura 5.21 consegue-se verificar que a ligação inicialmente tem uma rigidez bastante elevada e que ao longo do ensaio vai perdendo essa rigidez registando-se um grande decréscimo de rigidez por volta dos 5mm de deslocamento vertical. Esta diminuição de rigidez relativa aos primeiros ciclos de cada ligação está representada na Figura 522 (a) através do gráfico rigidez-deslocamento. Pode-se concluir que não há grandes diferenças entre a variação da rigidez ao longo do ensaio para ligações envelhecidas (CHU) ou não envelhecidas (REF). O descolamento do reforço acontece para uma rigidez ligeiramente mais baixa nas ligações de referência do que nas ligações envelhecidas.



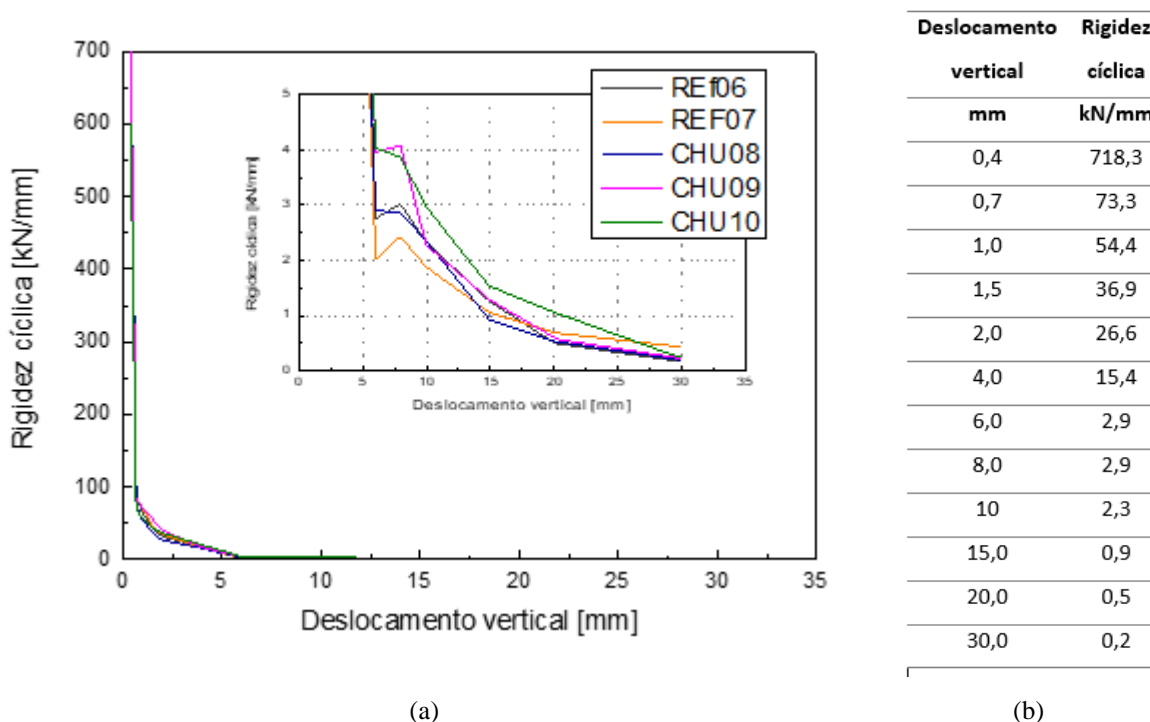


Figura 5.22 – Variação da rigidez cíclica das ligações reforçadas ao longo dos ensaios *pull-out*: (a) Gráfico rigidez-deslocamento para todas as ligações; (b) tabela exemplo dos valores experimentais.

Ao verificar os valores que dão origem à curva da rigidez-deslocamento (Figura 5.22 (b)) verifica-se que existem dois momentos importantes: (1) na passagem dos 0,4mm para os 0,7mm há uma redução da rigidez para 1/10; (2) na passagem dos 4mm para os 6mm há uma redução da rigidez para 1/3. O primeiro momento diz respeito ao descolamento do reforço enquanto o segundo é o momento em que o reforço deixa de atuar.

De seguida é apresentado o estudo relativo à energia dissipada ao longo dos ensaios. O cálculo da energia dissipada foi efetuado de modo análogo ao que foi feito para as ligações não reforçadas. Os resultados tipo estão representados na Figura 5.23. As principais conclusões que se retiram destes gráficos são semelhantes às obtidas para as ligações não reforçadas: (1) o primeiro ciclo é o que liberta mais energia; (2) a curva da energia dissipada do segundo ciclo e do terceiro são semelhantes porque são repetições do procedimento efetuado para o primeiro ciclo.

Quando comparados os resultados obtidos para ligações de referência (Figura 5.23 (a)) e para as ligações envelhecidas (Figura 5.23 (b)) verifica-se que o envelhecimento não provocou variações significativas na quantidade de energia dissipada por ciclos.

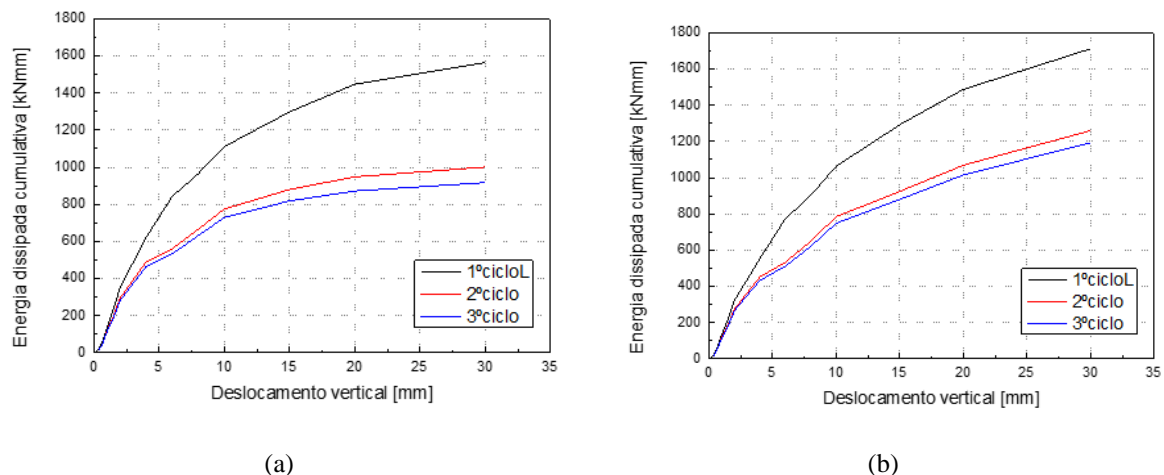


Figura 5.23 - Energia dissipada ao longo do ensaio *pull-out* por ciclos: (a) Ligação de referência; (b) Ligação envelhecida

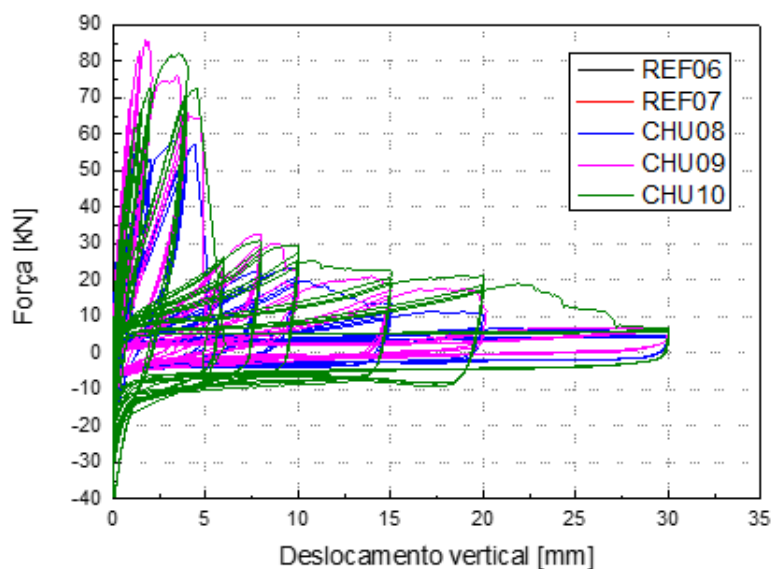
De seguida encontra-se um resumo da comparação dos diferentes parâmetros analisados (resistência, deslocamento do prumo para fora do plano, rigidez cíclica e energia dissipada) entre as ligações reforçadas que foram ensaiadas em ensaios *pull-out*. A principal conclusão é que não existe grandes diferenças nos parâmetros medidos entre as ligações que foram envelhecidas por aspersão/secagem (CHU) e as ligações não envelhecidas (REF).

A Tabela 5.2 resume os resultados obtidos nestes ensaios, para as ligações de referência e envelhecidas, relativamente à força máxima e à rigidez inicial das ligações. No caso da força máxima pode-se concluir que não há variação significativa dos valores.

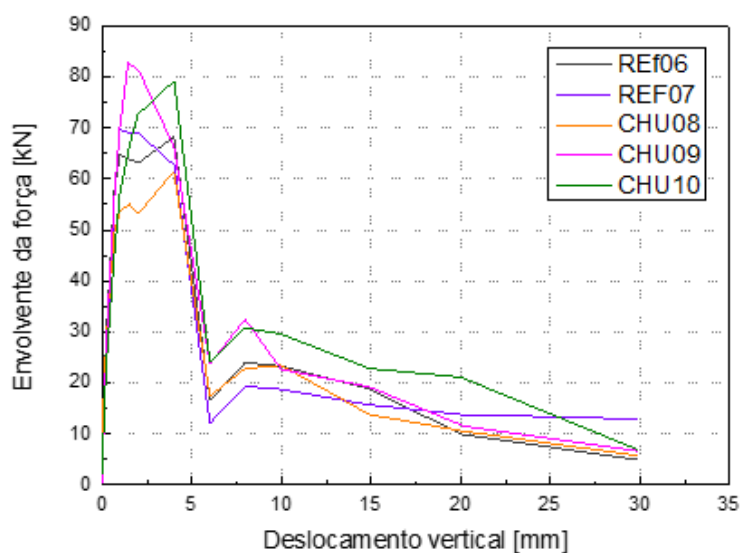
Tabela 5.2 - Resultados obtidos nos ensaios *pull-out* das ligações reforçadas de referência e envelhecidas.

	$F_{max}$ (kN)	$k_{in}$ (kN/mm)
<b>REF-5</b>	70,38	136,29
<b>REF-7</b>	74,04	76,50
<b>CHU-4</b>	61,48	142,09
<b>CHU-6</b>	85,98	94,38
<b>CHU-10</b>	82,16	67,78

A Figura 5.24 (a) ilustra o diagrama força-deslocamento com todos os resultados dos ensaios *pull-out* das ligações reforçadas. Consegue-se verificar que em termos de força de tração não há grandes variações tal como já tinha sido verificado na Tabela 5.2. Na Figura 5.24 (b) está a envolvente da força máxima para os primeiros ciclos de forma a ser mais fácil a leitura dos resultados.



(a)



(b)

Figura 5.24 – Gráficos comparativos da variação da força ao longo dos ensaios de todas as ligações reforçadas: (a) Gráfico força-deslocamento; (b) Envolvete da força máxima atingida em cada ciclo.

Através dos gráficos apresentados na Figura 5.24 conclui-se que as ligações envelhecidas – (CHU) e as ligações de referência (REF) apresentam comportamento muito semelhantes ao longo dos ensaios.

Relativamente à dissipação de energia para todas as ligações, analisando o gráfico representado na Figura 5.25, pode-se concluir que o envelhecimento não teve influência significativa na quantidade de energia dissipada.

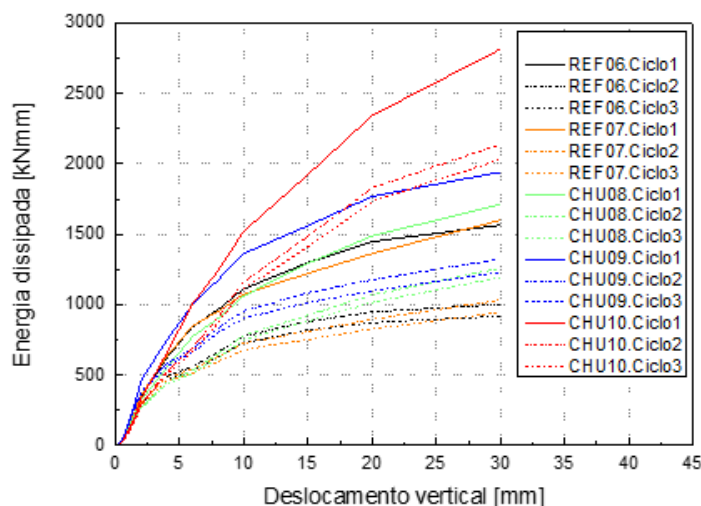


Figura 5.25 – Energia dissipada, por ciclo, de todas as ligações reforçadas que foram ensaiadas.

#### 5.4. Comparação das ligações reforçadas e não reforçadas

Apresenta-se nesta seção a comparação dos parâmetros obtidos para as ligações reforçadas e não reforçadas de forma a verificar o efeito do reforço numa ligação.

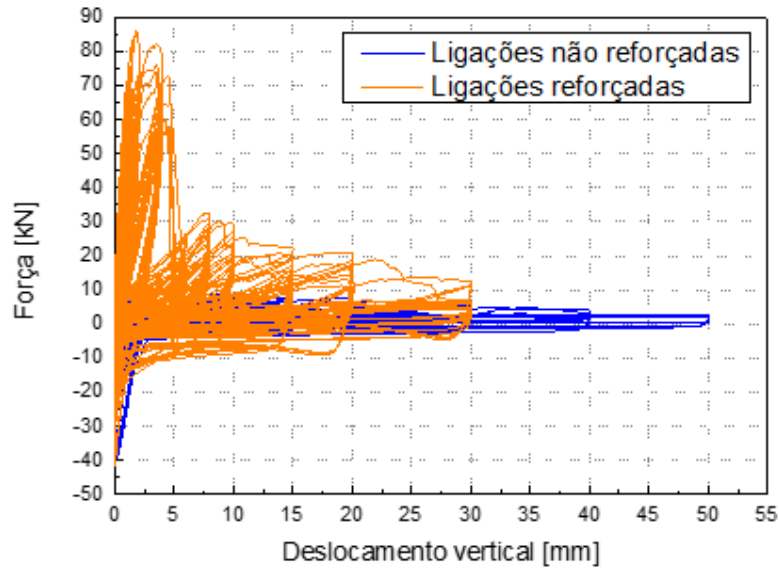
Comparando a evolução da força ao longo dos ensaios (Figura 5.26) pode-se concluir que:

- a força máxima atingida nas ligações reforçadas é aproximadamente 10 vezes maior do que nas ligações não reforçadas;
- no momento em que o reforço cede as curvas das ligações reforçadas tendem a aproximar-se das curvas das ligações não reforçadas.

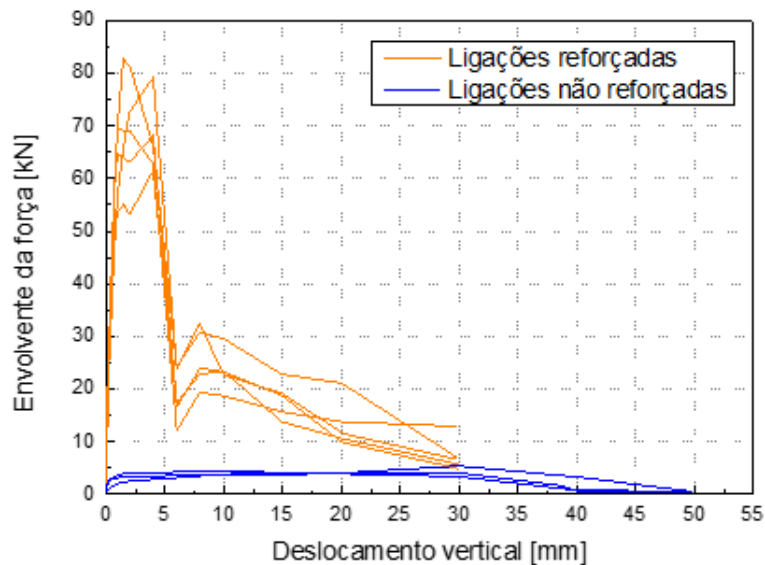
Através do gráfico da Figura 5.27 é possível analisar a diferença do decréscimo da rigidez cíclica das ligações reforçadas e não reforçadas. As principais conclusões são:

- a rigidez inicial das ligações reforçadas é 100 vezes superior à das ligações não reforçadas;
- perto dos 30mm a rigidez cíclica das ligações reforçadas e não reforçadas tendem a aproximar-se, concluindo que o reforço já não está a fazer efeito.

Relativamente à energia dissipada existe uma grande diferença de valores entre as ligações reforçadas e as não reforçadas sendo que a energia dissipada em ligações reforçadas com fibra de vidro é muito superior do que a libertada por ligações não reforçadas (Figura 5.28).



(a)



(b)

Figura 5.26 – Evolução da força ao longo de ensaios *pull-out* em ligações reforçadas e não reforçadas: (a) Gráfico força-deslocamento; (b) Envolvente da força máxima da cada ciclo.

Com os gráficos da Figura 5.29 é possível comparar o deslocamento do prumo para fora do plano em função do deslocamento vertical. A principal conclusão é que as ligações não reforçadas sofrem um deslocamento 3 vezes maior do que as ligações reforçadas. Isto deve-se ao facto do reforço impedir o movimento da ligação.

Com este estudo pode-se então confirmar que as ligações reforçadas são muito mais resistentes do que as não reforçadas e que o envelhecimento por ciclos de aspersão e secagem não afetou muito as características da madeira, da ligação e do reforço.

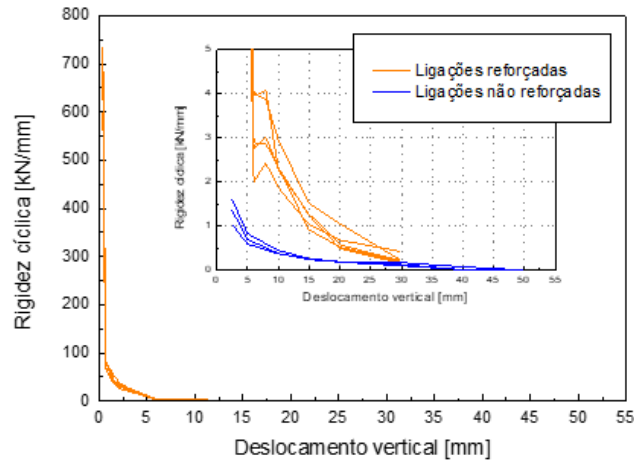


Figura 5.27 – Gráfico comparativo da evolução da rigidez cíclica em ligações reforçadas e não reforçadas.

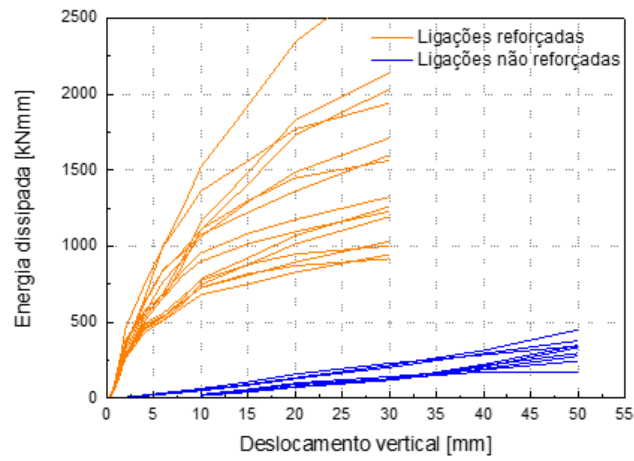


Figura 5.28 – Gráfico comparativo da evolução da dissipação de energia em ligações reforçadas e não reforçadas.

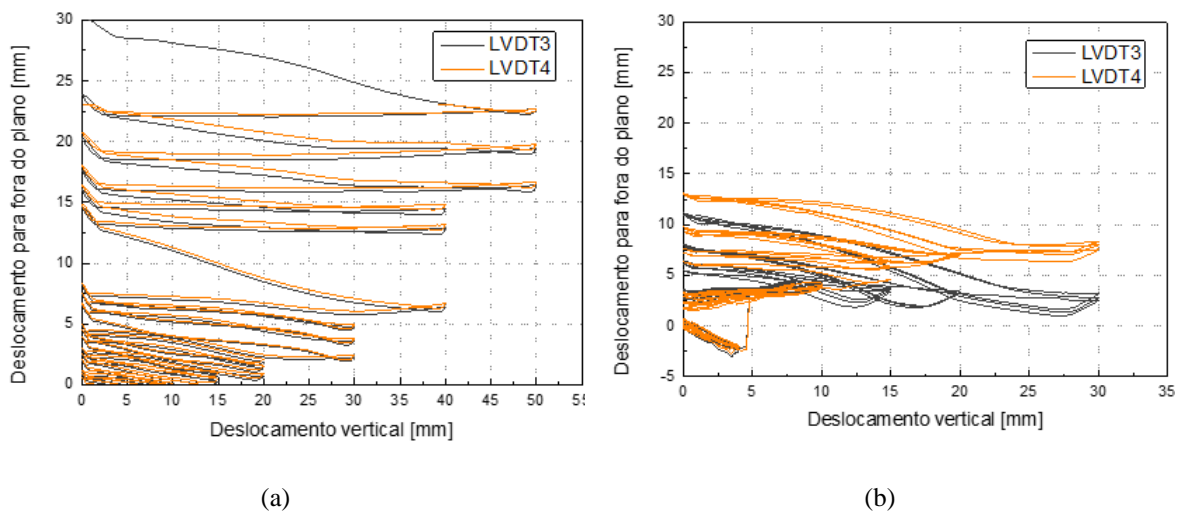


Figura 5.29 – Evolução do deslocamento do prumo para fora do plano em função do deslocamento vertical: (a) ligação não reforçada; (b) ligação reforçada.

## 5.5. Comentários finais

Deste capítulo foi possível avaliar a influencia do envelhecimento por ciclos de molhagem por aspersão e ciclos de secagem no comportamento de ligações tradicionais a ensaios de tração cíclica.

As conclusões retiradas ao longo deste trabalho relativas tanto às ligações reforçadas como às ligações não reforçadas estão listadas de seguida:

- a resposta visual das ligações envelhecidas e não envelhecidas durante o ensaio foram semelhantes. Em ambas as ligações verificou-se que o comportamento plástico do prego impede o prumo de voltar à posição inicial provocando um deslocamento do mesmo para fora do plano;
- no final dos ensaios foi possível verificar que o prego se encontrava deformado em ambos os tipos de ligação, mas nas ligações envelhecidas o prego encontrava-se enferrujado e com alguma rotação. O interior das ligações envelhecidas também se encontrava ainda com alguma humidade;
- tanto no que diz respeito à rigidez cíclica como à energia acumulada conclui-se que o envelhecimento acelerado efetuado nas ligações não provocou nenhuma alteração destes valores.

Exclusivamente nas ligações não reforçadas:

- as ligações de referência precisavam de uma maior força de compressão para tentar colocar o prumo na posição inicial, cerca do dobro da força necessária para as ligações envelhecidas;
- relativamente à força máxima atingida foi possível verificar que as ligações de referência atingiram a força máxima para um deslocamento ascendente (30mm) superior às ligações envelhecidas (10mm).

Nas ligações reforçadas:

- durante o ensaio foram verificados dois momentos importantes que ocorreram sempre para os mesmos deslocamentos verticais aplicados, tanto nas ligações envelhecidas como nas não envelhecidas: descolagem do reforço na parte de trás da ligação aos 5mm e rotura completa do reforço na parte da frente da ligação aos 20mm.
- a força máxima atingida é semelhante para as ligações envelhecidas e não envelhecidas, logo o envelhecimento não teve efeito algum no comportamento do reforço (GFRP).





## 6. CONCLUSÕES

Este último capítulo resume as principais conclusões retiradas do estudo efetuado e apresentado neste documento, ou seja, as principais conclusões relativamente (1) aos diferentes processos de envelhecimento efetuados e à sua eficácia, (2) aos resultados do estudo das propriedades físicas e químicas da madeira, e (3) ao comportamento das ligações reforçadas e não reforçadas com o envelhecimento.

Relativamente aos ensaios de envelhecimento efetuados, tanto nos provetes pequenos como nas ligações, estes provocaram o aparecimento de vários defeitos, como por exemplo fissuras, alteração da cor da madeira, variação dimensional dos provetes, perda de resina e abertura da ligação viga-prumo.

Relativamente aos ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras da madeira, nos provetes de referência e nos provetes envelhecidos por ciclos de imersão e secagem (CHL, CHL-I, CHL-TR) e por ciclos de aspersão e secagem (CHU) pode dizer-se que o comportamento geral é uma diminuição das propriedades da madeira com o envelhecimento, independentemente do tipo de envelhecimento, confirmando que a madeira envelhecida tem uma resistência inferior à madeira nova. Em todos os testes nos provetes envelhecidos por ciclos de imersão e secagem verificou-se uma diminuição acentuada da resistência ao fim de 3 ciclos de envelhecimento seguida de um aumento quando envelhecida por 6 e 12 ciclos. Este resultado parece indicar que a madeira, em alguma etapa no processo de envelhecimento entre os 3 ciclos e os 6 ciclos, ganha resistência. Seria interessante futuramente estudar qual o ciclo em que ocorre este aumento da resistência da madeira.

Fazendo a comparação entre os diferentes tipos de envelhecimento e os seus efeitos foi possível concluir que a impermeabilização do sentido longitudinal dos provetes de madeira não fortalece o material. A segunda conclusão foi que a alteração das temperaturas no processo de envelhecimento proposto por McNatt e Link (1989) para temperaturas reais do dia-a-dia não revelou ser importante, ou seja, os resultados obtidos para a resistência à compressão da madeira foram equivalentes. Também se concluiu que a resistência da madeira no sentido perpendicular às fibras é significativamente inferior à resistência no sentido paralelo às fibras, como era expectável.

Relativamente ao estudo das ligações, apresenta-se de seguida as principais conclusões do estudo do efeito do envelhecimento acelerado e da influência do reforço.

O envelhecimento por ciclos de aspersão e secagem não provocou diferenças nos valores de rigidez cíclica, na quantidade de energia dissipada, nem no comportamento das ligações durante

o ensaio *pull-out* cíclico. Nas ligações não reforçadas verificou-se que o envelhecimento fez com que fosse necessária uma menor força de compressão para que o prumo voltasse ao ponto inicial do ensaio, ou seja, tornou mais fácil a deformação da madeira que rodeia o prego que liga o prumo à viga. Também se verificou que a força máxima ocorria para menores deslocamentos nos ensaios dos provetes envelhecidos. Relativamente às ligações reforçadas a principal conclusão foi que o envelhecimento não teve efeito significativo no comportamento do reforço (G-FRP).

No que diz respeito ao reforço pode-se concluir que ligações reforçadas com fibra de vidro quando comparadas com ligações não reforçadas têm uma resistência 10 vezes superior, uma rigidez inicial 100 vezes superior, uma energia dissipada durante o ensaio superior e sofrem um menor deslocamento do prumo para fora do plano. No entanto, este efeito desaparece após alguns ciclos de teste *pull-out* ficando a estrutura com propriedades semelhantes às das ligações não reforçadas. A permanência do efeito do reforço ocorre até deformações induzidas de ~5 mm (descolamento do reforço no lado contrario da fixação com prego) e ~30 mm (rutura do reforço na face de fixação do prego).

Com este estudo pode-se então confirmar que as ligações reforçadas são muito mais resistentes do que as não reforçadas e que o envelhecimento por ciclos de aspersão e secagem nas condições em que foram realizados não afeta muito as características da madeira, da ligação e do reforço.

### **6.1. Proposta de trabalhos futuros**

Com base nos resultados obtidos considera-se importante desenvolver trabalhos adicionais no âmbito da durabilidade da madeira com a realização de ensaios de envelhecimento em condições reais. Para este efeito poder-se-á:

- dimensionar uma campanha de ensaios de en com base no método de envelhecimento descrito na norma ASTM D1037 (2014) e comparar com os resultados obtidos neste trabalho de forma a verificar se o método proposto por Mcnat e Link é equivalente ao da norma;
- dimensionar uma campanha de ensaios num período de tempo mais alargado e submetendo os provetes a condições ambientais reais;

- realizar ensaios para simulação do efeito das cheias no comportamento de ligações tradicionais. Estes ensaios poderão ser efetuados em contexto laboratorial ou em contexto real;
- considerar o efeito das características químicas da água de imersão, considerando água poluída e não poluída em períodos prolongados, de preferência em um contexto real. Um largo numero de provetes será preciso para poder avaliar as características da madeira nas varias temporadas;
- estudar a degradação de outros tipos de reforço muito utilizados nas ligações de madeira;
- avaliar a degradação microbiana da madeira em relação aos efeitos de molhagem/secagem introduzidos.



## BIBLIOGRAFIA

- ASTM D143-14 (2014). *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*.
- Bernett, J. e Jeronimidis, G. (2003). *Wood Quality and its Biological Basis*.
- Bradley, A.C., Chang, W.S. e Harris, R. (2015). *The effect of simulated flooding on the structural performance of light frame timber shear walls – An experimental approach*. United Kingdom.
- Branco, J.M. e Sousa, H.S. (2014). *Métodos de Inspeção e Classificação Visual de Elementos de Madeira*. Universidade do Minho, Guimarães.
- Custódio, J., Broughton, J. e Cruz, H. (2008). *A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints*.
- Carvalho, A. (1996). *Madeiras portuguesas: estrutura anatómica, propriedades, utilizações: Vol I*.
- Dietsch, P., Franke, S., Franke, B., Gamper, A. e Winter, S. (2014). *Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts*.
- EN 12512 (2001). *Timber structures. Test methods. Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners*.
- EN 408 (2003). *Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*.
- Feeny, F.E., Chivers, R.C., Evertsen, J.A. e Keating, J. (1998). *The influence of inhomogeneity on the propagation of ultrasound in wood*.
- Forest Products Laboratory. (1999). *Wood handbook—Wood as an engineering material*. Madison, WI: U.S.
- Fredriksson, M. (2013). *Moisture conditions in rain exposed wood joints - Experimental methods and laboratory measurements*. LUND UNIVERSITY.
- Harris, C.M. (2006). *Dictionary of architecture & construction*. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- ISO 3130 (1975). *Determination of moisture content for physical and mechanical tests*.
- Isopescu, B. (2016). *Analysis of the behaviour of traditional carpentry joints - effects of extreme climatic conditions*. Tese Mestrado, Universidade do Minho.
- Júnior, J.A. (2006). *Avaliação não Destrutiva da Capacidade Resistente de Estruturas de Madeira de Edifícios Antigos*. Porto: Dissertação de Mestrado.

- Kojima, Y. e Suzuki, S. (2010). *Evaluation of wood-based panel durability using bending properties after accelerated aging treatments.*
- Lourenço, P.B. e Branco, J.M. (2013). Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI. Em A. Sousa Melo, & M. Ribeiro, *HISTÓRIA DA CONSTRUÇÃO – ARQUITETURAS E TÉCNICAS CONSTRUTIVAS* (pp. 201-213). Braga: CITCEM – Centro de Investigação Transdisciplinar «Cultura, Espaço e Memória», LAMOP – Laboratoire de Médiévistique Occidentale de Paris (Université de Paris 1 et CNRS).
- Martins, J.G. e Araújo, J. (2005). *Materiais de Construção - Maderias.*
- Mascarenhas, J. (2005). *Sistemas de Construção - III, IV, V.* Livros Horizonte.
- McNatt, J. e Link, C. (1989). *Analysis of ASTM D 1037 accelerated-aging test.*
- Michael Ramage, H. B.-W.-T. (2016). *The wood from the trees: The use of timber in construction.*
- Niklewski, J., Fredriksson, M. e Isaksson, T. (2015). *Moisture content prediction of rain-exposed wood: Test and evaluation of a simple numerical model for durability applications.*
- Pacheco, A. (2010). *Ligações em Madeira.*
- Pereira, H., Graça, J. e Rodrigues, J.C. (2003). Wood chemistry in relation to quality. Em J. R. BARNETT, e G. JERONIMIDIS, *Wood Quality and its Biological Basis* (pp. 53, 54). Nottingham, UK: Blackwell.
- Poletti, E. (2013). *Characterization of the seismic behaviour of traditional timber frame walls.* Tese de Douturamento Universidade do Minho.
- Ramos, L., e Lourenço, P. B. (2000). *Análise das Técnicas de Construção Pombalina e Apreciação do estado de Conservação Estrutural do Quarteirão do Martinho da Arcada.* Guimarães: Universidade do Minho.
- Riggio, M., Sandak, J. e Fra, S. (2015). *Application of imaging techniques for detection of defects, damage and decay in timber structures on-site.*
- Sattler, M.A. e Pereira, F.O. (2006). *Construção e Meio Ambiente - Volume 7.* Porto Alegre.
- Savvioni, C., Brimblecombe, P. e Cassar, M. (2010). *The Atlas of Climate Change Impact on European Cultural Heritage.* Anthem Press.
- Sobra, k., Fajman, P., e Branco, J. (2015). *Chapter 1 Rehabilitation of historical sites, buildings and structures examples and practices: Influence of the wood mechanical properties in the dovetail joint behavior.*
- Vasconcelos, G., Poletti, E., Salavessa, E., Jesus, A.M., Lourenço, P.B., e Pilaon, P. (2013). *In-plane shear behaviour of traditional timber walls.*

Žlahtič, M. e Humar, M. (2017). *Wood weathering, moisture: Influence of Artificial and Natural Weathering on the Moisture Dynamic of Wood.*

Zwerger, K. (1997). *Wood and Wood Joints - Building Traditions of Europe, Japan and China.*

# ANEXO I – FICHA DE INSPEÇÃO

## Ficha de inspeção

### Análise das características gerais

Provete: PNPN 90 CHU 01  
Data: 19 de Junho de 2017  
Espécie da madeira: Pinus pinaster  
Secção (b x h): 51,53 x 51,35(mm<sup>2</sup>)  
Massa volúmica (kg/mm<sup>3</sup>): 635,21

### Anéis de crescimento

Largura dos anéis de crescimento: 2,40 mm  
Taxa de crescimento: 0,11

### Análise dos defeitos

Nós  Isolados  Agrupados

$\Sigma d$ : 13,4 mm

b: 51,53 mm

Ag: 0,26

#### Fendas

Comprimento 112,27 mm

Profundidade 3,12 mm

Comprimento 46,88 mm

Profundidade 5,60 mm

### Fotografias

