

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

**Identificação das propriedades de difusão e de fratura
em modo I da madeira de *Picea abies* L.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

José Miguel Guedes Leite Igreja Cardoso

Professor Amadeu Borges

Professor Nuno Dourado



Vila Real, 2015

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

**Identificação das propriedades de difusão e de fratura
em modo I da madeira de *Picea abies* L.**

José Miguel Guedes Leite Igreja Cardoso

Dissertação apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica do Professor Doutor Amadeu Duarte da Silva Borges e co-orientação científica do Professor Doutor Nuno Miguel Magalhães Dourado, ambos do Departamento de Engenharias da Escola de Ciências e Tecnologias da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Vila Real, 2015

Aos meus pais e irmã.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor Amadeu Borges e ao Professor Nuno Dourado pela orientação, pelo apoio, pela partilha de conhecimentos e pela disponibilidade no decorrer da dissertação.

Gostaria também de agradecer ao Sr. Armindo das Oficinas do Departamento de Florestal, pela ajuda na produção dos provetes utilizados na fase experimental da dissertação e ao Eng. Cristóvão Santos das Oficinas Mecânicas, pelo auxílio no fabrico de acessórios.

Agradeço também ao Fábio Pereira toda a disponibilidade que mostrou e o conhecimento transmitido ao longo deste percurso.

Aos meus companheiros da Universidade, deixo um agradecimento especial ao David Rodrigues, Fábio Nunes, Pedro Panóias, André Teixeira, Ana Cláudia, Cristiana Vaz, Diana Granja e Daniela Justo pelo apoio e pelos bons momentos passados durante estes anos.

Agradeço aos meus amigos, a todos sem exceção, a amizade e o incentivo que me deram durante esta caminhada.

Deixo um agradecimento à minha família e em especial à minha irmã e aos meus pais pelo apoio incondicional durante estes anos e sem os quais nada disto seria possível.

Para finalizar, gostaria de agradecer à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro que disponibilizou todas as condições, materiais e equipamentos para a realização desta dissertação.

Resumo

A construção de estruturas em madeira tem sido vista cada vez com mais frequência, não só numa perspectiva de beleza arquitetónica mas também numa tentativa de responder a preocupações relacionadas com a persecução de um desenvolvimento económico sustentável.

A madeira é um material heterogéneo e anisotrópico, apresenta por isso uma grande variabilidade nas suas propriedades mecânicas. A degradação destas propriedades, causadas pela variação do teor de humidade, é um fator que tem consequências na vida útil de uma estrutura de madeira. Deste modo, torna-se importante estudar a difusão da água neste material e de quantificar o modo como esta afeta as propriedades de fratura.

Quando submetida à fratura, a madeira comporta-se como um material quase-frágil, caracterizando-se pela formação de uma zona de processo de fratura (ZPF) de dimensões não negligenciáveis, localizada na extremidade da fenda, onde surgem fenómenos de degradação local, responsáveis pela dissipação de energia não desprezável, tornando previsível o colapso mecânico do material.

Esta dissertação tem como objetivo identificar as propriedades de difusão da água e as propriedades de fratura em modo I da madeira de *Picea abies* L. Para tal, submeteu-se este material a ensaios de difusão e ensaios de fratura em modo I, usando provetes de configuração DCB (*Double Cantiliver Beam*). Ambos os estudos de difusão e de fratura tiveram uma componente experimental e uma componente numérica. Na componente experimental determinou-se o ganho de massa M dos provetes e os respetivos coeficientes de difusão D , realizando-se de seguida um estudo de caracterização à fratura em modo I, nos mesmos provetes (com diferentes teores de humidade), no sentido de se avaliar as curvas de *Resistência* (curvas- R) do material nessas condições. Recorreu-se ao modelo de Fick para determinar as propriedades de difusão da água na madeira. Este procedimento foi realizado com base em informação experimental, anteriormente recolhida nos ensaios de difusão. Para determinar um dos parâmetros fundamentais de fratura (i.e., a taxa crítica de libertação de energia de fratura em modo I, G_{Ic}), a usar na modelação numérica, recorreu-se ao método de calibração de flexibilidade baseado na Teoria de Vigas, CBBM (*Compliance Based Beam Method*). Este método apresenta a vantagem de dispensar a medição do comprimento de fenda durante o ensaio de fratura. Foi assim possível obter a evolução da taxa crítica de libertação de energia em modo I com o ganho de massa de água nos provetes ensaiados.

Abstract

Wood timber constructions are becoming more popular in developed countries, not just due to its architectural beauty but also as the result of increasingly environmental sustainable development concerns.

Wood as a heterogynous and anisotropic material, presents a large scatter in its mechanical properties. The degradation of its mechanical properties, due to the variation of moisture content, has a significant impact on its durability. As a consequence, the investigation of moisture diffusion in wood with the purpose to quantify the impact of water content in wood mechanical properties is thus very relevant.

Wood exhibits a quasi-brittle behaviour, characterized by the developed of a non-negligible fracture process zone (FPZ) in the vicinity of the crack tip. This non-linear region is responsible for the energy release, being the consequence of failure mechanisms like micro-cracking and fibre-bridging, that allows identifying the final failure.

This Thesis aims at identifying both the wood *Picea abies* L. moisture diffusion properties and its fracture properties under mode I loading. Hence, wood has been submitted to diffusion and mode I loading fracture tests. Both studies have been performed experimentally and numerically. In regards to the diffusion analysis, an evaluation of the mass gain content and the diffusion coefficient of wood has been accomplished. The Fick model has been employed to evaluate moisture diffusion properties of tested wood. This procedure was executed using experimental data previously gathered in the experimental campaign. The *Double Cantiliver Beam* (DCB) test has been chosen to perform the fracture characterization of wood. Fracture tests involved specimens with different moisture contents under quasi-static loading. The *Resistance-curve* (*R-curve*) was obtained to evaluate the fracture toughness of wood (G_{Ic}). This has been undertaken by applying the Compliance Based Beam Method (CBBM), which dispenses the crack length monitoring in the course of the loading process. The generated data has allowed evaluating the influence of moisture diffusion properties on *Picea abies* L. fracture toughness under mode I loading.

Nomenclatura

- a – Comprimento de fenda;
- a_0 – Comprimento de fenda inicial;
- a_e – comprimento de fenda equivalente
- B – Espessura do provete;
- c – Metade da rigidez;
- C – Flexibilidade;
- C_0 – Flexibilidade inicial;
- C_{sat} – concentração de saturação;
- CBBM* – *Compliance Based Beam Method*;
- CoV* – Coeficiente de variação;
- D – Coeficiente de Difusão;
- \mathbf{D} – matriz diagonal que contém o fator de penalidade;
- DCB* – *Double Cantilever Beam*;
- e – Parâmetro de dano global;
- E – Módulo de lasticidade (Young)
- \mathbf{E} – Matriz diagonal que contém os parâmetros de danos;
- E_f – Módulo de flexão;
- E_L – Módulo de elasticidade na direção longitudinal;
- f – Tensão;
- f_b – Tensão coesiva no ponto de inflexão;
- f_t – Tensão coesiva máxima;
- FPZ – Zona de processo de fratura;
- G_{fb} – Energia de fratura devido à ponte de fibras;
- G_{fu} – Energia de fratura devido à micro-fissuração;
- G_I – Taxa de libertação de energia em modo I;
- G_{IC} – Taxa de libertação de energia crítica em modo I;
- G_{LR} – Módulo de corte nas direções LR
- h – Altura de cada braço
- HR* – Humidade relativa
- \mathbf{I} – Matriz identidade
- I – Segundo momento de área;

k – Condutividade térmica;
 k – Parâmetro de rigidez ao fator de penalidade;
 M – Ganho de humidade;
 M_e – Ganho de humidade no equilíbrio;
 M_f – Momento fletor;
 M_i – Massa inicial do provete;
 M_t – Massa do provete no instante t
 P – Força aplicada durante o ensaio;
 R^2 – Coeficiente de correlação;
 U – Energia de deformação;
 V – Volume;
 w – Abertura de fenda;
 w_b – Abertura de fenda devido à ponte de fibras;
 w_c – Abertura crítica de fenda;
 w_0 – Abertura de fenda devido à micro-fissuração;
 W - Humidade
 Δ – Fator de correlação de Williams;
 δ – Deslocamento imposto aos provetes;
 δ – Matriz dos deslocamentos relativos;
 σ – Matriz das tensões;
 σ_I – Tensão em modo I de propagação;
 τ – Efeito de corte.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Nomenclatura	xi
Introdução	1
1.1 Conteúdo da Dissertação	2
1.2 Características da Madeira	2
1.3 Estrutura Macroscópica.....	3
1.4 Estrutura Microscópica	5
1.5 Defeitos e variações na madeira	7
1.6 A água na madeira.....	8
1.7 Tipos de água presentes na madeira	8
1.8 Mecanismos de transporte e humidade na Madeira	10
Modelo da difusão.....	12
2.1 Modelo da difusão de humidade	12
2.1.1 Modelo de Fick de difusão	12
2.1.2 Primeira lei de Fick da difusão.....	15
2.1.3 Segunda lei de Fick da difusão.....	15
Modelos coesivos	17
3.1 Comportamento à fratura da madeira	17
3.2 Modelos coesivos	18
3.3 Método CBBM.....	21
Procedimento Experimental	24
4.1 Programa Experimental.....	24
4.2 Preparação dos provetes	24
4.3 Preparação das atmosferas	26
4.4 Método das pesagens.....	27
4.5 Ensaios de fratura em modo I.....	29
Modelação numérica.....	33
5.1 Métodos Numéricos	33
5.2 Modelo da difusão.....	33
5.2.1 Concentração de água no equilíbrio e coeficiente de difusão	34
5.2.2 Solução analítica	35

5.2.3 Analogia entre transferência de calor e transferência de massa	36
5.2.4 Simulação numérica	38
5.2.4.1 Modelação ANSYS	39
5.2.4.2 Etapas do desenvolvimento do código	39
5.3 Modelação por Elementos Finitos	41
5.3.1 Curvas força-deslocamento	42
Análise de Resultados	44
6.1 Resultados dos ensaios de difusão e de fratura	44
6.2 Curvas experimentais de sorção	44
6.3 Propriedades da difusão	47
6.4.1 Curvas força-deslocamento experimentais.....	53
6.4.2 Curvas de <i>Resistência</i>	56
6.5 Propriedades de fratura.....	61
6.6 Variação de massa M vs G_{Ic}	66
Conclusões	69
Bibliografia.....	71

Índice de Figuras

Figura 1. 1 Direções de simetria da madeira: Longitudinal (L); Tangencial (L); Radial (R) (Meireles, 2013)	3
Figura 1. 2 Aspeto macroscópico de uma árvore resinosa (Xavier, 2003).....	4
Figura 1. 3 Esquema longitudinal dos traqueídeos inerentes ao lenho (Esteves, 2009)....	5
Figura 1. 4 Esquema tridimensional da estrutura celular de espécies resinosas (Xavier, 2003).....	6
Figura 2.1 Mistura binária (Esteves, 2009)	13
Figura 2.2 Vetor densidade de corrente (Esteves,2009).....	14
Figura 2.3 2ª Lei de Fick da difusão (Esteves, 2009)	16
Figura 3.1 Modos puros de fratura (Barreto, 2008).....	17
Figura 3.2 Sistemas de propagação de fenda na madeira (Dourado, 2010)	18
Figura 3.3 Zona de processo de fratura (ZPF) na extremidade da fenda de um material quase-frágil (Dourado, 2008)	19
Figura 3.4 Modelo de dano de Petersson.....	20
Figura 3.5 Cálculo de Δ	22
Figura 4. 1 Realização do entalhe na serra de fita	25
Figura 4.2 Especificações dos provetes para os ensaios experimentais	25
Figura 4. 3 Exemplo da identificação de um provete (proвете número 40 da humidade relativa 3).....	26
Figura 4. 4 Estufa utilizada nos ensaios de difusão	27
Figura 4. 5 Balança analítica de calibração automática.....	28
Figura 4. 6 Ligação do provete à máquina de ensaios com célula de carga de 100 kN, com a célula de carga de 5kN acoplada.....	29
Figura 4. 7 Máquina INSTRON com célula de carga de 2 kN.....	30
Figura 4. 8 Ligação do provete à máquina: (a) para a_{01} ; (b) para a_{02} ; (c) para a_{03}	32
Figura 4. 9 Propagação de fenda do provete para a_{03}	32
Figura 5.1 Curva característica de sorção.....	34
Figura 5.2 Malha de elementos finitos do ensaio DCB.....	42
Figura 5.3 Curva de <i>Resistência</i> típica	43
Figura 6.1 Curva de difusão obtida para HR1	44
Figura 6.2 Curva de difusão obtida para HR3	45
Figura 6.3 Curva de difusão obtida para HR4	46

Figura 6.4	Curvas de difusão obtidas para todas as humidades relativas usadas	47
Figura 6.5	Resultados obtidos para o ensaio de difusão da HR1	49
Figura 6.6	Resultados obtidos para o ensaio de difusão da HR3	50
Figura 6.7	Resultados obtidos para o ensaio de difusão da HR4	52
Figura 6.8	(a), (b) e (c) Curvas $P-\delta$ obtidas nos ensaios de fratura para os provetes sujeitos à HR1	53
Figura 6.9	(a), (b), (c), (d), (e) e (f) Curvas $P-\delta$ obtidas nos ensaios de fratura para os provetes sujeitos à HR3	55
Figura 6.10	(a), (b), (c), (d), (e) e (f) Curvas $P-\delta$ obtidas nos ensaios de fratura para os provetes sujeitos à HR4	56
Figura 6.11	(a), (b) e (c) Curvas- R obtidas nos ensaios de fratura para os provetes sujeitos à HR1	57
Figura 6.12	(a), (b), (c), (d), (e) e (f) Curvas- R obtidas nos ensaios de fratura para os provetes sujeitos à HR3	58
Figura 6.13	(a), (b), (c), (d), (e) e (f) Curvas- R obtidas nos ensaios de fratura para os provetes sujeitos à HR4	60
Figura 6.14	Deformada do provete na simulação por elementos finitos	62
Figura 6.15	(a) Acordo numérico-experimental da curva $P-\delta$ para o provete 1_70; (b) acordo numérico-experimental da curva- R para o provete 1_70.....	62
Figura 6.16	(a) Acordo numérico-experimental da curva $P-\delta$ para o provete 3_39; (b) acordo numérico-experimental da curva- R para o provete 3_39.....	63
Figura 6.17	(a) Acordo numérico-experimental da curva $P-\delta$ para o provete 3_56; (b) acordo numérico-experimental da curva- R para o provete 3_56.....	63
Figura 6.18	(a) Acordo numérico-experimental da curva $P-\delta$ para o provete 4_60; (b) acordo numérico-experimental da curva- R para o provete 4_60.....	63
Figura 6.19	Leis bilineares de dano para os provetes: 1_70; 3_39; 3_56 e 4_60.....	65
Figura 6.20	Variação de G_{Ic} com a variação de massa de água M para os provetes sujeitos à HR1	66
Figura 6.21	Variação de G_{Ic} com a variação de massa de água M para os provetes sujeitos à HR3.....	67
Figura 6.22	Variação de G_{Ic} com a variação de massa de água M para os provetes sujeitos à HR4.....	67
Figura 6.23	Variação de G_{Ic} com a variação de massa de água M dos últimos provetes a serem ensaiados de cada HR	68

Índice de Tabelas

Tabela 4. 1 Soluções utilizadas para preparação das atmosferas a 35°C.....	27
Tabela 5.1 Analogia entre as propriedades de transferência de calor e as propriedades de difusão a introduzir no ANSYS.....	37
Tabela 5.2 - Condições iniciais e de fronteira aplicadas na adsorção e na secagem	41
Tabela 5.3 Propriedades elásticas da madeira <i>Picea abies</i> L. usadas nas simulações por elementos finitos.....	42
Tabela 6.1 Parâmetros gerais utilizados nas simulações do ANSYS	48
Tabela 6.2 Parâmetros introduzidos no código para os provetes sujeitos à HR1	48
Tabela 6.3 Parâmetros introduzidos no código para os provetes sujeitos à HR3.....	50
Tabela 6.4 Parâmetros introduzidos no código para os provetes sujeitos à HR4.....	51
Tabela 6.5 Valores da taxa crítica de libertação de energia G_{Ic} para os provetes da HR1	57
Tabela 6.6 Valores da taxa crítica de libertação de energia G_{Ic} para os provetes da HR3	59
Tabela 6.7 Valores da taxa crítica de libertação de energia G_{Ic} para os provetes da HR4	61
Tabela 6.8 Parâmetros coesivos para os diferentes provetes.....	64
Tabela 6.9 Contribuição percentual dos fenómenos de amaciamento para G_{Ic}	66

CAPÍTULO I

Introdução

A madeira é um material heterogêneo e anisotrópico, e resulta da transformação de um organismo vivo, a árvore. São muitos os fatores que influenciam o seu crescimento, tais como a natureza do solo, as condições climáticas do local onde é produzida e a altitude. Como resultado destas condições externas, a que a árvore foi exposta, é possível observarmos diferenças, por vezes significativas, da dimensão dos anéis de crescimento da madeira. Os processos de transformação a que a madeira é sujeita, como o abate, a secagem e o armazenamento, podem também induzir alterações nas suas propriedades mecânicas (Stanzl-Tschegg SE et al., 1995). Apesar de o processo de secagem ser responsável pelo aumento de rigidez e de resistência da madeira, este também reduz a sua resistência à fratura.

Sendo um material tão complexo, tanto do ponto de vista morfológico como estrutural, torna-se necessário conhecer de forma aprofundada as suas propriedades físicas e mecânicas, de forma que se possa ter confiança na sua utilização em contexto estrutural. A madeira é um material relativamente leve e resistente, e é utilizada para os mais variados fins, como a construção civil, sob a forma de combustível para aquecimento, a gaseificação, entre outros. Este material biológico resulta da sobreposição anual de camadas sucessivas de lenho inicial e final, ao redor das camadas mais antigas.

De modo a obter-se uma melhor compreensão do comportamento da madeira, tanto nos seus processos de difusão como na fratura em modo I, neste Capítulo, pretende-se exhibir, de uma forma clara, uma revisão bibliográfica da anatomia da madeira, toda a complexidade da sua estrutura macro e microscópica, assim como a estrutura da sua parede celular.

1.1 Conteúdo da Dissertação

A presente Dissertação é constituída por seis Capítulos, cuja estrutura é aqui descrita.

Neste Capítulo é apresentada uma breve análise estrutural micro e macroscópica da madeira e são indicados os mecanismos de transporte de água no interior deste material.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica relacionada com trabalhos e métodos já realizados anteriormente, relativos tanto à difusão da água, como da fratura.

No Capítulo 3 são apresentados os processos realizados no trabalho experimental para a preparação dos provetes DCB e preparação das atmosferas a que estes foram submetidos.

O Capítulo 4 é reservado para os modelos utilizados para obtenção dos resultados, seguindo-se o Capítulo 5 com a análise desses mesmos resultados dos estudos numérico-experimentais.

Por fim, no Capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões retiradas ao longo de todo o trabalho.

1.2 Características da Madeira

Do ponto de vista botânico, as madeiras com interesse comercial provêm de dois grandes grupos (Kollman and Côté, 1984): Gimnospérmicas e Angiospérmicas. Nas Gimnospérmicas, a classe mais importante é a das Coníferas (ou resinosas), também

designadas na literatura como madeiras macias (*Softwoods*). Nas Angiospérmicas, distinguem-se as Dicotiledóneas (ou folhosas), usualmente designadas na literatura como madeiras duras (*Hardwoods*) (Esteves, 2009).

As coníferas ou resinosas diferenciam-se basicamente em traqueídos e parênquima. Os traqueídos desempenham as funções de condução da seiva bruta e de suporte, enquanto o parênquima garante a função de armazenamento das substâncias elaboradas no processo da fotossíntese (Oliveira, 2004). Nas madeiras resinosas é mais fácil distinguir o lenho inicial do lenho final, pois têm uma estrutura mais uniforme, sendo o lenho inicial menos denso que o lenho final. No caso das Folhosas, a especialização é

maior, possuindo células responsáveis pelo transporte da seiva bruta, células de armazenamento, parênquima axial e transversal, e vasos.

As árvores produtoras de madeira são plantas de elevada complexidade anatômica, sendo de salientar a sua organização hierárquica, explicando deste modo a variabilidade do comportamento mecânico da madeira e a sua anisotropia.

1.3 Estrutura Macroscópica

À escala macroscópica, a madeira é um material ortotrópico que exibe três direções distintas de simetria (Figura 1.1): a direção Longitudinal (L) que segue a direção das fibras principais e é perpendicular ao eixo da árvore, correspondendo à secção reta do tronco, onde se observam os anéis de crescimento; a direção Radial (R), que passa teoricamente na medula e segue a direção dos anéis de crescimento; e a direção Tangencial (T) que é paralela ao plano radial e tangente ao contorno de um qualquer anel de crescimento.

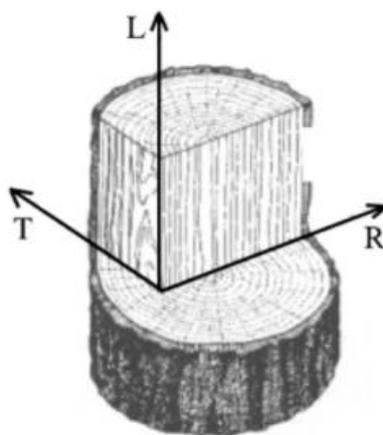


Figura 1.1 Direções de simetria da madeira: Longitudinal (L), Tangencial (L) e Radial (R) (Meireles, 2013)

Como material de construção, é normal apenas o aproveitamento da madeira do caule da árvore. Através de um corte transversal no tronco de uma árvore (Figura 1.2), podemos observar os elementos celulares que constituem o tecido lenhoso da madeira: medula, borne, cerne, raio medular, câmbio, líber e casca.

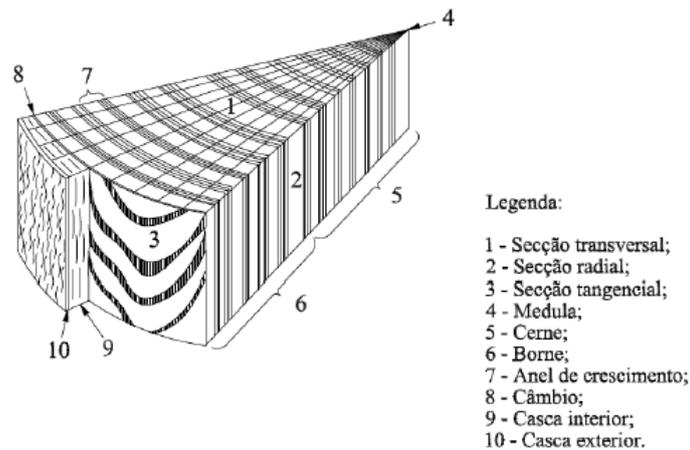


Figura 1. 2 Aspeto macroscópico de uma árvore resinosa (Xavier, 2003)

A casca é a camada mais externa do tronco. Esta, na sua parte externa é formada por uma camada epidérmica, constituída por células mortas, que tem como função proteger o lenho; e na sua parte interna é formada pelo líber, constituído por células vivas e tem como função a proteção do tronco e a condução da seiva que foi elaborada nas folhas das árvores.

O câmbio é constituído por um tecido merismático que está permanentemente em transformação celular, e tem como função gerar células novas. Como consequência deste processo, é possível visualizar os anéis de crescimento anual.

O lenho constitui o suporte da árvore e apenas desta secção é aproveitado material para utilização estrutural. Este é constituído pelo borne e pelo cerne. O borne corresponde à camada mais externa do lenho e é a madeira mais jovem da árvore. Por esse motivo é constituído por células vivas que garantem a condução da seiva bruta da raiz até à copa, por ascensão capilar. Este é mais claro e mais espesso que o cerne, que por sua vez, é mais interior e é constituído por tecido morto e por isso não possui funções circulatórias de substâncias. O cerne vai sendo progressivamente engrossado devido às transformações celulares que ocorrem no borne.

A medula é a parte central do tronco da árvore, é de reduzida espessura e é constituída por tecido sem qualquer resistência mecânica e durabilidade.

Os raios medulares estendem-se radialmente e de forma perpendicular ao eixo do tronco desde a medula até à casca, e têm como função o armazenamento de substâncias nutritivas e o transporte transversal.

1.4 Estrutura Microscópica

A estrutura da madeira é altamente influente no comportamento dos materiais por ela constituídos e por isso é importante compreender os fundamentos desta estrutura. Existem dois grandes grupos de arranjos fibro-anatômicos nas madeiras, o das Resinosas e o das Folhosas, apesar de dentro de cada grupo ainda existirem ligeiras variações de espécie para espécie.

O lenho das árvores Resinosas, que é o caso da madeira usada neste trabalho, *Picea abies* L., ao nível microscópico é constituído por dois tipos de elementos: os traqueídeos e os parênquimas.

Os traqueídeos (Figura 1.3) são células de paredes espessas, lenhificadas, bastante compridas, dispostas num sistema vertical e com funções de condução e suporte. Estas representam cerca de 95 % de volume total do tronco.

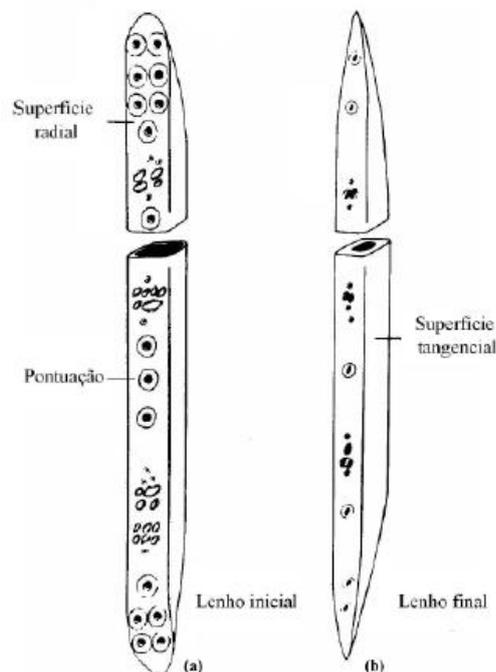


Figura 1. 3 Esquema longitudinal dos traqueídeos inerentes ao lenho (Esteves, 2009)

Os parênquimas são células com funções de armazenamento e transporte e estão dispostos em fiadas longitudinais e em raios lenhosos dispostos transversalmente.

Os troncos das Resinosas podem apresentar ainda um outro tipo de tecido (Figura 1.4): os canais secretores ou de resina, que são responsáveis pela elaboração e transporte de um fluido conhecido genericamente por resina. Os canais em si são apenas um espaço entre células, mas as células secretoras que os envolvem podem ser consideradas um parênquima resinífero (Oliveira, 2004).

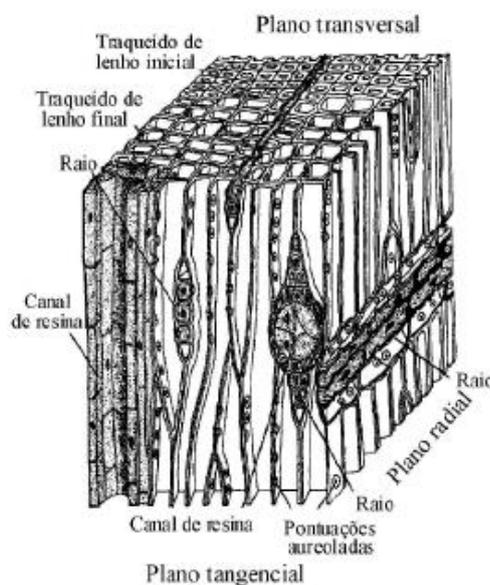


Figura 1. 4 Esquema tridimensional da estrutura celular de espécies resinosas (Xavier, 2003)

Em termos químicos, as várias espécies de madeira têm essencialmente a mesma composição, pois em todas, os principais constituintes da parede celular são a celulose, as hemiceluloses e a lenhina (Lewin and Goldstein, 1991). A forma como estes compostos estão interligados fazem da madeira um compósito natural, em que o papel da fibra é atribuído às microfibrilas de celulose, e a lenhina e a hemicelulose são consideradas componentes separados da matriz. A resistência da madeira à compressão e à flexão é conferida pelas forças de ligação entre as fibras e a matriz (Atkins AG e Mai YW, 1985). Em estruturas com ausência de dano (i.e, em estado virgem), submetidas a esforços moderadamente baixos de curta duração e à temperatura ambiente, a madeira exhibe claramente um comportamento elástico (Smith I et al., 2003). No entanto, ao longo do tempo, a madeira exhibe um comportamento não linear (i.e, visco elástico).

Quimicamente, as células da madeira são então constituídas por quatro substâncias:

- Celulose ($C_6H_{10}O_5$) – é o principal constituinte da parede celular e é a principal substância responsável pela resistência mecânica e higroscopicidade da madeira;

- Hemicelulose - é um polissacarídeo similar ao composto da celulose e constitui cerca de 20 a 30% da composição química da madeira. Sendo parte de uma matriz que aglutina a celulose, garante a função de união entre as fibras sem influenciar a sua dureza e/ou características mecânicas;

- Lenhina – constitui cerca de 20 a 30% da composição da madeira, pode ser caracterizada como o elemento de ligação entre a celulose e a hemicelulose, apresentando-se como o componente da parede celular que exibe um comportamento hidrofóbico (Smith I et al., 2003). A lenhina reduz também as alterações dimensionais que ocorrem com as variações de humidade na parede celular.

- outras substâncias – cerca de 5 a 7% da composição química da madeira são componentes como as resinas, os taninos, o trementino, as ceras, etc., conferindo diferentes características à madeira no cerne.

1.5 Defeitos e variações na madeira

Defeitos da madeira são as características que consideramos indesejadas numa peça de madeira, tanto com finalidade estrutural como decorativa. Assim sendo, entendemos por defeitos os nós, as fendas, os empenos, variações de cor, as bolsas de resina (nas resinosas), entre outras. Apesar de serem designados por defeitos, muitas destas singularidades são características naturais e normais da madeira. Pelo contrário, na madeira que é atacada por insetos ou ocupada por fungos, já são alterações consequentes de um mau manuseamento, o que tem implicações indesejadas na utilização da madeira. Deste modo, é consensual a opinião de que se devem chamar singularidades às características que são próprias da madeira, como nós e variações de cor, e defeitos às alterações consequentes de um mau manuseamento. Embora estas características indesejadas possam ser separadas, para utilizações estruturais, ambas podem fazer diminuir o desempenho mecânico da madeira.

Assim, como resultado da origem natural da madeira, as suas propriedades físicas e mecânicas têm um grau de variabilidade elevado, tipicamente superior a outros materiais estruturais, existindo entre estas uma forte relação (Xavier, 2003).

1.6 A água na madeira

Na madeira, as moléculas de água podem-se ligar aos seus constituintes, uma vez que é um material higroscópico, podendo desta forma sofrer alterações conforme perde ou ganha água, dependendo das condições do meio ambiente em questão. A madeira adquire sempre um estado de equilíbrio com as condições atmosféricas a que é submetida, e por isso pode ganhar ou perder humidade. Este fenómeno de adquirir ou ceder água é designado de sorção. O processo de aquisição de água do meio envolvente é designado por adsorção ou hidratação, enquanto o processo de cedência de água da madeira para o meio corresponde à dessorção ou secagem.

A presença de água na madeira tem uma grande influência no seu comportamento e propriedades, condicionando a utilização deste material. Um bom método para eliminar, em parte, reações químicas indesejáveis e o crescimento microbológico, é a secagem (Rocha, 2011). A secagem é normalmente realizada pelo fornecimento de energia sob a forma de calor, o que permite a evaporação da água (Kocafe et al. 2007) (Rowell et al. 2005).

1.7 Tipos de água presentes na madeira

A água existente na madeira surge em três formas: água de constituição, água ligada e água livre (Siau, 1995) (Simpson, 1991). A água de constituição faz parte da estrutura química da madeira, de modo que não é eliminada pela secagem. Quando existe somente este tipo de água na madeira, esta é designada por anidra. A água ligada, ou higroscópica, está presente nas paredes celulares, mas não faz parte da estrutura elementar. Este tipo de água é responsável pelas alterações de volume da madeira e pela consequente alteração das suas propriedades físicas e mecânicas, pois esta encontra-se ligada aos grupos hidroxilo, maioritariamente na celulose e na hemicelulose. A água livre, ou água capilar, não provoca alterações dimensionais ou das propriedades, condicionando

apenas a condutividade térmica e permeabilidade da madeira. A água livre ou de capilaridade é água que está presente nos vazios capilares (lúmens), e estes só começam a ser ocupados por água depois das paredes celulares estarem saturadas. Nem a presença nem a remoção da água livre causam qualquer alteração dimensional do material. Nesta situação, a humidade da madeira é superior ao ponto de saturação das fibras (PSF). Teoricamente este tipo de água pode ser facilmente retirado.

A quantidade de água presente nas árvores ou em amostras de madeira é designada por fração mássica de água. O teor de humidade exprime-se em percentagem da massa de madeira anidra, podendo o teor de água ser superior a 100%, caso em que a massa de água é superior à massa de madeira anidra (Rowell et al. 2005).

Devido à sua grande uniformidade estrutural, o transporte de água na madeira é similar para as diferentes resinosas. No entanto, a anatomia e as propriedades da madeira variam com a posição na árvore. Obviamente a concentração de água no interior da madeira não se verifica uniformemente em toda a massa da árvore ou da peça, uma vez que o processo de sorção é afetado por parâmetros como o tamanho e distribuição das células, a presença de pontuações, etc. Tendo em conta a disposição dos traqueídeos, com a variação da concentração de água, as alterações de volume são maiores na direção tangencial do que na radial, sendo que na direção longitudinal praticamente não existem alterações.

As propriedades entre o borne e o cerne nas resinosas também variam substancialmente, sendo que a permeabilidade no cerne é inferior à permeabilidade no borne. No cerne, as pontuações presentes nas paredes celulares dos traqueídeos não são funcionais, não se efetuando transporte de seiva por esta camada. Já no borne, os traqueídeos, usados para o transporte de nutrientes, possuem as suas pontuações funcionais, apresentando assim boa permeabilidade. As pontuações no borne também podem perder a sua funcionalidade quando sujeitas à secagem, pois as ligações químicas que perderam moléculas de água ligam-se entre si durante a secagem, diminuindo a permeabilidade.

O ponto de saturação das fibras (PSF) pode ser definido como sendo o teor de água associado apenas à água de constituição e à água ligada. Podemos assim associar ao ponto de saturação das fibras a situação em que as paredes celulares estão saturadas de água e não existe água livre nos lúmens. Não é possível determinar este ponto com exatidão. No entanto, podemos assumir valores entre um determinado intervalo de teores de água. O PSF varia de espécie para espécie, no entanto, para madeiras formadas em

climas temperados pode-se considerar um valor à volta dos 30% (Siau, 1995). Este ponto é de grande importância, uma vez que só abaixo deste é que se verificam alterações dimensionais e das suas propriedades. A quantidade total de água admitida na madeira também varia de acordo com o processo de sorção. Se uma peça de madeira for sujeita a secagem e depois sujeita a uma adsorção, a quantidade de água admitida vai ser menor, pois as ligações químicas que perderam moléculas de água ligam-se entre si durante a secagem. Este fenómeno é conhecido com histerese (Siau, 1995).

Para além do teor de humidade, que é um fator de extrema importância, a temperatura também é uma condição relevante. Estes dois fatores revelam-se decisivos nas alterações físicas e mecânicas da madeira.

1.8 Mecanismos de transporte e humidade na Madeira

A higroscopicidade é umas das principais características da madeira, e por isso torna-se importante perceber os mecanismos e as formas segundo as quais a humidade se movimenta no interior do material. Existem dois meios de transporte principais de água na madeira: o movimento de água livre e a difusão (Siau, 1995). O movimento de água livre está associado ao transporte de água líquida nos lúmens celulares. Se o teor de água for superior ao PSF, a água livre existente pode ser transportada pelos lúmens dos traqueídeos através de pontuações. Este escoamento hidrodinâmico ocorre devido à diferença de pressões, devido à capilaridade. Este fenómeno ocorre devido à atração molecular entre o líquido e a matriz sólida, podendo também estar associado a pressões externas ou internas. Para temperaturas próximas do ponto de ebulição da água, pode também ser considerado o movimento de vapor de água, causado pelo gradiente de pressões devido à rápida geração de vapor. O vapor é transportado das zonas de alta pressão para as zonas de baixa pressão, através de um escoamento dinâmico de vapor (Rocha, 2011).

Quando temos teores de água inferiores ao PSF, a difusão é o mecanismo de transporte principal. O processo de difusão, ao contrário dos movimentos de água livre, corresponde à transferência de matéria, devido ao movimento aleatório de moléculas, respondendo a um gradiente de concentrações. Deste modo, a difusão é um mecanismo mais lento do que o transporte de água livre (Rocha, 2011). Existem dois tipos de difusão na madeira: a difusão de água ligada e a difusão de vapor de água. A primeira corresponde

ao movimento de água ligada no interior das paredes celulares, e a segunda está relacionada com a transferência de vapor de água através do ar nos lumens celulares (Siau, 1995). No caso da difusão de água ligada, as forças que retêm o vapor de água nos lumens são relativamente inferiores às associadas às moléculas de água ligadas, sendo um processo mais lento do que a difusão de vapor de água.

Neste estudo como serão considerados meios ambientes com humidades relativas inferiores a 83%, não é atingido o PSF, de modo que o mecanismo de transporte de água é a difusão.

Em estudos realizados em que se isolavam as faces dos provetes de madeira sujeitos à adsorção ou à dessorção, concluiu-se que apenas as faces na direção longitudinal dos provetes de madeira estão expostas à adsorção ou à dessorção, pois os valores do coeficiente de difusão e do teor de humidade no equilíbrio para provetes cujas únicas faces não isoladas eram na direção longitudinal, foram praticamente iguais aos obtidos para os provetes não isolados. Assim, pode concluir-se que é pela direção longitudinal que grande parte do transporte de humidade ocorre na madeira (Esteves, 2009).

CAPÍTULO II

Modelo da difusão

2.1 Modelo da difusão de humidade

Quando existe diferença de temperaturas num determinado meio, o fenómeno natural que ocorre é a transferência de calor do corpo que se encontra a maior temperatura para o que se encontra a mais baixa temperatura, até se dar o equilíbrio térmico. O mesmo se passa num meio onde dois ou mais componentes têm diferentes concentrações de ponto para ponto. A tendência é a massa ser transferida da região de mais alta concentração para a de baixa concentração. Estes fenómenos são conhecidos como força motriz, e este transporte de um componente de uma região de alta concentração para outra de baixa concentração é conhecido como difusão.

Neste trabalho, vai-se estudar a transferência de massa de água das atmosferas criadas para os provetes de madeira.

2.1.1 Modelo de Fick de difusão

Considere-se um sistema matéria S , delimitado por uma superfície Σ , contendo uma mistura binária (Figura 2.1). Uma mistura binária é constituída por um componente em maior concentração, o solvente, e por um componente em menor concentração, o soluto. Considere-se P um ponto genérico da mistura e dV o volume de uma porção elementar da mistura, que contém o ponto P . Sendo dm a massa do soluto contido no volume dV , podemos chamar concentração do soluto em P a:

$$C(P) = \frac{dm}{dV} \quad (2.1)$$

Chama-se concentração do solvente no ponto P a quantidade,

$$C(P) = \frac{dm'}{dV} \quad (2.2)$$

sendo dm' a massa do solvente contida no volume dV da mistura.

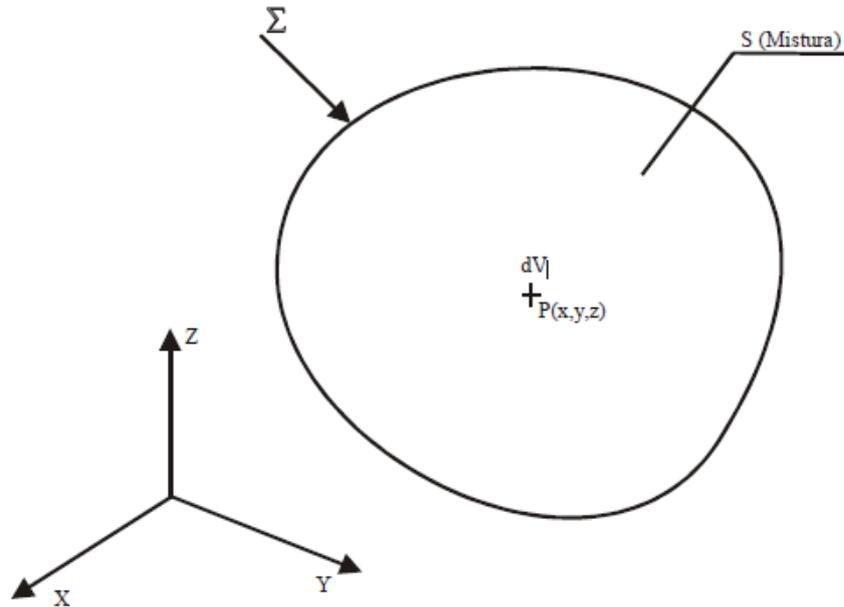


Figura 2.1 Mistura binária (Esteves, 2009)

Considerem-se agora as seguintes hipóteses: (1) o solvente distribui-se uniformemente no espaço; (2) o solvente está macroscopicamente em repouso. Pela hipótese 1, a concentração de solvente, $C'(P)$, é independente de P , mas em geral a concentração de soluto, $C(P)$, varia de ponto para ponto (Carvalho, 2009). O problema da difusão, contextualizando com as hipóteses anteriores, consiste em avaliar a função

$$C = C(P, t) = C(x, y, z, t) \quad (2.3)$$

Conhecidas as concentrações de fronteira e as condições iniciais, para este caso de difusão, temos as seguintes condições de fronteira,

$$C_{\Sigma} = C(P, t), P \in \Sigma \quad (2.4)$$

e

$$f_{\Sigma} = f(P, t), P \in \Sigma \quad (2.6)$$

Considerando C_0 a concentração inicial, temos a seguinte condição inicial,

$$C_0 = (P, t = 0), P \in S \quad (2.7)$$

A corrente de difusão da substância difusora no ponto P se S for definido pelo vetor densidade de corrente do soluto, \vec{J} , é representado da forma (Crank, 1975),

$$\vec{J} = C\vec{v} \quad (2.8)$$

A densidade do fluxo do soluto, F , é dada por (Crank, 1975),

$$F = \vec{J} \cdot \vec{n} = f(P, \vec{n}) \quad (2.9)$$

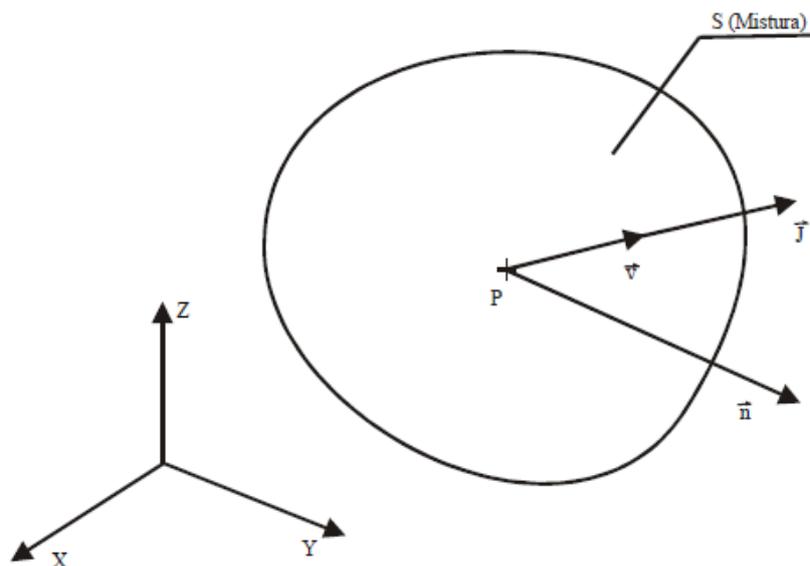


Figura 2.2 Vetor densidade de corrente (Esteves,2009)

2.1.2 Primeira lei de Fick da difusão

A primeira lei de Fick é a mais utilizada para descrever o processo de difusão. Esta lei indica uma correlação linear entre a densidade de corrente, \vec{J} , e o gradiente de concentração da fase difusora (Crank, 1975),

$$\vec{J} = -D \overline{\text{grad}C} \quad (2.10)$$

Sendo D o coeficiente de difusão. A expressão cartesiana da densidade de corrente, num sistema de coordenadas cartesiano e ortonormado, é

$$\vec{J} = -D \frac{\partial C}{\partial x} \vec{i} - D \frac{\partial C}{\partial y} \vec{j} - D \frac{\partial C}{\partial z} \vec{k} \quad (2.11)$$

2.1.3 Segunda lei de Fick da difusão

Usando por base a 1ª lei de Fick, aplicando o princípio da conservação da massa a um bloco elementar que contém o ponto P da mistura, sendo as arestas paralelas aos eixos do sistema de coordenadas $Oxyz$ (Figura 2.3), demonstra-se que (Crank, 1975),

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(D \overline{\text{grad}C}) \quad (2.12)$$

Relativamente a um referencial espacial $Oxyz$, a Equação (2.12) vem,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2.13)$$

que é a equação diferencial da difusão, designada pela 2ª lei de Fick para a difusão.

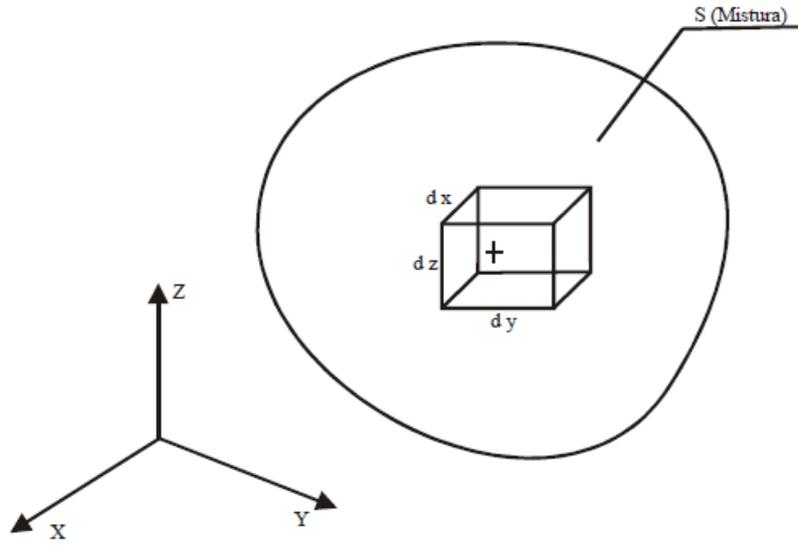


Figura 2.3 2ª Lei de Fick da difusão (Esteves, 2009)

Modelos coesivos

3.1 Comportamento à fratura da madeira

A madeira é um material biológico bastante usado em estruturas. Para termos uma correta avaliação do comportamento à fratura deste material é necessário conhecer as propriedades de fratura para cada um dos modos puros de propagação de fenda. Sendo um material ortotrópico, há a necessidade de se considerar seis sistemas de propagação de fenda distintos, para cada um dos modos de fratura (Figura 3.1). Assim, identificou-se os sistemas de fratura na madeira (Figura 3.2) por duas letras (e.g., TL, RL, LR, TR, RT e LT): a primeira letra refere-se à direção normal ao plano de fratura, e a segunda à direção de propagação da fenda.

No contexto da aplicação estrutural da madeira, os sistemas RL e TL são os mais comuns, e devido à sua simplicidade e manutenção de condições que permitem a propagação da fenda de forma auto semelhante, o ensaio DCB é o mais apelativo para estes sistemas de fratura (Meireles, 2013). Neste trabalho será estudada a fratura em modo I de provetes DCB no sistema TL.

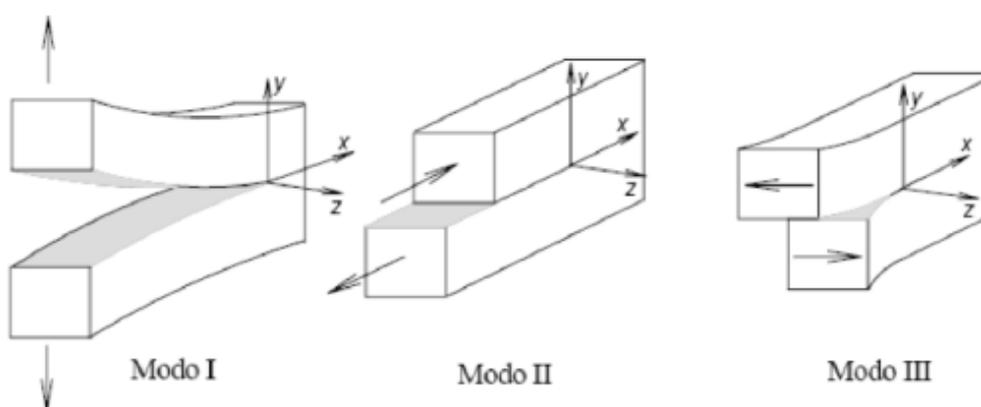


Figura 3.1 Modos puros de fratura (Barreto, 2008)

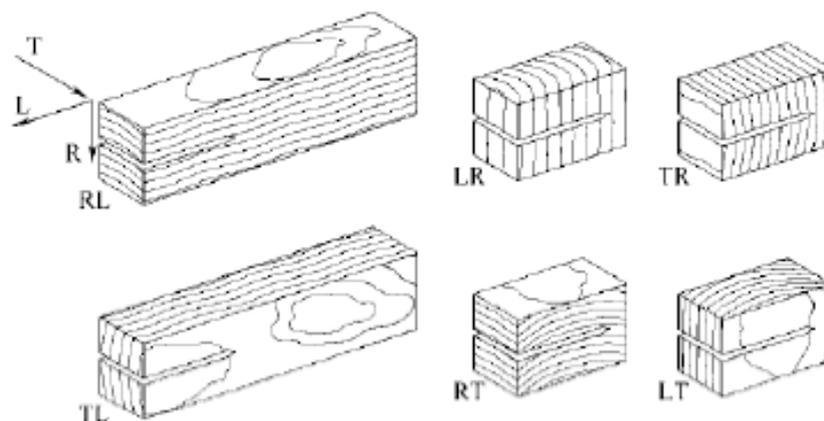


Figura 3.2 Sistemas de propagação de fenda na madeira (Dourado, 2010)

A madeira insere-se no grupo de materiais quase frágeis, e o comportamento deste tipo de materiais é caracterizado pela formação de uma zona de processo de fratura (ZPF), de dimensões não negligenciáveis, onde ocorrem fenómenos de amaciamento, como micro fendas, ramificação de fendas ou pontes de fibras (Morel, 2008). Esta zona de processo de fratura é composta por uma zona de amaciamento envolvida por uma zona não linear (Figura 3.3), onde as tensões e as deformações sofrem um aumento muito significativo comparadas com as da vizinhança (Meireles, 2013).

3.2 Modelos coesivos

A Mecânica da Fratura Linear Elástica (LEFM) tem-se mostrado uma ferramenta útil na resolução de problemas de fratura onde os provetes possuem um entalhe. No entanto, em materiais quase-frágeis, como é o caso da madeira, o betão ou o osso, a fratura é caracterizada pela formação de uma ZPF de dimensões não desprezáveis, onde ocorrem fenómenos de amaciamento como micro-fendas e ponte de fibras. A Mecânica da Fratura Não Linear Elástica é a teoria mais adequada para identificação do comportamento à fratura destes materiais, nomeadamente através de modelos coesivos (Rodrigues, 2014). No entanto, um dos problemas no conhecimento das leis coesivas que permitem descrever o comportamento desses materiais, está na dificuldade de se obter uma medição rigorosa do comprimento de fenda durante a sua propagação, devido à formação da ZPF (de Moura et al, 2008). Desenvolvido por de Moura et al (2008), o método conhecido por CBBM

(*Compliance Based Beam Method*) permitiu ultrapassar este problema. A partir de curvas força-deslocamento, registadas através dos ensaios mecânicos, podemos obter curvas de *Resistência* (curvas-*R*). Atendendo a que na avaliação da curva-*R* é forçoso conhecer-se o comprimento de fenda, torna-se necessário avaliar um comprimento de fenda equivalente a_e , ou fictício, que represente uma medida da fenda real, algo que seria complicado experimentalmente em materiais como a madeira. Esta informação, designadamente a taxa crítica de libertação de energia (assíntota horizontal da curva-*R*), é importante, na medida em que permite a simulação, através de modelos de dano coesivo, do comportamento quase-frágil exibido por esses materiais (Monteiro, 2013).

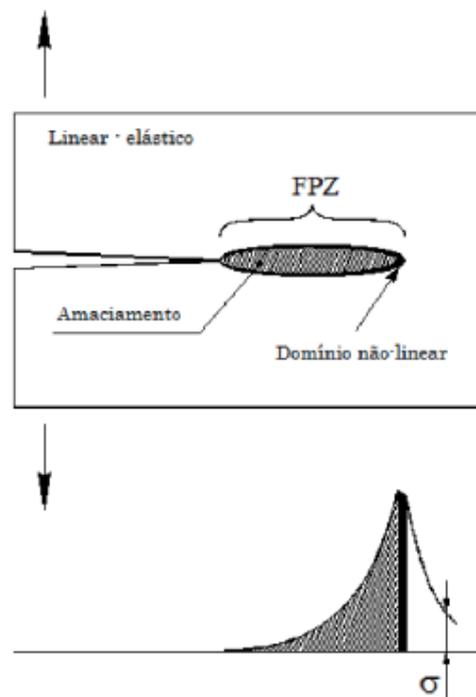


Figura 3.3 Zona de processo de fratura (ZPF) na extremidade da fenda de um material quase-frágil (Dourado, 2008)

Um aspeto que é de salientar nos modelos coesivos é a curva de amaciamento que caracteriza o material (quase-frágil), a qual pode ser identificada recorrendo-se a métodos inversos que combinam informação numérica com experimental (Dourado et. al, 2008).

Na sequência de trabalhos de vários autores no âmbito da aplicação de modelos coesivos, surgiu o modelo de dano bilinear proposto por Petersson (Santos, 2010) (Figura 3.4). Este modelo de dano bilinear é composto por duas retas descendentes, com declives diferentes, que caracterizam o material em regime de amaciamento, onde as tensões têm uma redução gradual na extremidade da fenda. A primeira reta é descrita pelo ponto máximo de tensão (w_0, f_t) e pelo ponto de inflexão (w_b, f_b) , e a energia dissipada, que é

atribuída ao fenómeno de “micro-fissuração” é identificada por $G_{f\mu}$. A segunda reta inicia-se no ponto (w_b, f_b) e termina no ponto $(w_c, 0)$, e a energia dissipada no fenómeno de “efeito de pontes” é identificada por G_{fb} . A área obtida pela lei de dano bilinear representa a energia de fratura coesiva e é o somatório das energias dissipadas, ou seja, $G_{Ic} = G_{f\mu} + G_{fb}$. A energia de fratura coesiva, G_{Ic} , é a energia requerida para separar completamente dois nós da interface, na zona de ligamento.

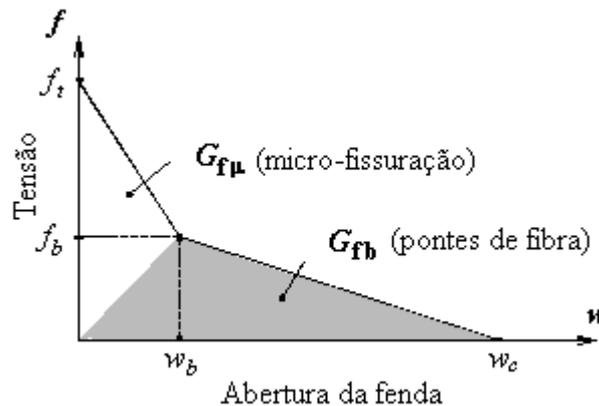


Figura 3.4 Modelo de dano de Petersson

No estudo realizado por Petersson, modelou-se a ZPF do material a partir da simulação por EF do dano desenvolvido na extremidade da fenda, mediante a disposição de EF de interface previamente posicionados ao longo do caminho da fenda, com parâmetros coesivos característicos do material a simular. Uma vez instalada na extremidade da fenda uma tensão f igual à tração local à tração f_t , considera-se que se iniciou o dano. Tendo em conta que nesta fase o material ainda é capaz de resistir ao carregamento imposto, na modelação por EF a tensão normal instalada não se reduz repentinamente a zero, seguindo uma lei (de configuração bilinear), em função da abertura de fenda. A propagação da fenda só acontece quando a abertura de fenda for igual ou superior à abertura de fenda crítica, w_c .

Apresentando o EF de interface uma espessura nula, a propagação da fenda (numérica) corresponde à separação de dois nós inicialmente coincidentes (que permanecem assim até que a tensão entre eles seja nula, $f=0$). Assim, considera-se que a extensão da zona coesiva corresponde à distância entre os primeiros pontos de integração que ainda se encontram coincidentes e a posição do ponto de integração do EF de interface, para o qual a tensão instalada é igual a f_t .

3.3 Método CBBM

Os métodos clássicos utilizados para determinar as energias de fratura de um dado material, requerem uma medição exata do comprimento de fenda durante a sua propagação. Contudo, na madeira, devido à formação de uma ZPF na extremidade da fenda, e à formação de pontes de fibras e ramificação da fenda, é difícil fazer uma avaliação correta do comprimento de fenda. Um novo método foi proposto por de Moura et al. (2008) de modo a ultrapassar esta dificuldade, necessitando apenas da flexibilidade do provete.

Através da Teoria de Vigas, a energia de deformação para um provete à flexão, e incluindo o efeito de corte, é dada por

$$U = 2 \left[\int_0^a \frac{M_f^2}{2E_L I} dx + \int_0^a \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\tau^2}{2G_{TL}} B dy dx \right] \quad (3.1)$$

sendo M_f o momento fletor, I o segundo momento de área, E_L e G_{TL} o módulo de elasticidade na direção longitudinal da madeira, e o módulo de corte no plano TL, respetivamente. A tensão de corte τ é dada por

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{V}{Bh} \left(1 - \frac{y^2}{c^2} \right) \quad (3.2)$$

representando c a distância máxima ao eixo neutro (metade da altura do provete) e V o esforço transversal que atua em cada braço do provete.

Assim, aplicando o teorema de Castigliano, tem-se

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8Pa^3}{E_L Bh^3} + \frac{12Pa}{5BhG_{TL}} \quad (3.3)$$

Isolando a flexibilidade do provete, resulta

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{8a^3}{E_L Bh^3} \quad (3.4)$$

Uma vez que a relação (3.4) não contempla o efeito da rotação da secção de encastramento, nem o efeito de corte e a concentração de tensões na frente da fenda, resolveu-se introduzir um fator de correção Δ considerando três comprimentos de fenda diferentes ($a_{01} > a_{02} > a_{03}$), de modo a ultrapassar esta limitação.

Com o objetivo de avaliar a flexibilidade, antes de ocorrer o dano, são aplicadas cargas reduzidas para cada comprimento de fenda a_{01} e a_{02} . Para o comprimento de fenda a_{03} , o provete é levado até à rotura final. Para o cálculo de Δ é feita uma regressão linear da flexibilidade experimental ($C_0^{1/3}$), servindo-se dos pontos correspondentes à totalidade de comprimentos de fenda testados.

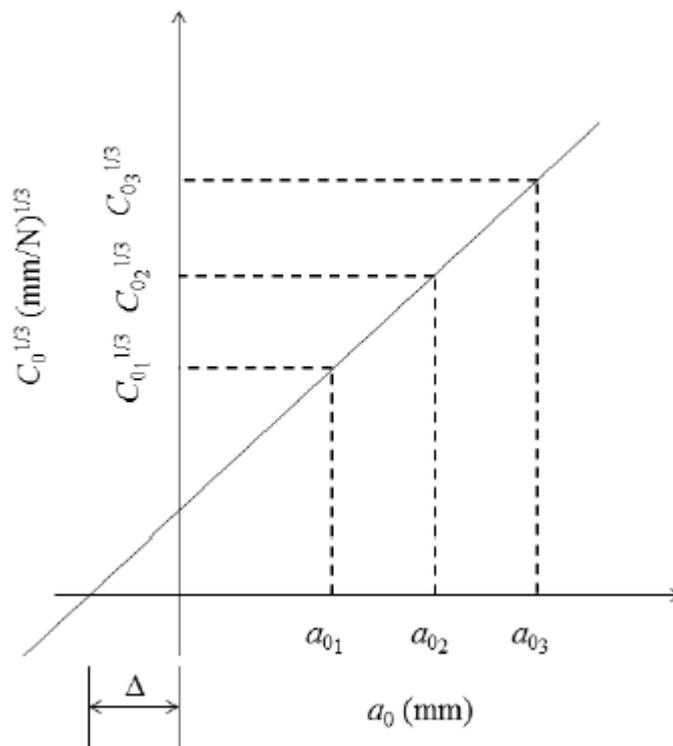


Figura 3.5 Cálculo de Δ

Podemos então, substituir o módulo de flexão corrigido, usando E_f em vez de E_L na Equação (3.4), da forma,

$$E_f = \frac{8(a_0 + \Delta)^3}{C_0 B h^3} \quad (3.5)$$

Para efeitos de determinação da curva- R , deve então avaliar-se o comprimento de fenda equivalente (a_e), em função da flexibilidade do provete medida experimentalmente ao longo do ensaio. Por conseguinte, o procedimento aqui descrito dispensa a medição experimental deste parâmetro durante a propagação da fenda,

$$a_e = \left(\frac{CE_f Bh^3}{8} \right)^{1/3} \quad (3.6)$$

A energia de fratura para modo I pode ser obtida a partir da equação de Irwin-Kies,

$$G_I = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (3.7)$$

Combinando esta última equação com a Equação (2.17), resulta

$$G_I = \frac{6P^2}{B^2 h} \left(\frac{2a_e^2}{h^2 E_f} + \frac{1}{5G_{TL}} \right) \quad (3.8)$$

Procedimento Experimental

4.1 Programa Experimental

Neste Capítulo será descrito o processo de preparação dos provetes de madeira de *Picea abies* L., usando a geometria DCB, e os procedimentos utilizados na preparação das atmosferas e na realização dos ensaios de difusão e de fratura.

Foram necessários quatro tipos de atmosferas, com humidades relativas diferentes, cada uma contendo 70 provetes, o que fez um total de 280 provetes.

4.2 Preparação dos provetes

As amostras utilizadas para os ensaios de difusão e de fratura em modo I são da espécie *Picea abies* L. Na escolha da tábua, a partir da qual se obtiveram os provetes, foram evitados eventuais defeitos como fissuras e nós. A partir desta, foram obtidas vigas do comprimento da tábua inicial, com uma espessura de 5 mm e com uma altura de 10 mm. Sendo a espessura desejada de 4 mm, as vigas foram retificadas manualmente até atingirem a medida requerida. Deste modo, garantiu-se que todos os provetes que saíram daquelas vigas tinham 4 mm de espessura.

Posteriormente, as vigas foram cortadas em peças de 93,5 mm, obtendo-se os 280 provetes necessários, com as dimensões finais de 10×4×93,5 mm.

Em cada um dos provetes foi necessário realizar um entalhe longitudinal, com o auxílio de uma serra de fita elétrica, com um comprimento ligeiramente inferior ao comprimento de fenda pretendido (Figura 4.1). Esta pré fenda foi efetuada exatamente a meia altura dos provetes, ou seja, a 5 mm, e com um comprimento de 51 mm. Instantes antes de realizar o ensaio de fratura, propagou-se a pré fenda com o auxílio de um X-ato, para o comprimento desejado, de 52 mm. Com este procedimento, produziu-se uma fenda artificial na madeira, o mais idêntica possível com uma fenda natural.

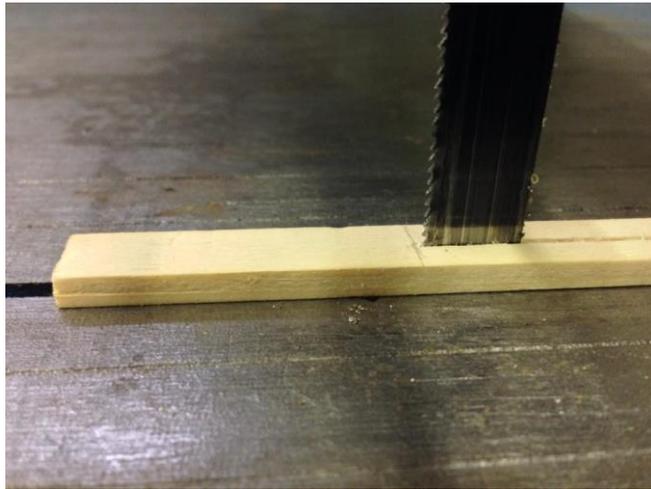


Figura 4.1 Realização do entalhe na serra de fita.

Com o objetivo de fixar os provetes na máquina de ensaios mecânicos, tiveram de se realizar furos passantes. Esta etapa ocorreu depois de ser efetuada a pré fenda inicial. Para tal, utilizou-se uma broca de furar madeira, com o diâmetro nominal de 1,2 mm, a meia altura de cada braço. No total realizaram-se 3 pares de furos em cada provete, separados por 5 mm uns dos outros ($a_{01}= 47$ mm, $a_{02}= 42$ mm, $a_{03}= 37$ mm). O primeiro par de furos também se encontra a uma distância de 5 mm do início do provete. Nestes furos passantes, serão introduzidos, posteriormente, duas cavilhas, com o objetivo de induzir o carregamento em modo I.

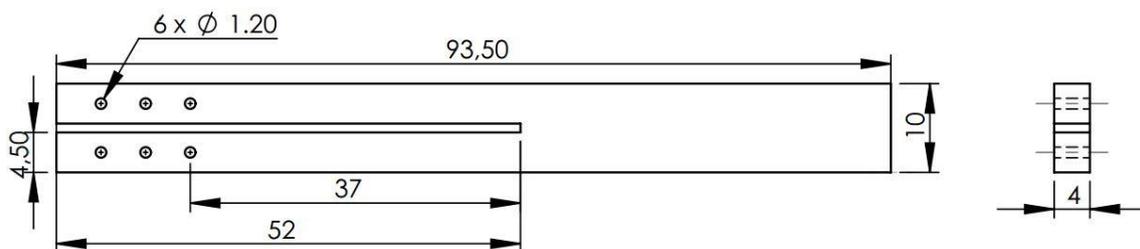


Figura 4.2 Especificações dos provetes para os ensaios experimentais

Após a furação os provetes foram sujeitos a um processo de polimento muito superficial, com lixa de madeira de granulometria igual a 180, de modo a remover pequenas aparas de madeira deixadas pela serra de fita, pela broca e pelo X-ato na operação de produção da pré fenda.

Uma vez que os provetes seriam divididos em quatro grupos de 70, estes foram todos identificados de acordo com a atmosfera a que foram expostos (i.e., HR1, HR2, HR3 e HR4). Ainda dentro de cada atmosfera, foi atribuída uma referência a cada provete, compreendida entre 1 e 70.



Figura 4.3 Exemplo de identificação de um provete (i.e., provete número 40 da humidade relativa 3)

4.3 Preparação das atmosferas

Neste trabalho experimental os ensaios de difusão decorreram em condições higrotérmicas estacionárias, à temperatura de 35° C. Para que os provetes fossem sujeitos a diferentes teores de humidade relativa, criaram-se, de acordo com o estipulado pela norma ASTM E 104-02 (1991), quatro tipos de atmosferas com diferentes soluções salinas. Recorreu-se desta forma ao uso dos sais de Cloreto de Lítio, Brometo de Sódio, Iodeto de Potássio e Cloreto de Potássio, cada um deles, dissolvido em água destilada. As diferentes soluções salinas foram depois colocadas dentro de uma estufa a 35° C (Figura 4.4), de acordo com o que se indica na Tabela 4.1.



Figura 4.4 Estufa utilizada nos ensaios de difusão.

Tabela 4.1 Soluções utilizadas para preparação das atmosferas a 35° C

	Solução	Humidade Relativa (%) (T = 35°C)
HR 1	LiCl	11,3±0,3
HR 2	NaBr	54,6±0,4
HR 3	KI	67,0±0,3
HR 4	KCl	83,0±0,3

Como já se referiu atrás, seleccionaram-se 70 provetes para cada humidade relativa, perfazendo assim um total de 280 provetes. As soluções salinas foram introduzidas nas respetivas caixas, sendo posteriormente colocadas na estufa. Em cada uma das caixas, os provetes foram separados em dois grupos, de modo a facilitar o seu armazenamento, evitando assim o contacto direto das soluções salinas com os provetes.

4.4 Método das pesagens

No decorrer dos ensaios de difusão, a variável medida foi o teor de massa de água contida nos provetes. A determinação do teor de humidade, na madeira é relativa e não fornece uma quantidade absoluta de água. O método mais utilizado para determinação do teor de água na madeira é o método das pesagens, pois é o mais rigoroso embora sejam necessários bastantes cuidados tendo em vista uma seleção correta da amostra que deve

ser suficientemente representativa, nomeadamente, não conter defeitos. Neste método, determina-se o teor de água na madeira, calculando, com base numa amostra representativa, a relação, expressa em percentagem, entre a massa do provete seco e a massa do mesmo, quando sujeito a uma atmosfera saturada até ficar com massa constante. O método das pesagens foi o método utilizado neste trabalho.

Para determinar a variável medida no decorrer dos ensaios, teor de massa de água (M), utilizou-se a expressão recomendada pela norma portuguesa NP-614,

$$M_e = (M_t - M_0) / M_0 \quad (4.1)$$

onde M_0 representa a massa inicial dos provetes e M_t a massa do mesmo provete, no momento da pesagem. As sucessivas pesagens dos provetes foram efetuadas numa balança analítica de calibração automática (KERN ALJ160-4NM) (Figura 4.5).



Figura 4.5 Balança analítica de calibração automática.

Os provetes foram pesados ao longo do tempo, começando com intervalos entre pesagens de 40 minutos. Este espaçamento entre pesagens foi variando no decorrer dos ensaios de difusão, aumentando-se o intervalo à medida que os valores tendiam para o valor de saturação. A operação de pesagem de todos os provetes foi de aproximadamente 20 minutos, sendo que este tempo ia diminuindo uma vez que o número de provetes também diminuía. Assim, em determinados períodos ao longo da campanha de ensaios, iam sendo retirados 10 provetes de cada vez, que foram testados à fratura em modo I.

Note-se que quando os recipientes eram retirados da estufa a 35°C, durante os momentos das pesagens, os provetes ficavam sujeitos às condições ambiente do

laboratório. Os provetes foram assim pesados sucessivas vezes até se atingir um equilíbrio em termos de variação do teor de humidade, terminando esta operação quando a variação de massa entre pesagens não fosse significativa.

4.5 Ensaio de fratura em modo I

Inicialmente os ensaios mecânicos dos provetes DCB, sujeitos a diferentes teores de humidade, foram realizados numa máquina eletromecânica, INSTRON, modelo 1125, equipada com uma célula de carga de 100 kN. Para a aquisição da força e do deslocamento, foi utilizada uma unidade de marca Spider 8, modelo 600, com uma frequência de aquisição de dados de 50 Hz. Esta célula de carga não se adequava à gama de valores de força que estes ensaios requeriam. Deste modo, foi necessário maquinar acessórios mecânicos na oficina, para que se conseguisse acoplar uma nova célula de carga, de 5 kN, à estrutura da máquina eletromecânica, e novos apoios para os provetes (Figura 4.6). Neste setup experimental também se usou uma mesa x-y, com o propósito de anular a componente de modo II que se geraria.



Figura 4.6 Ligação do provete à máquina de ensaio com célula de carga de 5 kN.

Contudo, a logística que envolvia todo o ensaio mecânico, que era necessária nesta máquina eletromecânica, juntamente com as pesagens, era de difícil conciliação. Agravando mais um pouco a situação os resultados obtidos ficaram de difícil análise, tendo mesmo de ser necessário mudar de máquina de ensaios. No entanto, dado que já se tinham realizados ensaios de fratura nestas condições (30 provetes referentes à HR1 e todos os 10 primeiros provetes das restantes humidades relativas, que estavam nas condições ambiente), já não foi possível utilizar os dados referentes a estes provetes entretanto ensaiados à fratura.

Optou-se então, por uma outra máquina INSTRON, MicroTester modelo 5848, equipada com uma célula de carga de 2 kN. Os provetes foram fixados por um dispositivo de interface com as amarras da máquina. Para tal, utilizaram-se duas cavilhas cilíndricas, em aço de carbono, com 1,2 mm de diâmetro. O apoio inferior da máquina, amarrado através dos furos ao braço inferior dos provetes, estava solidamente aparafusado à base da máquina. O apoio superior foi fixado ao furo do braço superior do provete, mantendo-se ligado à célula de carga (Figura 4.7). Os provetes foram colocados numa posição horizontal, i.e., na direção perpendicular ao eixo de carregamento.



Figura 4.7 Máquina INSTRON com célula de carga de 2 kN.

Antes de se iniciarem os ensaios de fratura em modo I, houve o cuidado de alinhar o apoio superior e inferior, de modo a evitar a propagação da fenda em modo misto. Nos ensaios de fratura em modo I, escolheu-se a velocidade do travessão de 0,5 mm/min, e para a aquisição da força e do deslocamento, foi utilizada uma frequência de aquisição de dados de 50 Hz.

Para facilitar as operações de pesagens e de fratura, uma vez que o número de provetes era muito elevado, optou-se por realizar primeiramente a campanha de ensaios mecânicos e de difusão dos provetes das humidades relativas 1 e 2, e só depois de estas terminarem é que se iniciaram os ensaios dos provetes das humidades 3 e 4.

As campanhas de ensaios mecânicos decorreram em simultâneo com os ensaios de difusão, de forma a perceber, de que modo as propriedades mecânicas da madeira variavam com o teor de humidade que os provetes iam adquirindo ao longo do tempo. Num período inicial de cada campanha, tal como as pesagens, os ensaios mecânicos foram realizados com um espaço de tempo mais reduzido entre eles, aumentando este ao longo da campanha de ensaios, realizando-se assim um ensaio ao início e outro ao fim do dia nos dois primeiros dias, e passando para um por dia, até um ensaio de dois em dois dias.

Os ensaios mecânicos ocorriam depois da pesagem dos provetes, daquela hora específica, e eram testados uma amostra de 10 provetes que estavam nas mesmas condições atmosféricas, ou seja, 10 provetes de cada humidade relativa. Sendo os provetes constituídos por três pares de furos, nos dois primeiros pares de furos, correspondentes aos comprimentos de fenda maior (a_{01} e a_{02}), apenas foram aplicadas cargas leves, porque o objetivo era determinar os valores de flexibilidade iniciais sem iniciar dano no provete (Dourado, 2010) (Figura 4.8). Apenas para o comprimento de fenda mais pequeno (a_{03}) é que se deu a fratura completa do material (Figura 4.9).



(a)

(b)



(c)

Figura 4.8 Ligação do provete à máquina: (a) para a_{01} ; (b) para a_{02} ; (c) para a_{03} .



Figura 4.9 Propagação de fenda do provete para a_{03} .

Modelação numérica

5.1 Métodos Numéricos

Os métodos numéricos de discretização são muito utilizados para resolver problemas de Engenharia. Estes métodos permitem fazer a aproximação das equações diferenciais a um conjunto de equações algébricas resolúveis no computador, o qual vai ser aplicado a cada pequeno domínio temporal ou espacial do problema em questão. Um dos métodos numéricos mais conhecidos é o Método de Elementos Finitos (MEF), que requer a divisão do domínio geométrico do problema em vários subdomínios mais simples, sendo cada subdomínio denominado de elemento finito. Neste caso as equações são aplicadas a cada elemento finito, obtendo-se no final uma solução aproximada para o domínio total do problema.

Neste capítulo vai-se abordar o procedimento numérico, nomeadamente o Método de Elementos Finitos no software ANSYS e a solução analítica de Fick para o caso do estudo da difusão, e os modelos coesivos para o caso de estudo da fratura.

5.2 Modelo da difusão

Tal como se referiu atrás, num determinado meio, quando existem diferentes temperaturas, a tendência é haver transferência de calor do ponto ou do corpo que se encontra com temperatura mais elevada para o que se encontra a uma temperatura mais baixa, até que atinja o equilíbrio térmico. O mesmo se passa num meio com dois ou mais componentes, onde as suas concentrações variam de ponto para ponto. A tendência é a transferência de massa de uma região com uma concentração mais elevada para uma região com uma concentração mais baixa, reduzindo as diferenças de concentração no meio em questão. A estas tendências chamamos de força motriz, que no caso da transferência de calor corresponde à diferença de temperaturas e na transferência de massa corresponde à diferença de concentrações.

Neste trabalho, será estudada a transferência de massa de água, ou difusão, das atmosferas para os provetes que nelas estão inseridos.

5.2.1 Concentração de água no equilíbrio e coeficiente de difusão

Normalmente, a variação de fração mássica de água ao longo do tempo é representada por uma curva associada à variação da fração mássica em ordem à raiz quadrada do tempo. Recorrendo a este tipo de gráfico, Figura 5.1, observa-se que numa fase inicial o material tem uma variação elevada de massa de água, que é representada pelo crescimento linear. Com o decorrer do tempo, a curva começa a estabilizar até atingir o patamar de equilíbrio (M_e), encontrando-se a amostra, neste momento, em condições de equilíbrio como meio envolvente. Este tipo de comportamento representado na Figura 5.1 pode ser explicado pelo fenómeno da difusão, uma vez que a velocidade de sorção da água depende do gradiente de concentrações de água entre a superfície e o centro da amostra. À medida que o processo de sorção avança, o teor de água no interior da amostra vai ficando em equilíbrio com o meio, pelo que o gradiente de concentrações diminui e consequentemente a velocidade de sorção diminui, até que toda a amostra atinge o equilíbrio (Khazaei, 2008).

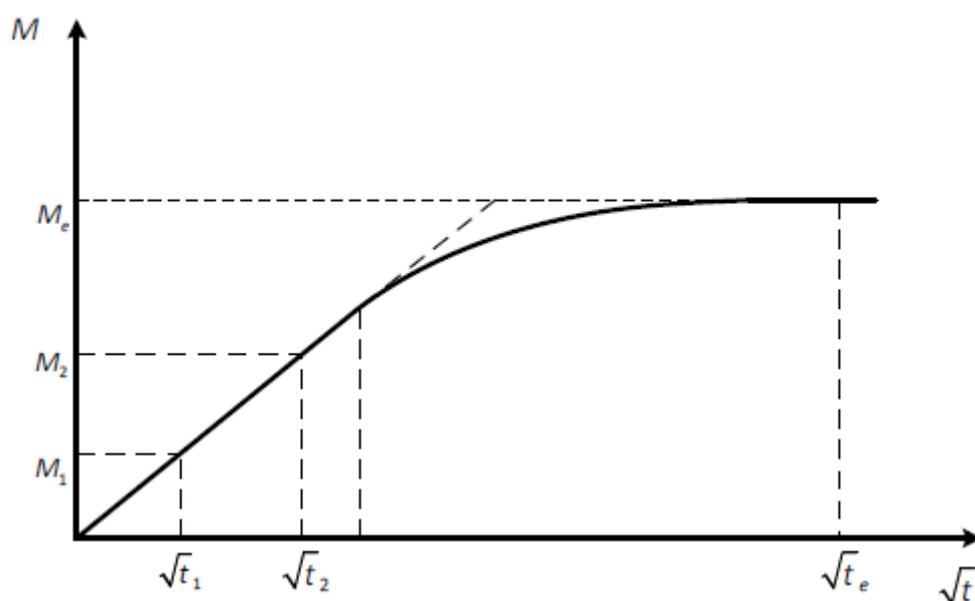


Figura 5.1 Curva característica de sorção

A partir destas curvas de difusão obtidas experimentalmente, é determinado o valor do coeficiente de difusão D . Este coeficiente, pode ser obtido com base na parte inicial desta curva através da equação (Shen & Springer, 1976):

$$D = \pi \left(\frac{e}{4M_e} \right)^2 \left(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (5.1)$$

onde e representa a espessura do provete de madeira.

A concentração de saturação C_{sat} é uma propriedade única de cada material e depende das suas características e das condições a que este é sujeito. Esta variável representa a massa de água admitida por unidade de volume da amostra e pode ser obtida pela equação

$$C_{sat} = \frac{m_i \times \frac{M_e}{100}}{V} \quad (5.2)$$

sendo V o volume da amostra.

5.2.2 Solução analítica

Para além das curvas experimentais, podemos obter uma solução analítica baseada na segunda lei de Fick, e comparar estes dois tipos de resultados.

Segundo Crank (1975), em regime transiente e para a difusão a uma dimensão, com uma concentração de água inicial uniforme e condições de fronteira iguais, temos

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left[\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right] \quad (5.3)$$

onde M_t é a fração mássica de água difundida até ao instante t , M_∞ é a fração mássica de água difundida após um tempo infinito, n o número de termos do somatório e l é metade da espessura da placa. Esta equação é válida quer para a adsorção quer para a secagem e está associada à difusão numa placa com uma espessura pequena em relação ao comprimento e largura (Rocha, 2011).

Considerando M_0 a fração mássica de água no instante inicial, temos

$$M = M_e - (M_e - M_0) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left[\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2}\right] \quad (5.4)$$

Deste modo, recorrendo aos valores de M_e , D , considerando a espessura e do provete e o tempo necessário para atingir o equilíbrio, obtidos experimentalmente, é possível obter a fração mássica de água na placa ao longo do tempo e assim reproduzir analiticamente o processo de difusão de água na madeira.

5.2.3 Analogia entre transferência de calor e transferência de massa

Reconhecendo a analogia existente entre a difusão e a transferência de calor, Fick adaptou as equações matemáticas desenvolvidas por Fourier relativas à transferência de calor, para o caso da difusão.

Adotando as equações da primeira e segunda lei de Fourier, (5.5) e (5.6)

$$q = -k \cdot \nabla T \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5.6)$$

com

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (5.7)$$

onde q representa o fluxo de calor, k a condutividade térmica, T a temperatura, ∇T o gradiente de temperatura, α a difusividades térmica, ρ a massa volúmica e C_p o calor específico.

Surgiram desta forma a primeira e segunda lei de Fick para a difusão: Equação (5.8) e (5.9)

$$J = -D \nabla C \quad (5.8)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (5.9)$$

onde J representa o fluxo difusivo, D o coeficiente de difusão e C a concentração.

Na primeira lei de Fick, é descrito o processo de difusão no estado estacionário, onde a concentração C não varia com o tempo. O fluxo difusivo, J , é diretamente proporcional à variação de concentração (∂C) e inversamente proporcional à distância ($\partial x, \partial y, \partial z$). Como o fluxo ocorre no sentido inverso ao aumento de concentração, usamos o sinal negativo.

Já na segunda lei, é descrito igualmente o processo de difusão, mas no estado transiente ou não-estacionário, onde a concentração C varia com o tempo e a distância. Esta lei é usualmente utilizada em problemas de difusão, onde expressa a velocidade de variação da concentração do soluto em função do tempo e da distância.

Neste trabalho será utilizada a segunda lei de Fick, de modo a representar a difusão da humidade nos provetes de madeira. Para tal, além dos ensaios experimentais de difusão, será feita a análise numérica, recorrendo ao software de Elementos Finitos (EF) ANSYS. Uma vez que este software não possui um tipo de análise específico para problemas de difusão e havendo, como já referido, analogias com a transferência de calor, vai-se adaptar a análise térmica e as respetivas equações e propriedades para o caso da difusão.

Pretendendo substituir no ANSYS a 2ª lei de Fourier pela da 2ª lei de Fick, recorrendo às mesmas equações (5.6 e 5.9, respetivamente), pode-se deduzir uma correspondência entre as variáveis destas duas leis (Tabela 4.1).

Tabela 5.1 Analogia entre as propriedades de transferência de calor e as propriedades de difusão a introduzir no ANSYS

	Transferência de calor	Difusão
Variável a determinar	Temperatura (°C)	Humidade ($W=C/C_{sat}$)
	ρ (kg/m ³)	1
Variáveis introduzidas	C_p (J/kg°C)	C_{sat} (kg/m ³)
	k (W/m°C)	$D \times C_{sat}$ (kg/s.m)

Correspondendo W à humidade ou concentração relativa, C_{sat} à concentração de saturação e D ao coeficiente de difusão.

A humidade, W , pode admitir valores entre 0 e 1, sendo 0 para o estado seco e 1 para o estado saturado.

Em relação às condições iniciais e de fronteira, para um problema de secagem, estas assumem os seguintes valores:

- Condição inicial: para o provete inicialmente no estado saturado, com concentração máxima de água, $W=1$;
- Condição de fronteira: as superfícies do provete estão expostas às condições da atmosfera envolvente com concentração mínima de água, $W=0$.

Em relação às condições iniciais e de fronteira, para um problema de adsorção, estas assumem os seguintes valores:

- Condição inicial: para o provete inicialmente no estado seco, com concentração mínima de água, $W=0$;
- Condição de fronteira: as superfícies do provete estão expostas às condições da atmosfera envolvente com concentração máxima de água, $W=1$.

As condições iniciais aplicam-se a todo o domínio da amostra no instante inicial, enquanto as condições de fronteira aplicam-se às superfícies da amostra em contacto com o meio.

5.2.4 Simulação numérica

As curvas obtidas experimentalmente não apresentam um comportamento típico, no entanto vão-se realizar análises numéricas para o caso da difusão e comparar estes resultados com os resultados do estudo experimental e analítico. Para tal foi necessária a adoção de alguns valores que se obtiveram experimentalmente.

5.2.4.1 Modelação ANSYS

O ANSYS é um software comercial de modelação e simulação numérica, que através do método de elementos finitos (MEF) realiza diversas análises ligadas à engenharia, como análise térmica, estrutural e eletromagnética. Como foi referido anteriormente, o ANSYS não está direccionado para problemas de difusão e como tal teve de se fazer uma analogia com a transferência de calor para que fosse possível a simulação.

A interação com este software pode ser realizada através da sua linguagem de programação denominada APDL (ANSYS Parametric Design Language), semelhante às linguagens de programação FORTRAN ou BASIC.

5.2.4.2 Etapas do desenvolvimento do código

A resolução de um problema no ANSYS por EF pode ser subdividido em 3 etapas: pré processamento, solução e pós-processamento.

- **Pré processamento**

Nesta etapa são introduzidos os dados referentes à geometria do modelo, as propriedades do material (D , C_{sat} , m_t , t_e) e o comprimento do EF a utilizar. Os valores das propriedades do material são obtidos experimentalmente.

Deste modo definiram-se os seguintes parâmetros para os provetes:

- **Geometria do provete** – prisma retangular, com 9,35 cm de comprimento, 1 cm de altura e 0,4 cm de largura.
- **Massa, m_t** – massa média dos provetes de cada humidade relativa em específico.
- **Tipo de elemento finito** – SOLID87
- **Refinamento da malha** – o comprimento dos elementos utilizados foi de 0,05 cm.

Para os provetes submetidos a HR1 definiram-se os seguintes parâmetros:

- **Tempo de simulação** – tempo máximo que os provetes estiveram submetidos às condições de HR1 – 13,16751 horas.
- **Massa** – média da massa na primeira pesagem – 1,51g.
- **Concentração de saturação, C_{sat}** – calculou-se a partir da Equação (4.2), para $M_e = M (13,16751h)$.
- **Coeficiente de difusão, D** – calculado a partir da Equação (4.1)

Para os provetes submetidos a HR3 definiram-se os seguintes parâmetros:

- **Tempo de simulação** – tempo máximo que os provetes estiveram submetidos às condições de HR3 – 14,756 horas.
- **Massa** – média da massa na última pesagem – 1,76g.
- **Concentração de saturação, C_{sat}** – calculou-se a partir da Equação (4.2), para $M_e = M (14,756h)$.
- **Coeficiente de difusão, D** – calculado a partir da Equação (4.1)

Para os provetes submetidos a HR4 definiram-se os seguintes parâmetros:

- **Tempo de simulação** – tempo máximo que os provetes estiveram submetidos às condições de HR4 – 14,055 horas.
- **Massa** – média da massa na última pesagem – 1,8g.
- **Concentração de saturação, C_{sat}** – calculou-se a partir da Equação (4.2), para $M_e = M (14,055h)$.
- **Coeficiente de difusão, D** – calculado a partir da Equação (4.1).

• Solução

Neste estudo pretendemos determinar a distribuição da humidade com o tempo e o espaço, por isso definimos o tipo de análise como transiente.

Também as condições iniciais e de fronteira são aqui definidas (Tabela 5.2). Como já foi referido anteriormente, para o caso da secagem, provetes submetidos a HR1, a condição inicial é $W=1$, uma vez que os provetes possuíam a concentração máxima de água, e a condição de fronteira é $W=0$. Para o caso dos provetes submetidos a HR3 e HR4, casos de sorção, a condição inicial é $W=0$ e a condição de fronteira é $W=1$.

Tabela 5.2 - Condições iniciais e de fronteira aplicadas na adsorção e na secagem

Condições	Adsorção	Secagem
Inicial ($t=0$)	$W=0$	$W=1$
De fronteira ($t>0$)	$W=1$	$W=0$
Humidade Relativa	HR3, HR4	HR1

A condição inicial é imposta a todos os nós da amostra para o instante inicial, enquanto as condições de fronteira são aplicadas aos nós da superfície do domínio expostas às condições do meio inserido. Finalmente é especificada a resolução temporal pretendida e é obtida a solução.

- **Pós-processamento**

Nesta etapa obtemos os resultados da simulação em forma de gráfico, diagrama de contorno ou lista.

5.3 Modelação por Elementos Finitos

O material utilizado neste estudo foi a madeira de *Picea abies* L., com as propriedades elásticas indicadas na Tabela 5.3. Neste estudo numérico considerou-se a madeira como um material ortotrópico e homogéneo. O modelo numérico foi elaborado num software de elementos finitos, com as dimensões nominais do provete DCB ($2h=10\text{mm}$, $B=4\text{mm}$, $l=93,5\text{mm}$, $a_0=37\text{mm}$) ensaiado à tração (Figura 5.2). Neste modelo foram usados 30140 elementos finitos isoparamétricos de 8 nós, 304481 nós e elementos finitos de interface dispostos ao longo do comprimento de ligamento do provete, na direção longitudinal. Com o objetivo de obter uma curva força-deslocamento suave, optou-se por um refinamento da malha de elementos finitos na região localizada na frente de fenda (Figura 5.2). Nas restantes regiões do provete o tamanho do elemento foi maior, de modo a reduzir o esforço computacional.

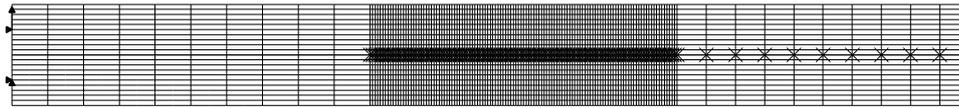


Figura 5.2 Malha de elementos finitos do ensaio DCB

A simulação da iniciação e da propagação do dano foi conseguida por via de uma rotina desenvolvida por de Moura et al. (2013). A malha de elementos finitos e as respetivas condições de fronteira, adotadas encontram-se na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Propriedades elásticas da madeira *Picea abie* L. usadas nas simulações por elementos finitos

E_L	E_R	E_T	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
(MPa)	(MPa)	(MPa)				(MPa)	(MPa)	(MPa)
9900*	730	410	0,430	0,435	0,545	500	610	22

* - valor ajustado durante as simulações

As simulações numéricas foram realizadas para provetes cujos ganhos de massa variam entre os -4,59% e 3,18%, tentando reproduzir-se o mais aproximadamente possível as curvas $P-\delta$ experimentais. Para isso, para além do módulo de elasticidade longitudinal, teve de ser identificada a combinação de parâmetros da lei de dano de Petersson que melhor reproduzisse aqueles resultados experimentais (Figura 3.4).

5.3.1 Curvas força-deslocamento

De modo a obter-se um acordo numérico-experimental satisfatório são necessários vários ajustes, sendo necessária a repetição da simulação várias vezes, o que tornou este processo bastante demorado. Inicialmente, é necessário saber o módulo de elasticidade E_L , do provete em análise, que permite a reprodução da rigidez inicial obtida experimentalmente. De seguida, é necessário definir vários parâmetros relativos à propagação do dano. Os parâmetros de caracterização bilinear do dano foram a tensão máxima (f_t), a tensão no ponto de inflexão (f_b), a abertura da fenda no ponto de inflexão (w_b) e a taxa crítica de libertação de energia (G_{Ic}). Com estes parâmetros conseguimos traçar a lei bilinear de dano para o respetivo provete.

Uma vez gerada a curva $P-\delta$ da simulação numérica, obteve-se a curva curva- R correspondente (Figura 5.3), usando o CBBM detalhado na Secção 2.5. O procedimento consistiu em identificar a combinação de parâmetros da lei de Petersson que melhor se adequava ao ajuste numérico-experimental.

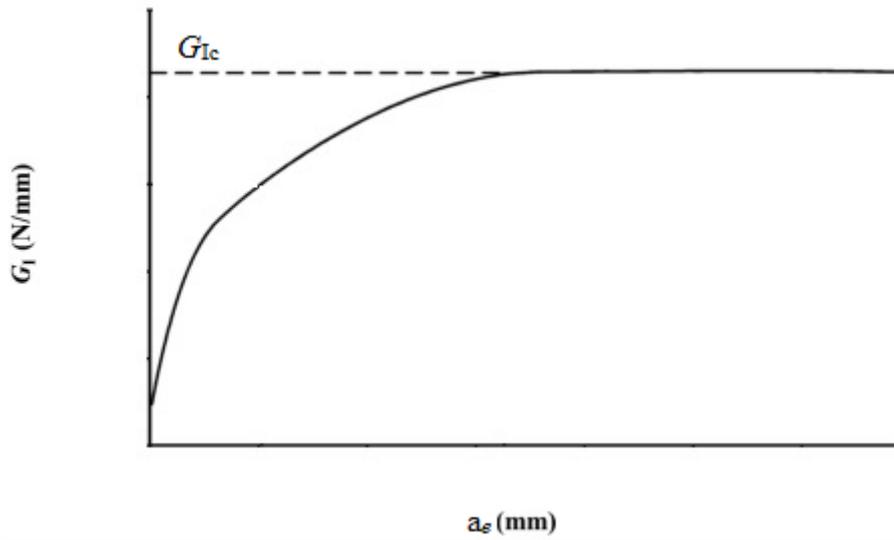


Figura 5.3 Curva de Resistência típica.

CAPÍTULO VI

Análise de Resultados

6.1 Resultados dos ensaios de difusão e de fratura

Neste Capítulo serão apresentados os resultados que se obtiveram durante as campanhas de ensaios de difusão e de fratura em modo I, assim como as respectivas comparações com os resultados numéricos. A evolução da fração mássica de água nos provetes ao longo do tempo, as curvas $P-\delta$, as curvas- R e o modo como as propriedades mecânicas da madeira se alteram com os ganhos ou perdas de humidade serão discutidos neste Capítulo.

6.2 Curvas experimentais de sorção

Nas figuras seguintes é apresentada a evolução ao longo do tempo, do ganho ou perda de massa de água, conforme a humidade relativa em questão, que os provetes de madeira sofreram ao longo da campanha de ensaios.

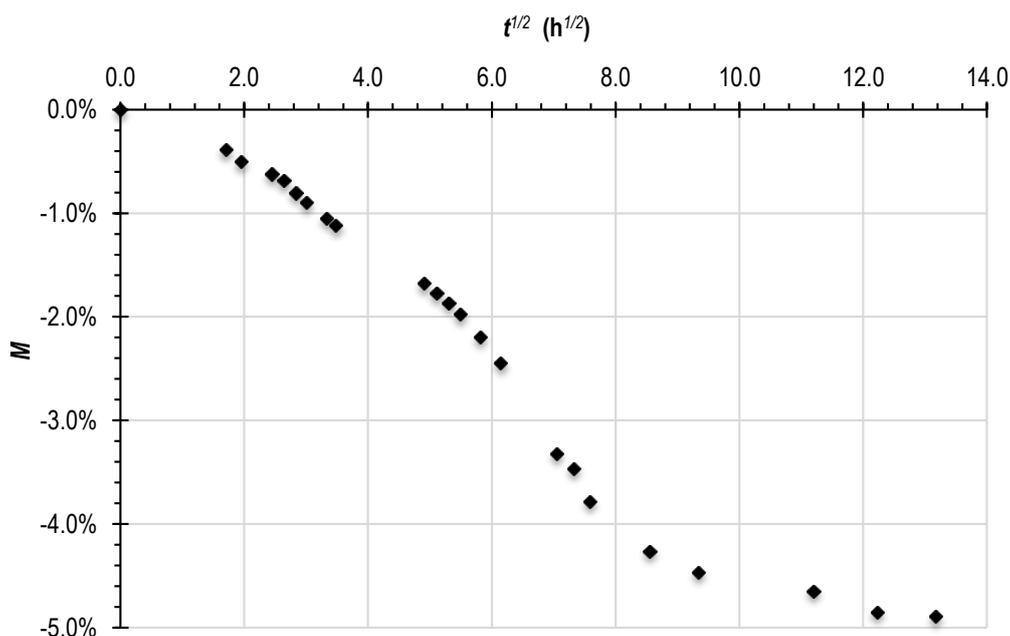


Figura 6.1 Curva de difusão obtida para HR1

Pela análise da Figura 6.1, verifica-se que esta apresenta um comportamento mais ou menos característico da secagem. Na fase inicial a perda de massa de água acontece com uma velocidade um pouco inferior ao que acontece a partir de $\sqrt{t} = 2,5h$, o que é normal em estudos de difusão. É possível perceber que as amostras de madeira sujeitas a uma humidade relativa de 11,3% (HR1), sofreram uma perda de massa de quase 5%. A humidade relativa dos provetes era, portanto, superior à atmosfera envolvente e a difusão da água deu-se das amostras de madeira para o ar envolvente.

Relativamente aos provetes sujeitos a HR2 (54,6%), não sofreram grandes variações de massa, mantendo-se a curva sempre próxima ao eixo das abcissas. Apesar de não serem registadas grandes variações comparativamente com as restantes humidades relativas, o facto é que entre as sucessivas pesagens, estes provetes não apresentam um comportamento uniforme, não sendo possível definir uma tendência. Deste modo, optou-se por excluir a informação obtida para esta humidade relativa.

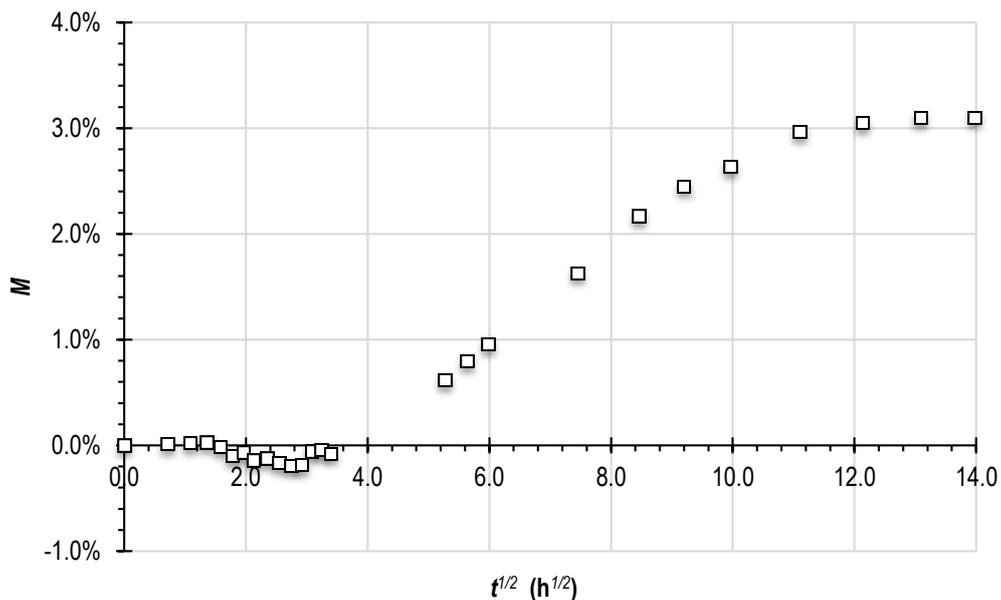


Figura 6.2 Curva de difusão obtida para HR3

Quanto a HR3 (67%), a curva representada na Figura 6.2 não apresenta um comportamento típico da adsorção, havendo uma grande indefinição no período inicial. Só a partir do instante $\sqrt{t} = 3,5h$ se começa a verificar-se um ganho de massa por parte dos provetes até se atingir o patamar de equilíbrio.

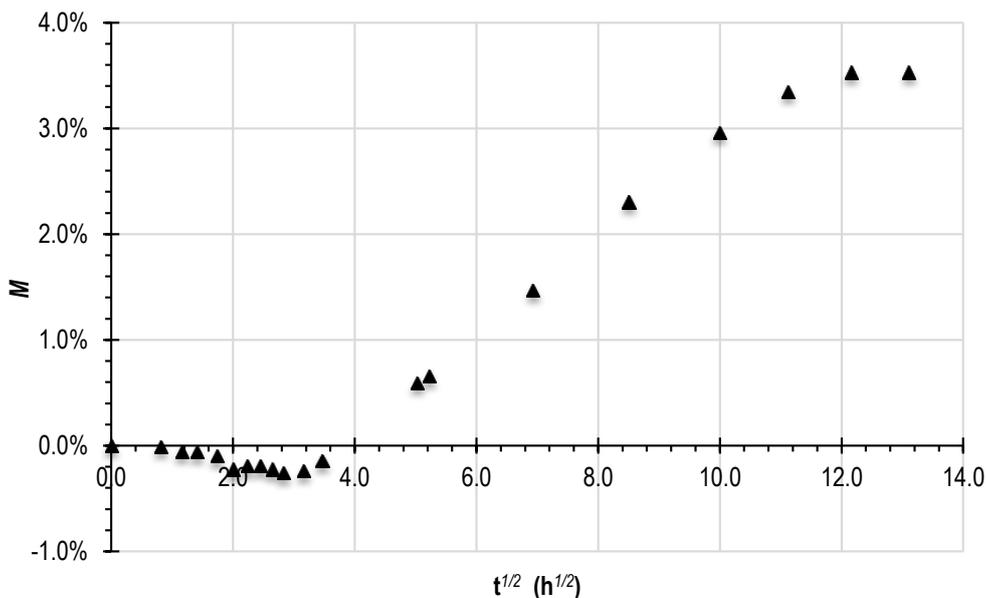


Figura 6.3 Curva de difusão obtida para HR4

Relativamente a HR4 (83%), pela Figura 6.3 pode observar-se que acontece o mesmo que em HR3, ou seja, existe uma zona de indefinição na fase inicial e só depois existe um comportamento típico, até se atingir o equilíbrio. Este fenómeno, que acontece em HR3 e HR4, pode ser justificado pelo facto da área do provete que permite adsorção de humidade ser muito pequena, plano transversal e direção longitudinal. A quase totalidade da transferência de massa ocorre na direção longitudinal, devido à estrutura e disposição dos traqueídeos e através do plano transversal, que é o plano onde são visíveis os anéis de crescimento, (secção 1.3). Além do mais, a difusão também pode ser influenciada pelo facto da composição das áreas transversais dos provetes serem constituídas por dois tipos de lenhos: lenho inicial e lenho final. O lenho inicial é formado por células vivas responsáveis pelo transporte, enquanto o lenho final é constituído por células com funções de suporte. Uma outra possível justificação deve-se ao elevado número de provetes (70 em cada humidade relativa), uma vez que na fase inicial as pesagens eram realizadas entre períodos muito curtos, e o tempo de pesagens era relativamente elevado, ficando os provetes sujeitos às condições ambientes. Com o decorrer da campanha de ensaios, o tempo entre pesagens foi aumentando e o número de provetes por humidade relativa foi diminuindo, devido aos ensaios mecânicos.

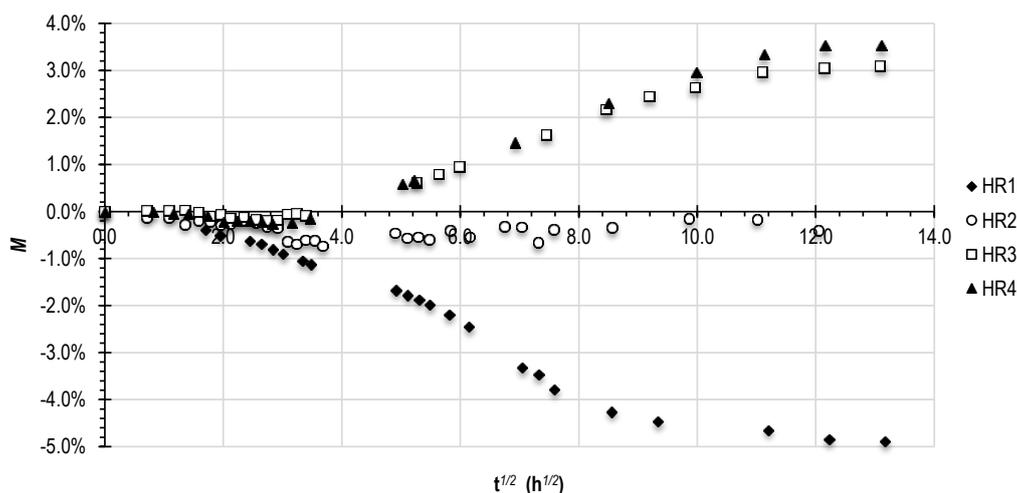


Figura 6.4 Curvas de difusão obtidas para todas as humidades relativas usadas

Na Figura 6.4, em que estão agrupadas todas as curvas de secagem experimentais, é possível ter uma percepção clara dos provetes de madeira que sofreram adsorção e os que sofreram dessorção. Todas as curvas apresentam instabilidades, facto este que pode ser justificável tanto por erros experimentais como pelas direções de simetria dos provetes.

Como foi referido, relativamente aos provetes da HR2, a variação de massa encontra-se sempre muito perto dos 0%, o que quer dizer que não existiram grandes alterações do princípio ao fim do ensaio experimental, no entanto não existe numa tendência no seu comportamento ao longo do tempo.

6.3 Propriedades da difusão

Através dos dados experimentais, foram calculados analiticamente os coeficientes de difusão D , o teor de água no equilíbrio M_e e a concentração de saturação C_{sat} , para cada humidade relativa (HR1, HR3 e HR4). Para tal, seleccionaram-se os valores de M_1 , M_2 , $\sqrt{t_1}$ e $\sqrt{t_2}$ experimentais que permitissem obter o valor de D mais favorável para cada caso (Equação 4.1). Assumiu-se um intervalo de tempo $\sqrt{t} = 0,1 (h)$ entre valores e com um numero total de 30 termos, $n=30$. Estes valores experimentais seriam substituídos na Equação 5.4.

Estes mesmos valores, calculados analiticamente, foram usados nas simulações através do software ANSYS. Os resultados dos ensaios experimentais foram reunidos com os resultados da solução analítica e da simulação numérica para serem comparados.

Na tabela 6.1 são apresentados os parâmetros gerais utilizados nas simulações do ANSYS.

Tabela 6.1 Parâmetros gerais utilizados nas simulações do ANSYS

Parâmetros	ANSYS
Geometria (cm)	0,4×1×9,35
Tipo de elemento finito	SOLID87
Refinamento da malha (cm)	0,05

Os parâmetros usados na simulação computacional para os provetes sujeitos a HR1 são ilustrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 Parâmetros introduzidos no código para os provetes sujeitos à HR1

Parâmetros	HR1	
Massa, m (g)	1,51	
Duração do ensaio (s)	624180	
Propriedades de difusão	D (cm²/s)	$5,87 \times 10^{-8}$
	M_e (%)	-4,89
	C_{sat} (g/cm³)	-0,020

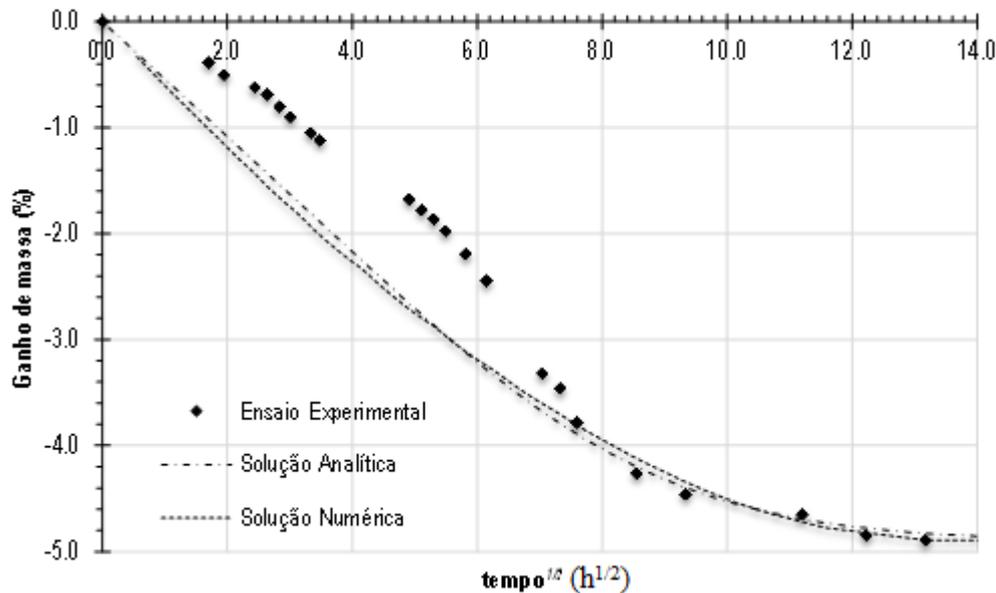


Figura 6.5 Resultados obtidos para o ensaio de difusão da HR1

Na Figura 6.5 estão representados os resultados do ensaio de difusão para os provetes submetidos às condições de 35°C e a uma atmosfera de 11% de humidade relativa. Pela análise desta figura, verifica-se que a curva da solução analítica e numérica apresentam divergências relativamente à curva experimental. Verifica-se também que os maiores desvios, relativamente à curva experimental, ocorrem da fase inicial até ao instante da mudança de declive.

Tanto a solução analítica como a simulação numérica descrevem um comportamento característico da secagem. Tendo em conta que a perda de massa de água está representada em ordem à raiz quadrada do tempo, a perda de massa de água é em grande parte observada nos instantes iniciais.

As soluções obtidas pela simulação numérica e pela solução analítica apresentam, na fase inicial, uma perda de massa de água superior ao que acontece na realidade. Esta discrepância de valores que acontece com o ensaio experimental é justificável pela pequena área por onde se dá grande parte da difusão da água, dificultando neste caso a secagem. A solução numérica e analítica são análogas, no entanto nos instantes iniciais a solução numérica apresenta ganhos superiores, invertendo-se esta situação por volta do instante $t = \sqrt{6}$.

Quando sujeita à dessorção de água a 35°C e 11% de humidade relativa, a amostra atinge o patamar de equilíbrio, associado a uma perda de massa de água de 4,89% da sua massa total, aproximadamente no instante $\sqrt{t} = 12$, ou seja passadas cerca de 144 horas.

Este patamar de equilíbrio é atingido tanto na curva da solução analítica como na curva da solução numérica, apresentando estas um valor de M_e com um erro muito perto dos 0%.

Tabela 6.3 Parâmetros introduzidos no código para os provetes sujeitos à HR3

Parâmetros		HR3
Massa, m (g)		1,76
Duração do ensaio (s)		783862
Propriedades de difusão	D (cm ² /s)	$5,27 \times 10^{-8}$
	M_e (%)	3,10
	C_{sat} (g/cm ³)	0,0146

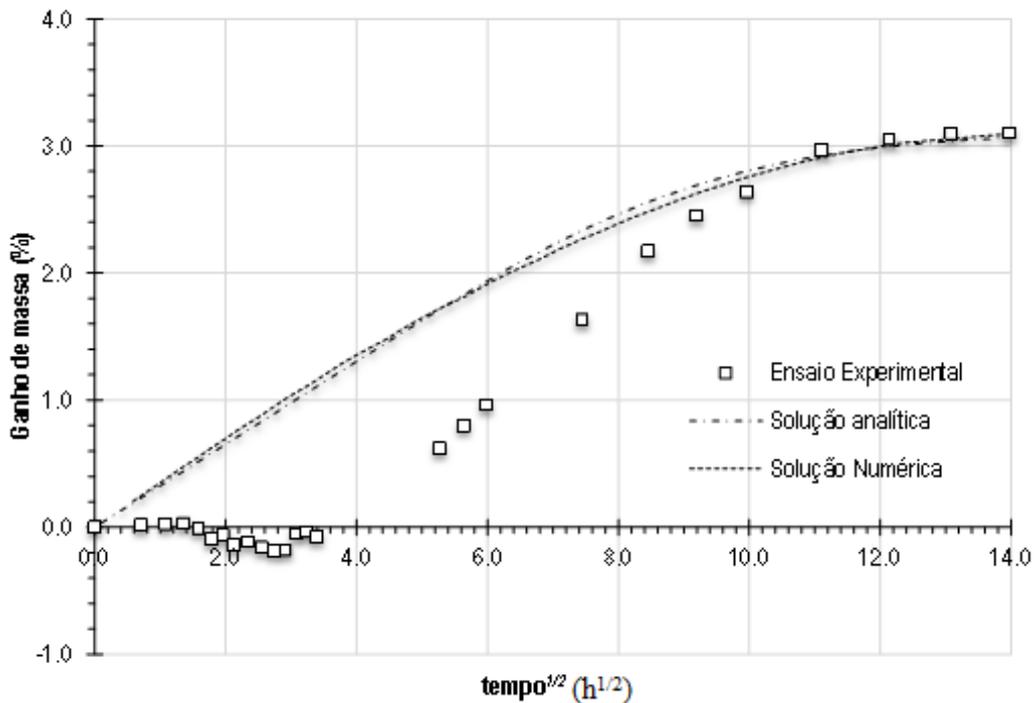


Figura 6.6 Resultados obtidos para o ensaio de difusão da HR3

Os parâmetros usados na simulação computacional para os provetes sujeitos a HR3 são ilustrados na Tabela 6.3.

Na Figura 6.6 estão representados os resultados do ensaio de difusão para os provetes submetidos às condições de 35°C e a uma atmosfera de 67% de humidade relativa. Pela análise da figura, verifica-se que a curva experimental apresenta um comportamento invulgar e por isso as curvas da solução analítica e numérica não

conseguem representar o que se aconteceu nos ensaios experimentais de difusão para estes provetes.

Tanto a curva da solução analítica como a numérica apresentam o mesmo comportamento, verificando-se na solução numérica um ganho maior na fase inicial até ao instante $\sqrt{t} = 5$. O que acontece, aproximadamente até este mesmo instante, na curva do ensaio experimental é justificado pelo que foi dito anteriormente na análise das Figuras 6.2 e 6.3. Depois deste instante, na curva obtida experimentalmente verifica-se o início de um ganho de massa de água, começando esta curva a ter um comportamento característico, até atingir o patamar de equilíbrio, $M_e=3,10\%$.

O instante em que é atingido o patamar de equilíbrio experimentalmente é representado também na curva da solução analítica e numérica para $\sqrt{t} = 13$, sendo que o valor de M_e na solução analítica apresenta um erro de 1,3% e na solução numérica é de aproximadamente 0%.

Tabela 6.4 Parâmetros introduzidos no código para os provetes sujeitos à HR4

Parâmetros		HR4
Massa, m (g)		1,8
Duração do ensaio (s)		711199
Propriedades de difusão	D (cm²/s)	$5,24 \times 10^{-8}$
	M_e (%)	3,53
	C_{sat} (g/cm³)	0,0169

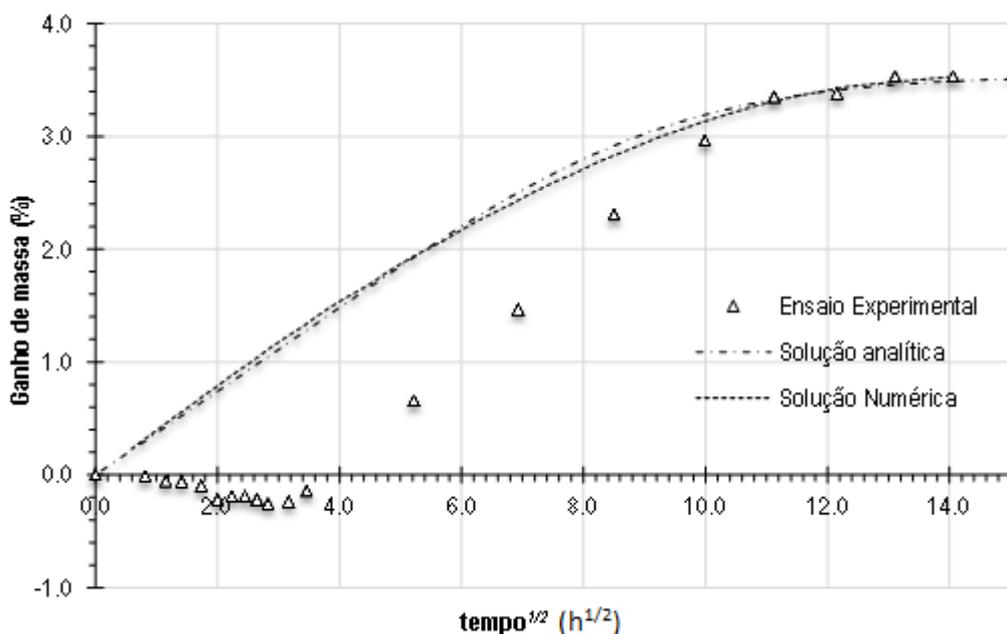


Figura 6.7 Resultados obtidos para o ensaio de difusão da HR4

Os parâmetros usados na simulação computacional para os provetes sujeitos a HR4 são ilustrados na Tabela 6.4.

Na Figura 6.7 estão representados os resultados do ensaio de difusão para os provetes submetidos às condições de 35°C e a uma atmosfera de 83% de humidade relativa. Pela análise da figura, verifica-se que o comportamento das curvas tanto do ensaio experimental, como da solução analítica, como da solução numérica, são idênticos ao comportamento que apresentavam estas mesmas curvas para a humidade relativa de 67%. Neste caso, a curva da solução numérica também apresenta um ganho superior na fase inicial relativamente à solução analítica.

Para este caso da HR4, o patamar de equilíbrio é atingido no instante $\sqrt{t} = 13$, apresentando um ganho de massa de água de 3,53% da sua massa total. Este patamar é coerente com o patamar da curva analítica e numérica, sendo que o da primeira apresenta um erro de 1,4% e o da segunda apresenta um erro aproximado de 0%.

Após a análise de todos os resultados, pode-se concluir que as curvas da solução analítica e da solução numérica foram análogas. Estas soluções conseguiram reproduzir corretamente o comportamento esperado para a difusão, apesar de não representarem com exatidão o que se observou nos ensaios experimentais, mas tal facto deve-se à indefinição e instabilidade dos resultados das pesagens, ocorrida durante a fase inicial dos ensaios experimentais e a erros experimentais.

6.4.1 Curvas força-deslocamento experimentais

Como foi referido no Capítulo IV, os dados dos trinta primeiros provetes sujeitos à HR1 e 10 provetes de cada uma das restantes humidades relativas não foram aproveitados porque os ensaios mecânicos foram realizados na máquina eletromecânica INSTRON, modelo 1125, equipada com uma célula de carga de 100 kN. Os restantes provetes foram ensaiados à fratura em modo I, numa outra máquina INSTRON, MicroTester modelo 5848, equipada com uma célula de carga de 2 kN.

As curvas da Figura 6.8 representam todas, as curvas força-deslocamento dos provetes submetidos à humidade relativa de 11%, diferenciando apenas o tempo de estágio a que os mesmos foram sujeitos. Na Figura 5.8 (a) os provetes tiveram 53,6 horas sob as condições daquela atmosfera, estando associada uma perda média de massa de água de 3,46% das massas totais dos provetes. Para os provetes cujas curvas $P-\delta$ estão representadas na Figura 6.8 (b) a perda média de massa de água foi de 4,74%, para um tempo de estágio de 101,4 horas. No caso dos últimos provetes a serem ensaiados à fratura em modo I (Figura 6.8 (c)), estes tiveram um tempo total de cura de 173,4 horas e tiveram uma perda média de massa de 4,89%.

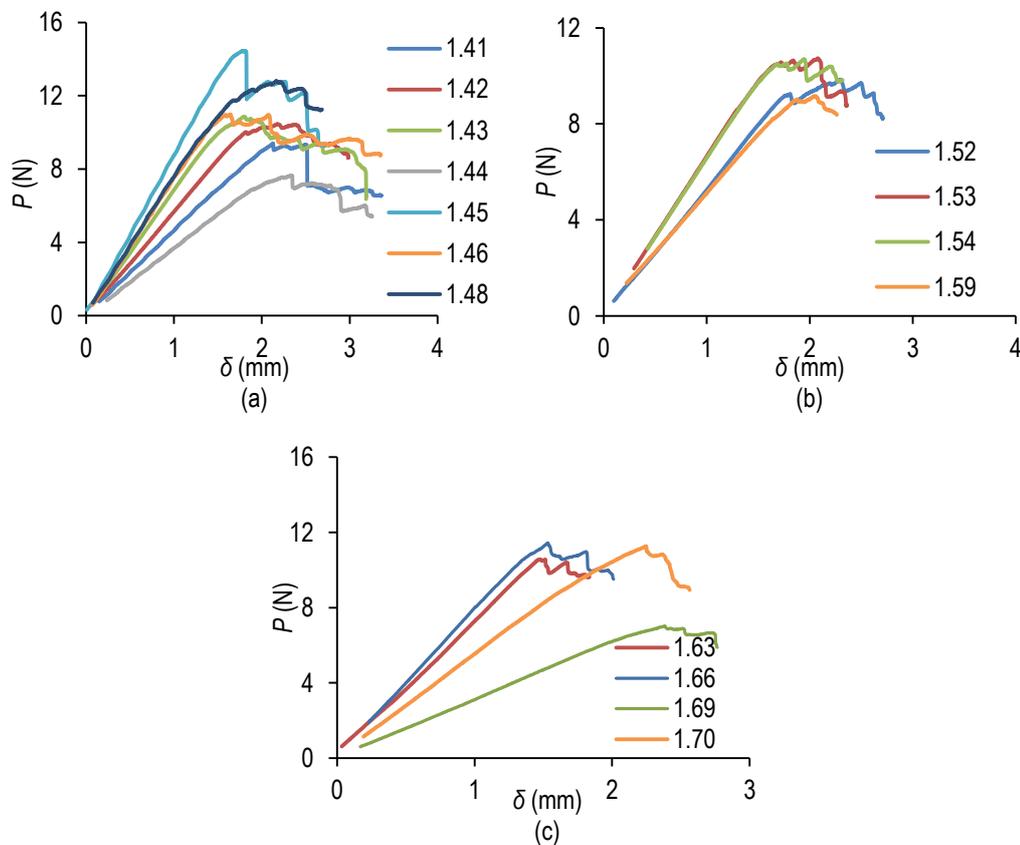
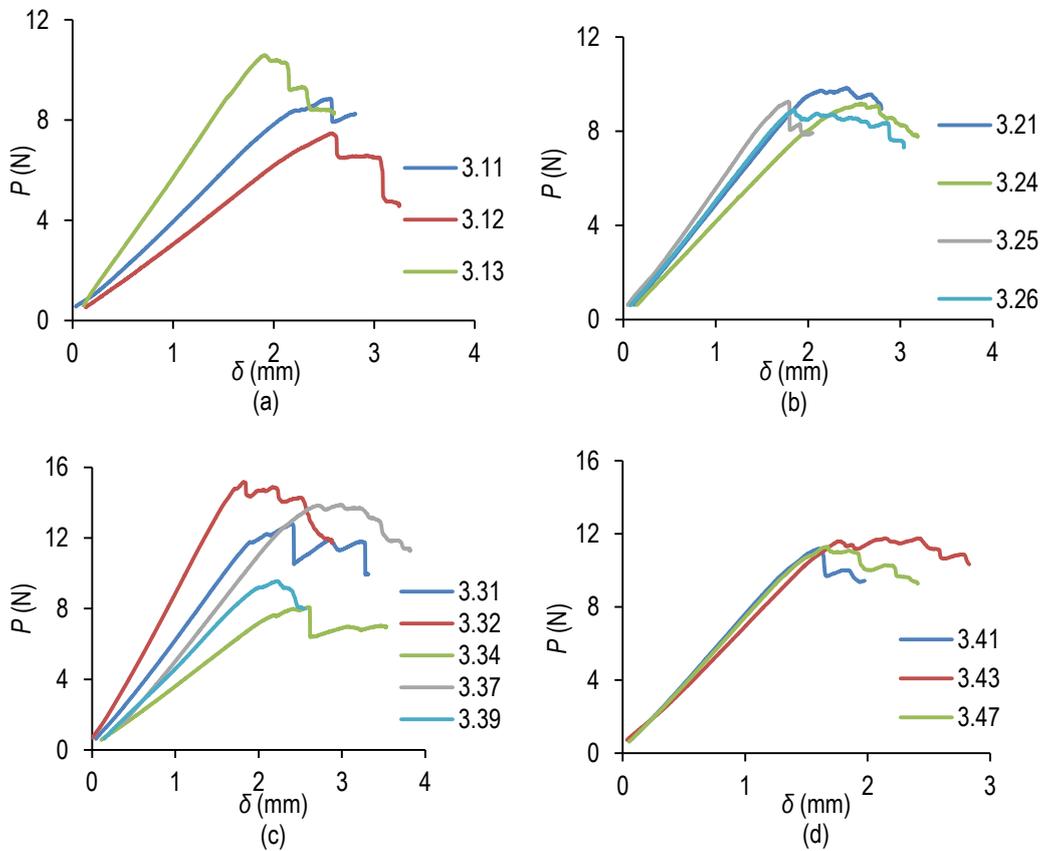


Figura 6.8 (a), (b) e (c) Curvas $P-\delta$ obtidas nos ensaios de fratura para os provetes sujeitos à HR1.

Os provetes sujeitos à humidade relativa de 67%, HR3, ao contrário do sucedido nos provetes submetidos à HR1, tiveram um ganho de massa de água, como é possível observar nas curvas de difusão referentes à humidade HR3 (Figura 6.9). Como é evidente, os últimos provetes a serem ensaiados à fratura em modo I, curvas da Figura 6.9 (f), com um tempo de cura de 195,25 horas, tiveram um ganho médio de massa de água superior aos restantes, 3,10%. No caso dos provetes cujas curvas força-deslocamento estão representadas na Figura 6.9 (a), tiveram uma perda média de massa de água de 0,18%, devido aos momentos de instabilidade que se observaram na fase inicial dos ensaios de difusão. Estes provetes estiveram sob estas condições atmosféricas 8,5 horas. Na Figura 6.9 (b), os provetes tiveram um tempo de estágio de 23,75 horas, ultrapassando os momentos iniciais de indefinição, tendo por isso estes um ganho médio de massa de água de 0,75%. No caso dos provetes da Figura 6.9 (c), depois de 31,75 horas de estágio, os provetes tiveram um ganho médio de água de 0,80%. Os provetes da Figura 6.9 (d), com 51,5 horas sob as condições atmosféricas de 67%, tiveram um ganho médio de massa de água de 1,63%. Aumentando o tempo de estágio para 147 horas, caso dos provetes da Figura 5.9 (e), estes atingiram os 3,05% de ganho de massa de água.



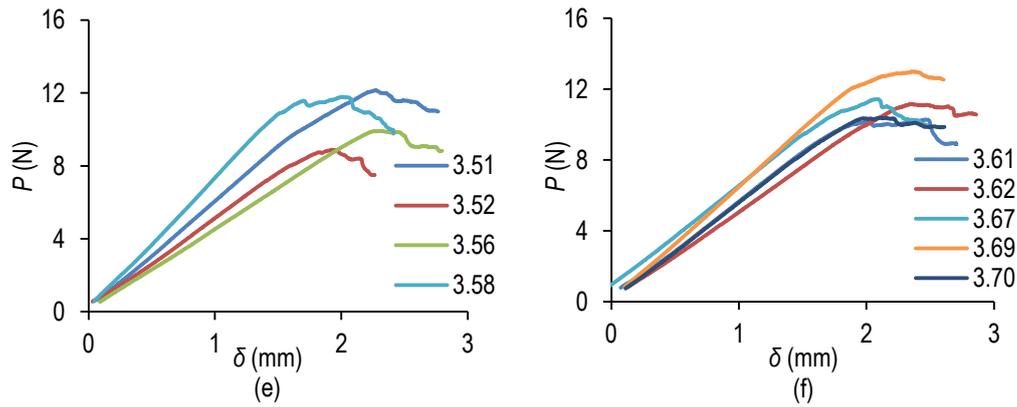
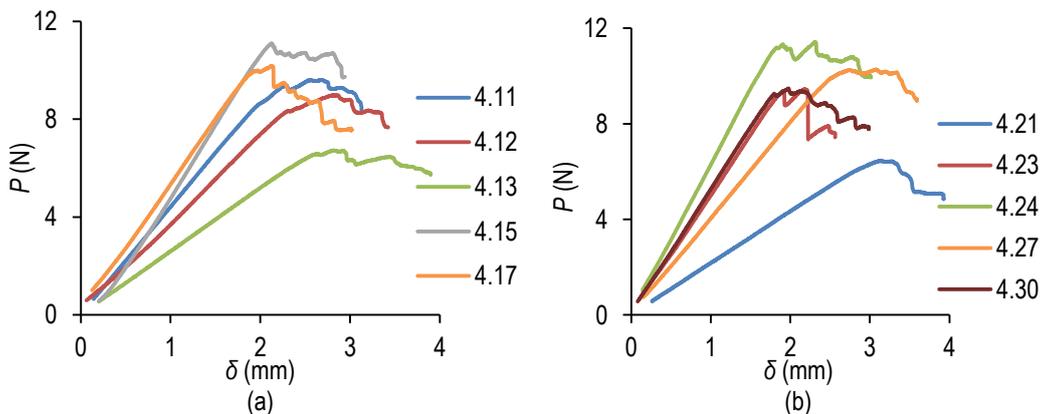


Figura 6.9 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) Curvas P - δ obtidas nos ensaios de fratura para os provetes sujeitos à HR3

Assim como os provetes sujeitos à humidade HR3, os provetes sujeitos à humidade HR4 tiveram ganhos de massa de água, que neste caso foi de 3,35%, após um tempo de estágio de 171,75 horas (provetes representados pelas curvas P - δ da Figura 6.10 (f)). Como foi também observado nos ensaios de difusão, a evolução dos ganhos de massa entre os provetes sujeitos a estas mesmas duas humidades relativas diferentes, foi muito idêntico. Com isto, naturalmente observou-se que para os provetes da Figura 6.10 (a), depois de 10 horas de estágio, houve uma perda de massa de água de 0,24%. Para os provetes cujas curvas P - δ estão representadas na Figura 6.10 (b), já se observou um ganho médio de massa de água de 0,64% após 23,25 horas. No caso dos provetes representados pelas curvas força-deslocamento das Figuras 6.10 (c) - (e) os tempos de cura foram de 33,25 horas, 52 horas e 147,75 horas respetivamente. A estes tempos de estágio estão associados ganhos médios de massa de água de 0,68%, 1,44% e 3,3% respetivamente.



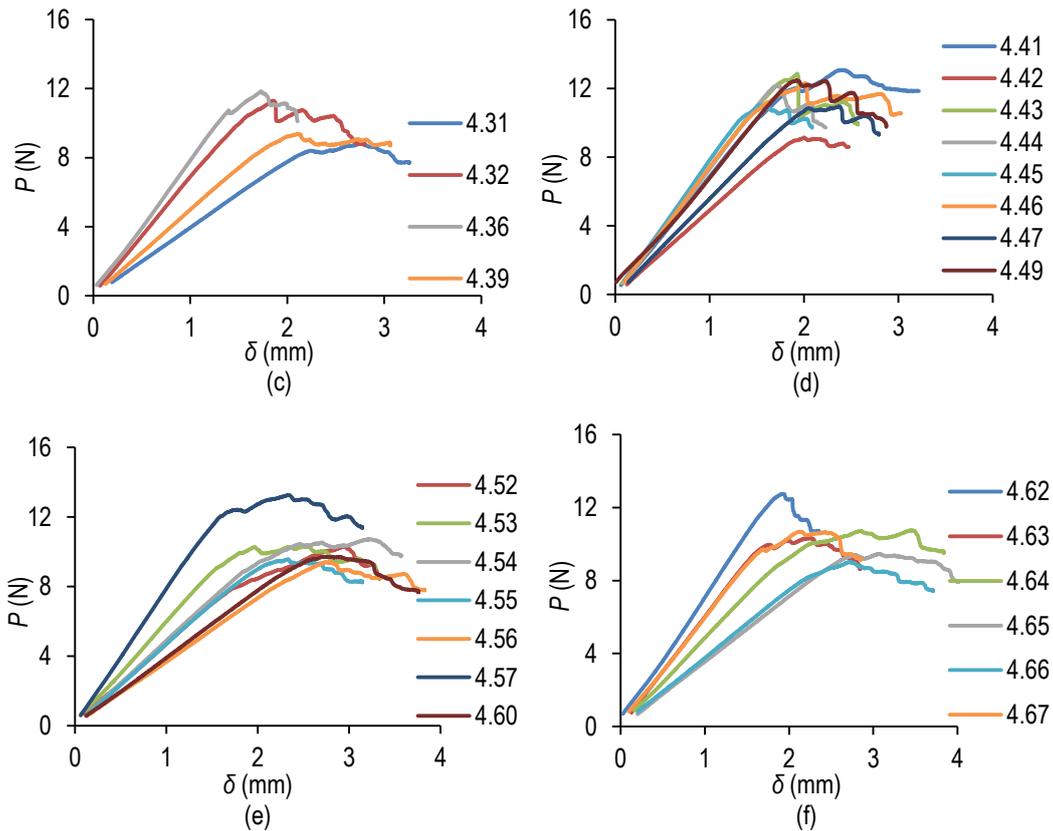


Figura 6.10 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) Curvas P - δ obtidas nos ensaios de fratura para os provetes sujeitos à HR4

6.4.2 Curvas de Resistência

Através dos ensaios de fratura e do procedimento descrito na secção 2.5.4 obtêm-se as curvas de *Resistência* (curvas- R). A partir destas curvas foram determinados os valores de taxa crítica de libertação de energia (G_{Ic}) para cada um dos provetes ensaiados, através da assíntota horizontal destas curvas (Figuras 6.11 (a)-(c)).

Todos os provetes representados na Figura 6.11 e na Tabela 6.5 estão inseridos nas mesmas condições atmosféricas, 35°C e 11% de humidade relativa, apenas diferindo o tempo de estágio a que foram submetidos. Pela análise da Figura 6.11 e da Tabela 6.5, podemos concluir que a dispersão dos valores de G_{Ic} , dos provetes cujo tempo de estágio foi o mesmo, foi reduzida, ultrapassando apenas por 1%, os 20% que é o valor máximo aceitável para a madeira.

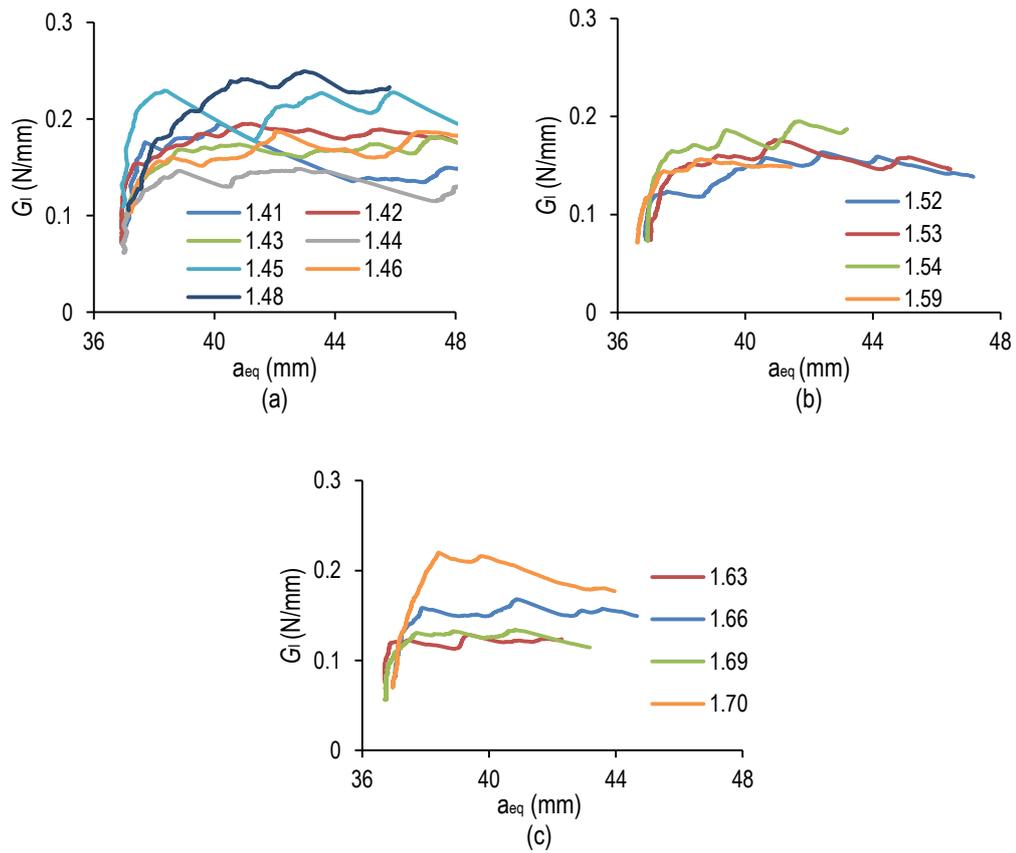


Figura 6.11 (a), (b) e (c) Curvas-R obtidas nos ensaios de fratura para os provetes sujeitos à HR1

Tabela 6.5 Valores da taxa crítica de libertação de energia G_{Ic} para os provetes da HR1

HR1								G_{Ic} médio (N/mm)	CoV %	
Provete	1.41	1.42	1.43	1.44	1.45	1.46	1.48	0,18	15	
G_{Ic}	0,183	0,183	0,166	0,145	0,213	0,18	0,24			
Provete	1.52	1.53	1.54	1.59					0,15	4
G_{Ic} (N/mm)	0,15	0,157	0,166	0,15						
Provete	1.63	1.66	1.69	1.70					0,15	21
G_{Ic} (N/mm)	0,12	0,15	0,13	0,2						

Todos os provetes representados na Figura 6.12 e na Tabela 6.6 também estão inseridos nas mesmas condições atmosféricas, 35°C e 67% de humidade relativa, apenas diferindo o tempo de estágio que foram submetidos. Pela análise da figura e da tabela, podemos concluir que a dispersão dos valores de G_{Ic} , dos provetes cujo tempo de estágio foi o mesmo, por vezes ultrapassou, por pouco, o valor máximo aceitável de 20%, como foi o caso dos valores de G_{Ic} dos provetes cujo tempo de estágio foi de 23,75 horas (provetes 21, 24, 25 e 26) e 31,75 horas (provetes 32, 33, 34 e 39).

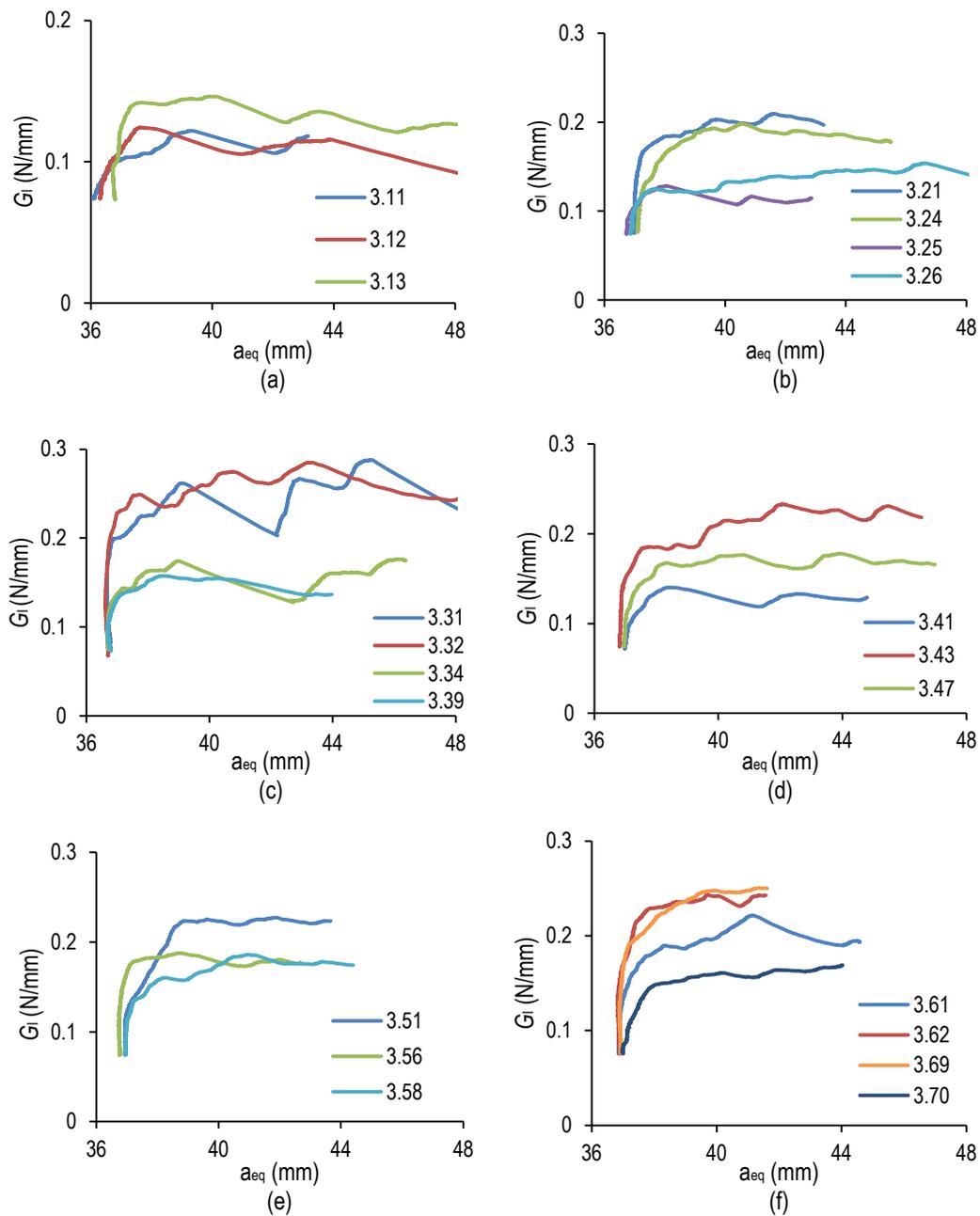
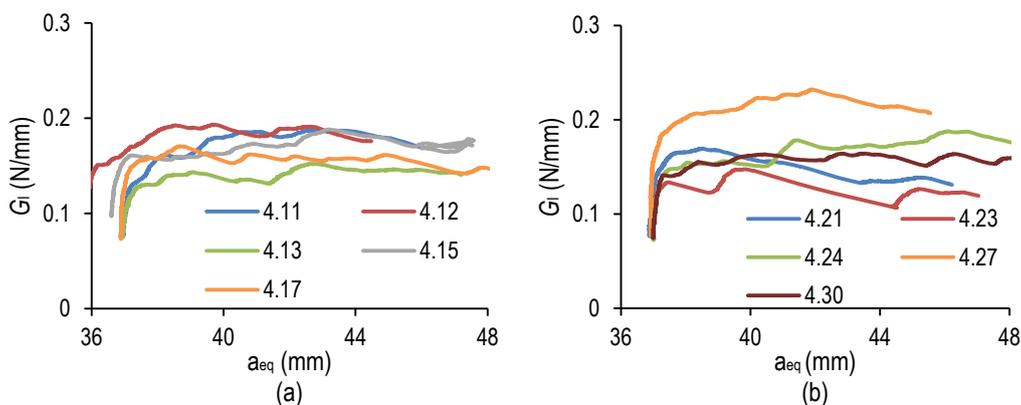


Figura 6.12 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) Curvas- R obtidas nos ensaios de fratura para os provetes sujeitos à HR3

Tabela 6.6 Valores da taxa crítica de libertação de energia G_{Ic} para os provetes da HR3

	HR3				G_{Ic} médio (N/mm)	CoV %
Provete	3.11	3.12	3.13			
G_{Ic} (N/mm)	0,118	0,124	0,141		0,14	8
Provete	3.21	3.24	3.25	3.26		
G_{Ic} (N/mm)	0,185	0,19	0,123	0,122	0,16	21
Provete	3.31	3.32	3.34	3.39		
G_{Ic} (N/mm)	0,258	0,248	0,172	0,156	0,21	22
Provete	3.41	3.43	3.47			
G_{Ic} (N/mm)	0,139	0,215	0,167		0,17	18
Provete	3.51	3.56	3.58			
G_{Ic} (N/mm)	0,225	0,186	0,184		0,20	10
Provete	3.61	3.62	3.69	3.70		
G_{Ic} (N/mm)	0,22	0,24	0,25	0,165	0,22	15

Para os provetes submetidos às condições atmosféricas de 35°C e 83% de humidade relativa, pela análise da Figura 6.13 e da Tabela 6.7, podemos concluir que a dispersão dos valores de G_{Ic} , dos provetes cujo tempo de estágio foi o mesmo, andou entre os 2% e os 16%, não ultrapassando por isso os 20%.



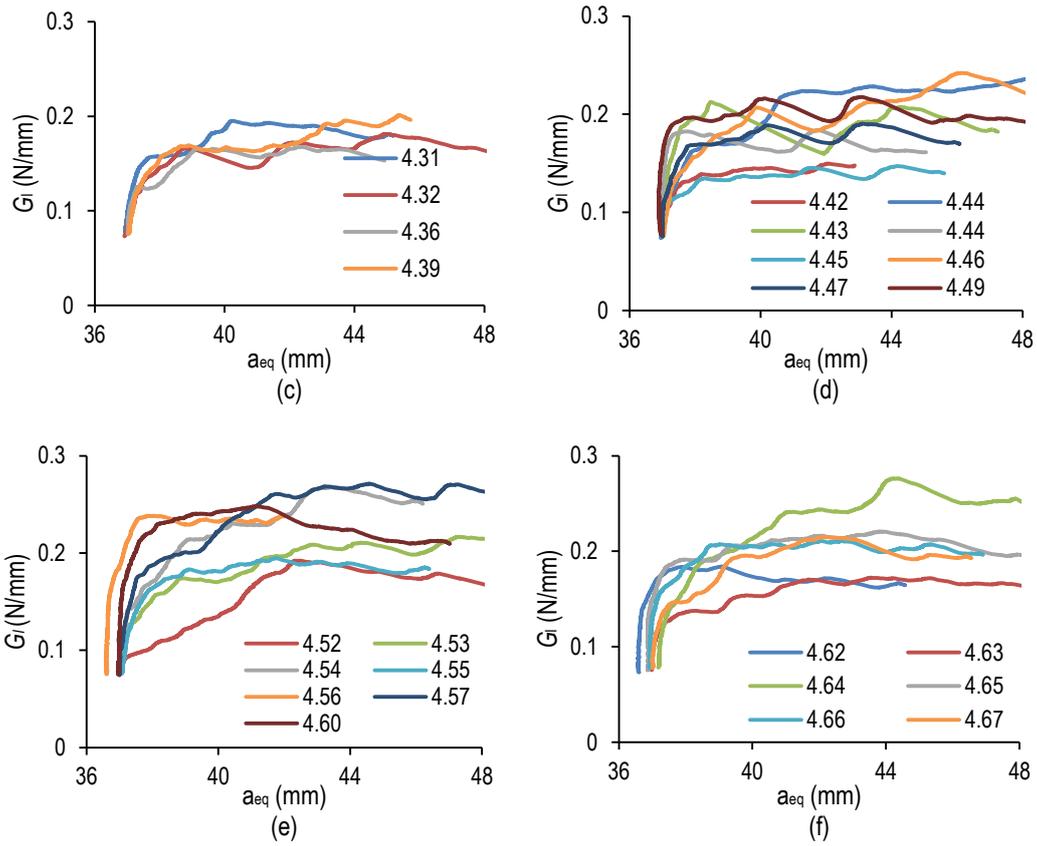


Figura 6.13 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) Curvas-R obtidas nos ensaios de fratura para os provetes sujeitos à HR4

Tabela 6.7 Valores da taxa crítica de libertação de energia G_{Ic} para os provetes da HR4

	HR4								G_{Ic} médio (N/mm)	CoV %
Provete	4.11	4.12	4.13	4.15	4.17					
G_{Ic} (N/mm)	0,182	0,191	0,14	0,158	0,158				0,17	11
Provete	4.21	4.23	4.24	4.27	4.30					
G_{Ic} (N/mm)	0,157	0,131	0,153	0,208	0,152				0,16	16
Provete	4.31	4.32	4.36	4.39						
G_{Ic} (N/mm)	0,157	0,164	0,164	0,165					0,16	2
Provete	4.41	4.42	4.43	4.44	4.45	4.46	4.47	4.49		
G_{Ic} (N/mm)	0,225	0,145	0,212	0,182	0,137	0,215	0,19	0,215	0,19	16
Provete	4.52	4.53	4.54	4.55	4.56	4.57	4.60			
G_{Ic} (N/mm)	0,185	0,208	0,262	0,193	0,237	0,268	0,245		0,23	13
Provete	4.62	4.63	4.64	4.65	4.66	4.67				
G_{Ic} (N/mm)	0,183	0,17	0,243	0,218	0,211	0,215			0,21	12

6.5 Propriedades de fratura

Devido ao elevado número de provetes usados, optou-se por seleccionar quatro provetes que tivessem sido submetidos a humidades relativas e tempos de estágio diferentes, e consequentemente diferentes ganhos ou perdas de massa de água, para simular o processo de fratura. Deste modo, avaliaram-se os parâmetros de fratura em modo I da madeira *Picea abies* L. com diferentes teores de humidade. Deste modo seleccionou-se o provete 70 da HR1, 1.70, com um tempo de estágio de 173 horas e com uma perda de massa de água de 4,59% da massa total; da HR3 o provete 3.39 e o provete

3.56, com tempos de estágio de 31,75 horas e 147,25 horas e com ganhos de massa de água de 0,68% e 2,99% da massa total, respectivamente; da HR4 selecionou-se o provete 4.60, com um tempo de estágio de 147,75 horas e com um ganho de massa de água de 3,18% da massa total.

A Figura 6.14 representa a deformada do provete no processo de simulação numérica.

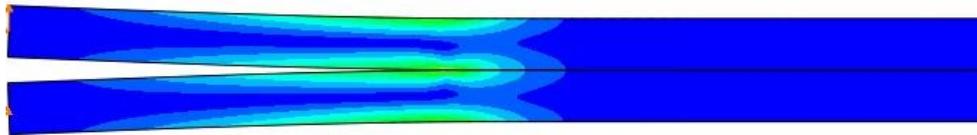


Figura 6.14 Deformada do provete na simulação por elementos finitos

As Figuras 6.15 a 6.18 apresentam todos os acordos numérico-experimentais obtidos para as curvas $P-\delta$ e respectivas curvas- R obtidas nos ensaios de fratura.

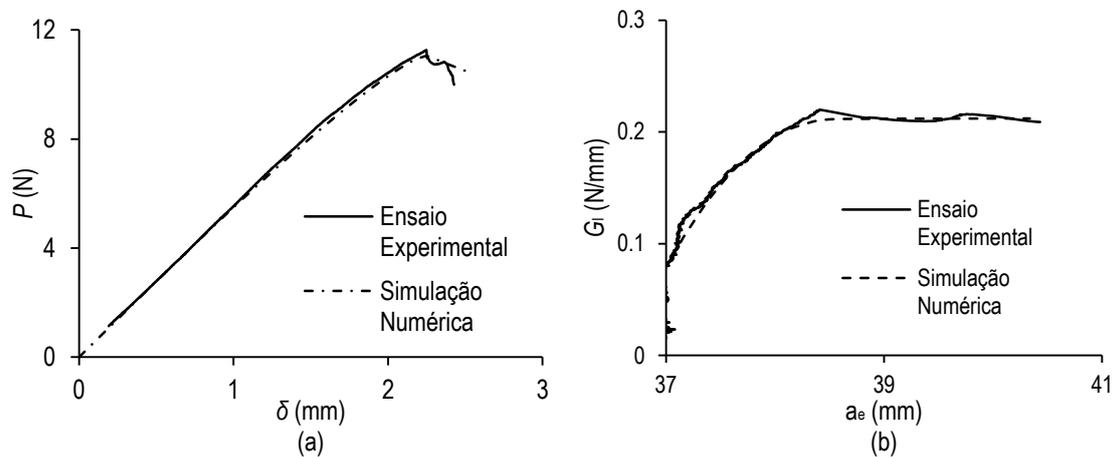


Figura 6.15 (a) Acordo numérico-experimental da curva $P-\delta$ para o provete 1.70; (b) acordo numérico-experimental da curva- R para o provete 1.70

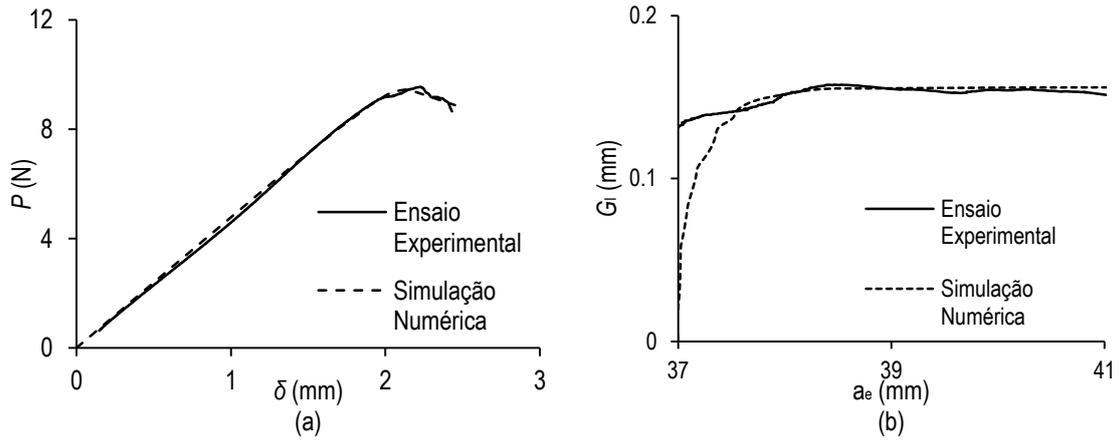


Figura 6.16 (a) Acordo numérico-experimental da curva $P-\delta$ para o provete 3.39; (b) acordo numérico-experimental da curva- R para o provete 3.39

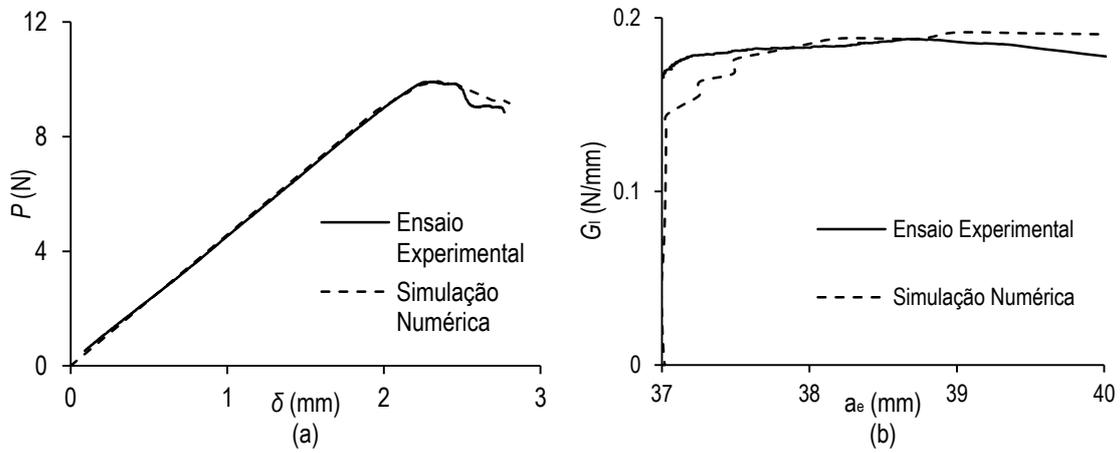


Figura 6.17 (a) Acordo numérico-experimental da curva $P-\delta$ para o provete 3.56; (b) acordo numérico-experimental da curva- R para o provete 3.56

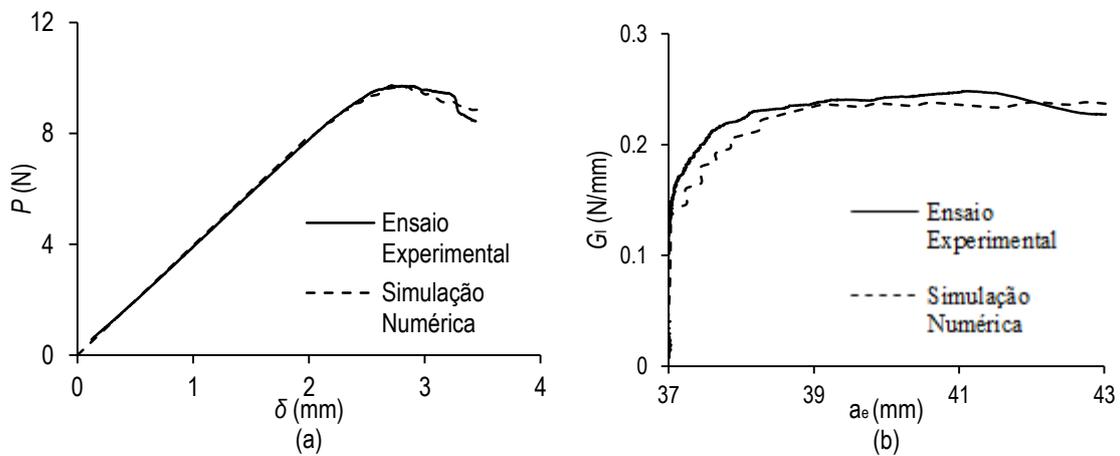


Figura 6.18 (a) Acordo numérico-experimental da curva $P-\delta$ para o provete 4.60; (b) acordo numérico-experimental da curva- R para o provete 4.60

Salvo algumas pequenas não conformidades que as curvas experimentais apresentam, considera-se que foram obtidos acordos numéricos capazes de reproduzir apropriadamente as curvas experimentais. A Tabela 6.8 sintetiza os valores dos parâmetros da lei bilinear de dano correspondentes aos acordos numéricos previamente descritos, também representados na Figura 6.19. Este procedimento permitiu quantificar de forma indireta, a tenacidade à fratura dos provetes de madeira *Picea abies* L., em função da sua humidade relativa, assim como permitiu avaliar a lei de dano em modo I deste material.

Tabela 6.8 Parâmetros coesivos para os diferentes provetes

Provete	% massa de água adquirida	E_L (MPa)	f_t (MPa)	f_b (MPa)	w_b (mm)	G_{Ic} (N/mm)
1.70	-4,59	7898	5	4	0,011	0,2
3.39	0,68	6500	13	4	0,012	0,156
3.56	2,99	6140	22	2	0,012	0,186
4.60	3,18	5130	21	2	0,011	0,205

Analisando a Tabela 6.8 é de salientar os baixos valores do módulo de elasticidade E_L dos provetes, relativamente ao que era o valor de referência da Tabela 5.3. Esta constatação pode estar relacionada com a escala a que os ensaios são realizados. Com efeito os valores de referência que constam da Tabela 5.3 correspondem a propriedades obtidas em provetes de maior dimensão do que os que foram ensaiados neste estudo. Outro facto importante é a tendência decrescente que este valor regista conforme aumenta a percentagem de água presente no provete de madeira, ou seja, quanto maior a quantidade de água no provete, menor é a rigidez deste.

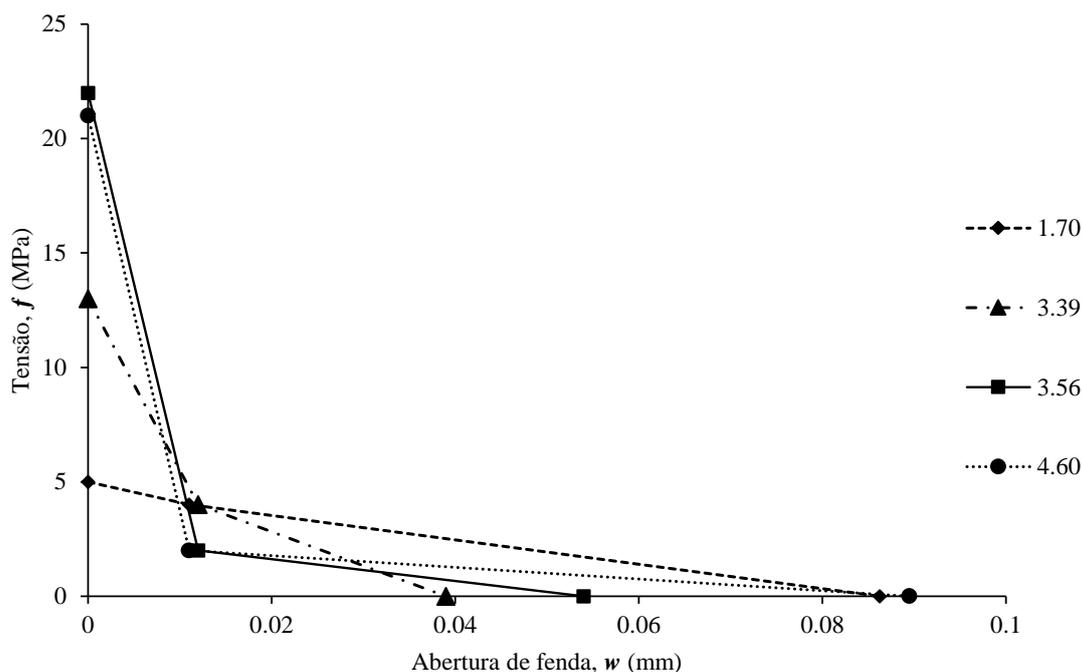


Figura 6.19 Leis bilineares de dano para os provetes: 1.70; 3.39; 3.56 e 4.60

A Figura 6.19 permite concluir que com o aumento do teor de humidade observa-se um aumento da abertura crítica de fenda w_c e um aumento da taxa crítica de libertação de energia (G_{Ic}), fugindo à regra apenas o provete 1.70. Isto significa que para maiores teores de água presentes na madeira, a fenda propagou-se para maiores aberturas de fenda (w_c). A resistência local (f_t) também aumentou com o aumento da quantidade de água presente no provete. Apesar deste facto, com este aumento de humidade nos provetes, verifica-se que o material começa a apresentar um comportamento mais dúctil.

Com a variação da percentagem de água adquirida ao longo dos ensaios de difusão, a contribuição das parcelas da energia de fratura coesiva, $G_{f\mu}$ devido à microfissuração e G_{fb} devido ao fenómeno de ponte de fibras, também são alteradas (Tabela 6.9). Pode observar-se que para um teor de água mais baixo a parcela dominante é a correspondente a G_{fb} , cujo valor chega aos 86% do respetivo valor de G_{Ic} . Conforme aumenta a percentagem de massa de água presente na madeira esta contribuição da energia associada ao fenómeno de ponte de fibras para G_{Ic} , diminui, aumentando desta forma a contribuição da micro fissuração $G_{f\mu}$, sendo que para um ganho de massa de água de aproximadamente 0%, estas parcelas igualam-se. Para valores de ganhos de massa de água superiores, o efeito da micro fissuração assume um papel mais expressivo, chegando aos 70% do valor de G_{Ic} . Isto demonstra que o fenómeno que ofereceu maior resistência

à propagação da fenda foi o de ponte de fibras para teores de água na madeira baixos, e a micro fissuração para teores de água na madeira mais altos.

Tabela 6.9 Contribuição percentual dos fenômenos de amaciamento para G_{Ic}

Provete	% massa de água adquirida	$G_{f\mu}$		G_{fb}		G_{Ic} (N/mm)
		(N/mm)	(%)	(N/mm)	(%)	
1.70	-4,59	0,027	13,75	0,172	86,25	0,20
3.39	0,68	0,078	50	0,078	50	0,156
3.56	2,99	0,132	70,97	0,054	29,3	0,186
4.60	3,18	0,115	56,3	0,089	43,7	0,205

6.6 Variação de massa M vs G_{Ic}

O valor da taxa crítica de libertação de energia G_{Ic} também varia com a quantidade de água adquirida pela madeira. Nas Figuras 6.20 a 6.22 é apresentada a variação da taxa crítica de libertação de energia G_{Ic} em função do ganho de massa M . Apesar de alguns valores irregulares, existe claramente uma tendência linear de aumento de G_{Ic} com o ganho de massa de água.

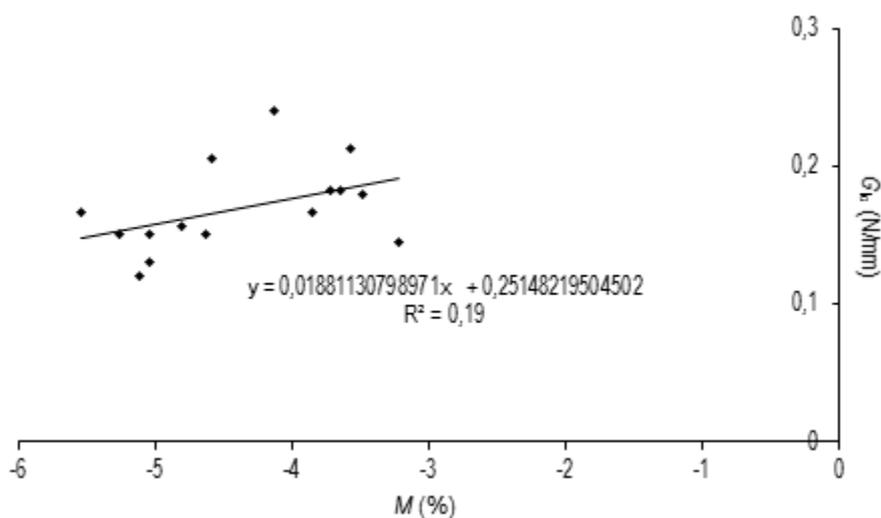


Figura 6.20 Variação de G_{Ic} com a variação de massa de água M para os provetes sujeitos à HR1

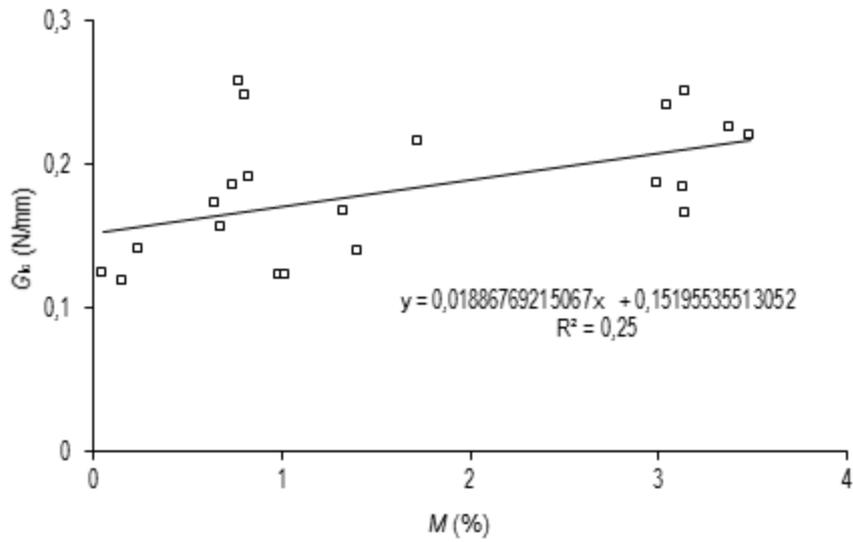


Figura 6.21 Variação de G_{Ic} com a variação de massa de água M para os provetes sujeitos à HR3

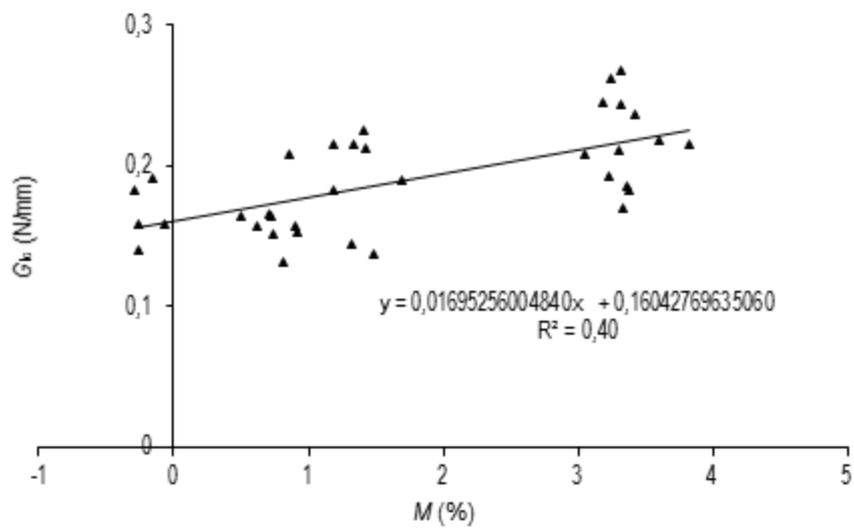


Figura 6.22 Variação de G_{Ic} com a variação de massa de água M para os provetes sujeitos à HR4

Na Figura 6.23 juntaram-se os valores médios de G_{Ic} , retirados das Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7, dos últimos conjuntos de provetes a serem ensaiados à fratura de cada humidade relativa. Através desta figura obtém-se de uma forma geral a variação do ganho de massa M e de G_{Ic} ao longo de toda a campanha de ensaios.

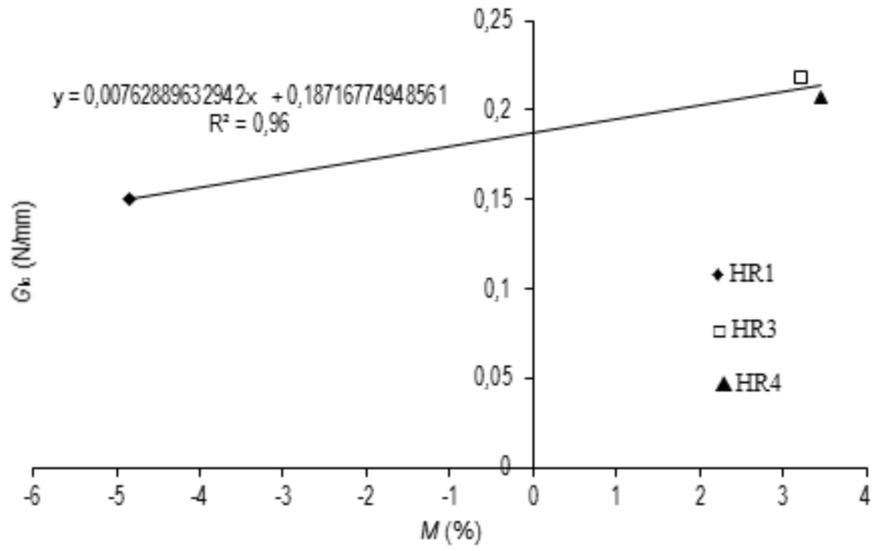


Figura 6.23 Variação de G_{IC} com a variação de massa de água M dos últimos provetes a serem ensaiados de cada HR

CAPÍTULO VII

Conclusões

A presente dissertação de Mestrado teve como objetivo caracterizar as propriedades de difusão da água e de fratura em puro modo I da madeira *Picea abies* L. Deste modo, fabricaram-se provetes com a configuração DCB (*Double Cantilever Beam*) que foram sujeitos a diferentes tipos de humidade relativa, sendo posteriormente realizados ensaios mecânicos de fratura, com o intuito de avaliar a evolução da taxa crítica de libertação de energia de fratura com a variação de massa de água do material.

No que diz respeito à difusão, a cura dos provetes foi realizada em quatro condições diferentes, o que reproduziu diferentes ganhos de massa de água nos provetes. Verificou-se que para atmosferas com humidades relativas de 67% e 83% houve o fenómeno de adsorção por parte dos provetes e para uma atmosfera com uma humidade relativa de 11% houve secagem. No entanto, em nenhuma das quatro humidades relativas diferentes os resultados experimentais refletem curvas típicas de sorção. As instabilidades observadas nas curvas de sorção devem-se principalmente à pequena área do provete que permite a difusão da água, pois a quase a totalidade da transferência de massa ocorre na direção longitudinal e através do plano transversal, que é o plano onde são visíveis os anéis de crescimento. Através de dados obtidos experimentalmente realizaram-se simulações numéricas pelo MEF, no software ANSYS e um estudo analítico, que reproduziram as curvas experimentais.

Relativamente à fratura, foram realizados ensaios em modo I em provetes com diferentes teores de humidade, com o objetivo de avaliar a evolução da taxa crítica de libertação de energia G_{Ic} . Aplicou-se com sucesso o método de calibração da flexibilidade baseado na Teoria de Vigas, CBBM (*Compliance Based Beam Method*), e a partir das curvas $P-\delta$ obtiveram-se as curvas de *Resistência*.

Simulou-se o comportamento à fratura em modo I recorrendo a um modelo de dano coesivo. Reproduziu-se com bom acordo as curvas força-deslocamento obtidas experimentalmente, empregando a lei de dano bilinear de Petersson.

Verificou-se uma tendência decrescente do valor do módulo de elasticidade E_L dos provetes à medida que aumenta a percentagem de água presente no provete de madeira, ou seja, quanto maior a quantidade de água no provete, menor é a rigidez deste.

Com o aumento da humidade relativa observou-se um aumento da abertura crítica de fenda w_c , significando isto que para maiores teores de água presentes na madeira, a fenda se propagou para maiores aberturas de fenda (w_c). A resistência local (f_t) também aumentou com o teor de água presente. Com este aumento de humidade nos provetes pôde verifica-se que o material apresenta um comportamento mais dúctil.

A contribuição das parcelas da energia de fratura coesiva devido à micro fissuração e pontes de fibras, também são alteradas com o teor de humidade da amostra. Para teores de água mais baixos o fenómeno que ofereceu maior resistência à propagação de fenda foi o de ponte de fibras, enquanto para teores de água mais elevados foi a micro fissuração.

Relativamente à evolução da taxa crítica de libertação de energia G_{Ic} com o aumento de massa de água M , pôde verificar-se um aumento linear.

Bibliografia

Atkins AG and Mai YW (1985). Elastic and Plastic Fracture. Ellis Horwood, UK ISBN 0-85312-562-7.

ASTM E 104-85, 1991, “Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solution”, American Society for Testing and Materials, Book of ASTM Standards. ASTM Philadelphia, PA.

Barreto AMJP (2008). Análise numérica do comportamento à fractura da madeira de Pinus pinaster Ait. sob solicitações de modo misto I + II, FEUP.

Carvalho, Augusto Paulo Ferreira. “Isotérmica de sorção da madeira de pinho marítimo (Pinus Pinaster Ait.)” Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2009.

Crank, J. The mathematics of diffusion. 2^a. Oxford: Clarendon Press, 1975.

de Moura M. F. S. F., Morais, J.J.L., Dourado, N., 2008, “A New Data Reduction Scheme Mode I Wood Fracture Characterization Using the DCB Test”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 75, Pgs. 3852-3865.

de Moura MFSF, Gonçalves JPM, (2013). Cohesive zone model for high-cycle fatigue of adhesively bonded joints under mode I loading. International Journal of Solids and Structures. Vol. 51: 1123-1131

Dourado, N. M. M., 2008, “R-Curve behaviour and size effect of a quasibrittle material: Wood”, Doutoramento em Ciências de Engenharia, área de Engenharia Mecânica, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) e Universidade de Bordéus I (UB1) - em regime de Co-Tutela.

Dourado N, de Moura MFS, Morais JL, Silva MAL (2010). Estimate of resistance-curve in wood through double cantilever beam test. Holzforschung, Vol. 64: 119-126.

Esteves, Carlos Manuel Garcia. “Identificação das propriedades de difusão na madeira *Pinus Pinaster Aiton*.” Departamento de Engenharia, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2009.

Khazaei, J. “Water Absorption Characteristics of Three Wood Varieties.” *Agronomical Research In Moldova* Vol. XLI , No. 2 (134) (2008): 5-16.

Kocaeffe, Duygu, Ramdane Younsi, Sandor Poncsak, e Yasar Kocaeffe. “Comparison of different models for the high-temperature heat-treatment of wood.” *International Journal of Thermal Sciences* 46 (2007): 707-716.

Kollman F P F, Côté W A, 1984, “Principles of wood science and technology. Solid Wood”, Springer-Verlag, Berlin.

Lewin M. and I.S. Goldstein. 1991, “Wood structure and composition”. *International Fiber Science and Technology Series*, Vol. 11.

Meireles, António José Oliveira (2013), “Efeito de escala em provetes de geometria TDCB: Comportamento da curva-*R* e análise assintótica”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Monteiro, Pedro Miguel Fernandes (2013), “Caracterização da madeira de *Pinus Pinaster* à fratura em modo I à escala dos anéis de crescimento”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Morel S (2008). Size effect in quasibrittle fracture: derivation of the energetic Size Effect Law from equivalent LEFM and asymptotic analysis. Submitted to *Int J Fract*.

NP – 614: Norma Portuguesa: Madeiras – Determinação do teor de água, 1973.

Oliveira J. M., 2004, “Aplicação do ensaio de Arcan na identificação do comportamento ao corte da madeira”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os- Montes e Alto Douro, Portugal, Vila Real.

Pereira J., 2003, “Comportamento mecânico da madeira em tracção nas direcções de simetria material”, Tese de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.

P.-E. Petersson, “Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials,” 1981.

Ribeiro, P., Morais, J., Dourado, N., Moura, M., 2004, “Simulação por elementos finitos do ensaio DCB para a madeira de Pinus pinaster Ait.”, Conferência do Cimad’04: a madeira na construção; Actas da Conferência: Pgs. 231-240; Universidade do Minho; Guimarães; Portugal; 25 e 26 de Março de 2004.

Rocha, Rita Sofia Ferreira (2011), “Avaliação numérica das propriedades de difusão da madeira ao nível da célula e dos anéis de crescimento”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Rodrigues, David José Gonçalves (2014), “Caracterização numérico-experimental do comportamento mecânico da madeira submetida a regimes de carregamento cíclico”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Rowell, Roger M. “Moisture properties.” In Handbook of wood chemistry and wood composites, de Roger M. Rowell. U.S.A.: Taylor & Francis, 2005.

Rowell, Roger M., Roger Pettersen, James S. Han, S. Jeffrey Rowell, e Mandla A. Tshabalala. “Cell Wall Chemistry.” In Handbook of wood chemistry and wood composites, de Roger M. Rowell. U.S.A.: Taylor & Francis, 2005.

Santos N. (2010). Identificação dos parâmetros da lei de Petersson. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD).

Shen, Chi-Hung, e George S. Springer. “Moisture absorption and desorption of composite materials.” J. Composite materials 10 (Janeiro 1976): 2-20.

Siau, John F. Wood: influence of moisture on physical properties. Department of Wood

Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University: Copyright, 1995.

Siau, J.F., 1984, “Transport Process in Wood”. Springer-verlag, New York.

Simpson, William T. Dry Kiln Operator’s Manual: Agricultural Handbook 188. Madison, Wisconsin: United States Department of Agriculture, 1991.

Stanzl-Tschegg SE, Tan DM, Tschegg EK (1995). New splitting method for wood fracture characterization. Wood Sci Tech; 29:31–50.

Xavier, J.C., 2003, “Caracterização do comportamento ao corte da madeira usando o ensaio de Iosipescu”, Tese de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.

Vaz, Cristiana Maria Ferreira (2014), “Efeito da perda de massa nas propriedades de difusão e de fratura em modo I dos geopolímeros”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.