



João Afonso da Silva Alfaro Marreiros Alvito
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LIGAÇÕES EM PAINÉIS DE CEMENT BONDED PARTICLE BOARDS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil, Perfil de Estruturas

Orientador: Válder José da Guia Lúcio, Prof. Doutor,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
Co-orientador: Carlos Chastre Rodrigues, Prof. Doutor,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Zuzana Dimitrovová
Arguente: Prof. Doutor António Pinho Ramos
Vogal: Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio
Vogal: Prof. Doutor Carlos Chastre Rodrigues

"*Copyright*" João Afonso da Silva Alfaro Marreiros Alvito, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento a todos aqueles que durante estes últimos anos me ajudaram, direta ou indiretamente, a concluir a presente dissertação, mas em particular:

Ao Prof. Doutor Válder Lúcio, o meu orientador da dissertação, que sem o qual este trabalho nunca estaria concluído, pelas suas críticas, conhecimentos e conselhos prestados.

Ao Prof. Doutor Carlos Chastre Rodrigues, o meu co-orientador da dissertação pelo apoio e disponibilidade prestada quando precisei.

À VIROC pelo fabrico de todo o material testado neste trabalho e pelo apoio prestado, nomeadamente ao Engenheiro Pinheiro Soares.

À TECNISATA pelo fabrico das garras que foram indispensáveis para este trabalho e por todo o serviço prestado antes e depois do fabrico destas.

Ao Engenheiro Rui Marreiros, à Engenheira Carla Marchão, ao Engenheiro André Almeida e ao Jorge Silvério por todo o apoio transmitido durante os trabalhos laboratoriais.

Ao David, Filipe, João, Miguel e Roland pela sua amizade, ajuda e incentivo durante todos os anos de curso.

À Filipa pelo companheirismo destes anos.

Aos meus pais e ao meu irmão por todo o apoio, carinho e sobretudo paciência.

Resumo

Na presente dissertação estuda-se a utilização de CBPB (Cement-Bonded Particle Boards) como material estrutural e averigua-se se este tem capacidade para resistir, como elemento estrutural, a cargas de tração. Serão apresentados diversos ensaios realizados relacionados com a resistência à tração do CBPB, tal como o seu comportamento em diversos tipos de ligações e o estudo do seu coeficiente de dilatação térmica linear.

O CBPB é um material compósito formado por cimento e madeira e é hoje em dia comercializado em Portugal pela VIROC. O CBPB é normalmente utilizado como revestimento, embora existam produtos também eles compósitos de madeira e cimento a serem utilizados como substitutos de madeira em países com climas húmidos e quentes.

A resistência deste material depende do tipo de madeira utilizado, do material ligante, da cura, do índice de inibição entre o cimento e a madeira e o traço madeira:cimento. O CBPB é um material resistente a humidade, fungos, fogo e térmitas.

Nesta dissertação ensaiaram-se diversos provetes de CBPB, constituídos por cimento Portland tipo II (CEM II / A-L 42,5r), madeira de Pinus pinaster e Pinus pinea, silicato de sódio e sulfato de alumínio. Este provetes foram submetidos a cargas de tração e a temperaturas e humidades controladas numa câmara climática.

O CBPB apresentou uma resistência média à tração de 7 MPa. Determinou-se um coeficiente de dilatação térmica linear de $1,15 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

Palavras chave:

Cimento-madeira, Compósito, Coeficiente térmico, Ligações, Tração.

Abstract

Structural behavior of connectors on CBPB panels

This dissertation is a study of the use of CBPB (Cement-Bonded ParticleBoards) as a structural material and ascertains whether it has the capability to resist, as a structural element, tensile loads. Various tests are shown related to the tensile strength of the CBPB as well as its behaviour in various types of connections. There is also the research of its linear thermal expansion coefficient.

The CBPB is a composite material composed of cement and wood and is today marketed in Portugal by VIROC. The CBPB is usually used as insulation material, although there are other wood-cement composites that are used as a substitute to wood in countries with hot and humid climates.

The mechanical resistance of this material depends on the type of wood used, the binder material, cement setting, and the wood:cement ratio. The CBPB is a material with heavy resistance to humidity, fungi, termites and fire. In this dissertation there were tested various CBPB pieces consisting of Portland cement type II (CEM II / A-L 42,5R), Pinus pinaster and Pinus pinea wood, sodium silicate and aluminium sulphate.

The CBPB showed an average tensile strength of 7 MPa. And it was determined a linear thermal expansion coefficient of $1,15 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

Keywords:

wood-cement, composite, thermal coefficient, connectors, tensile.

Índice de Matérias

Índice de Matérias	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Quadros	xvii
Simbologia	xix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Organização da dissertação	3
2 A Madeira Como Material de Construção	5
2.1 Introdução	5
2.2 A árvore	6
2.3 A macroestrutura	7
2.4 Propriedades da madeira	8
2.4.1 Propriedades físicas	8
2.4.1.1 Teor em água	8
2.4.1.2 Massa Volúmica	9
2.4.2 Propriedades mecânicas	9
2.4.2.1 Tração	9
2.4.2.2 Compressão	9
2.4.2.3 Flexão	10
2.5 Fatores que influenciam as propriedades mecânicas da madeira	10
2.5.1 Massa específica e densidade	11
2.5.2 Nós	11

Índice de Matérias

2.5.3	Fio da Madeira	11
2.5.4	Fluência	11
2.5.5	Teor em água	12
2.5.6	Ataques Biológicos	12
2.6	Derivados de madeira	12
2.6.1	Materiais constituintes	13
2.6.2	Principais derivados de madeira	15
2.6.2.1	Madeira lamelada colada (GL)	15
2.6.2.2	Contraplacados (PW)	15
2.6.2.3	Aglomerados de tiras longas e orientadas (OSB)	17
3	Os Derivados de Madeira e Cimento	19
3.1	Enquadramento geral	19
3.2	Placa de aglomerado madeira-cimento (CBPB)	20
3.2.1	Processo de Fabrico do CBPB	21
3.2.2	Normas aplicáveis aos aglomerados madeira-cimento	23
3.3	Compatibilidade madeira-cimento	24
3.3.1	Tratamento de compatibilidade com adjuvantes	27
3.3.1.1	Idade da árvore	27
3.3.1.2	Época de corte	28
3.3.1.3	Armazenamento	28
3.3.1.4	Tipo de cimento e adjuvantes	28
3.3.1.5	Lavagem das partículas de madeira	28
3.4	Propriedades mecânicas do CBPB	28
3.4.1	Resistência à compressão	29
3.4.2	Resistência à flexão	31
4	Descrição Dos Ensaios	33
4.1	Introdução	33
4.2	Ensaio de determinação do coeficiente de dilatação térmica	34
4.3	Ensaios de resistência à tração	36
4.3.1	Ensaio de tração uniaxial	37
4.3.2	Ensaio de tração uniaxial em peças furadas	39
4.3.3	Ensaios de rotura por tração em ligações aparafusadas	41
5	Apresentação e Análise dos Resultados	45
5.1	Introdução	45
5.2	Ensaios de dilatação térmica	45
5.3	Ensaios de tração	47
5.3.1	Ensaios de tração uniaxial	47
5.3.2	Ensaios de tração uniaxial em peças furadas	51
5.3.3	Ensaios de rotura por tração em ligações aparafusadas	53
5.4	Estudo dos efeitos de retração e temperatura nas ligações	58
6	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	61

6.1	Conclusões e comentários finais	61
6.2	Desenvolvimentos futuros	63
A	Resultados dos ensaios para a determinação do coeficiente de dilatação térmica	69

Índice de Figuras

2.1	Eixos principais da madeira (adaptado de Kretschmann, 2010).	5
2.2	Estrutura de uma árvore (adaptado de Humphries e Sutton, 1996).	6
2.3	As três divisões estruturais: a) ultra-estrutura; b) microestrutura; c) macroestrutura (adaptado de Martins, 2009).	7
2.4	Constituição do tronco de uma árvore (adaptado de Franco, 2008).	7
2.5	Curva de tensão-extensão ($\sigma - \epsilon$), em madeira isenta de defeitos, na direção das fibras e na direção perpendicular às fibras. A traço contínuo indicam-se as curvas em tração e a tracejado as curvas em compressão (adaptado de Carvalho, 2007).	10
2.6	Classificação dos elementos de madeira (retirado de Marra, 1992).	14
2.7	Esquema ilustrativo de um contraplacado (adaptado de Porteous e Kermani, 2007).	16
2.8	Esquema de corte da lâmina de um contraplacado, adaptado de Patton 1982.	16
2.9	Diferentes aplicações de contraplacados.	17
2.10	Esquema ilustrativo de um aglomerado de tiras longas e orientadas (adaptado de Pfeil e Pfeil 2003).	18
2.11	Diferentes aplicações de OSB's.	18
3.1	Placa de aglomerado madeira-cimento.	20
3.2	Gama de variação da massa volúmica entre placa (Machado, 2005).	21
3.3	Diversas aplicações de painéis CBPB produzidas pela Viroc - a)coberturas; b) paredes; c) cofragem perdida; d)tectos; e) pavimentos; f) fachadas.	22
3.4	Fases do processo de produção do CBPB (retirado de Faria, 2010).	23
3.5	Curva de temperatura no processo de hidratação do cimento (adaptado de Wei <i>et al.</i> , 2000).	24
3.6	Curva de temperatura no processo de hidratação do cimento e do cimento com madeira (adaptado de Hachmi <i>et al.</i> , 1990).	25

Índice de Figuras

3.7	Representação da área da curva de hidratação de uma mistura de cimento simples e de uma mistura de cimento com madeira (adaptado de Hachmi <i>et al.</i> , 1990).	27
3.8	Influência do teor de fibras por massa para diferentes aglomerados de madeira e cimento na resistência à flexão (retirado de Coutts e Campbell, 1980).	30
3.9	Diagrama tensão - extensão dos provetes de CBPB ensaiados à compressão em ambas as faces (retirado de Faria, 2013).	30
3.10	Diagrama tensão - extensão de dois provetes diferentes de CBPB ensaiados à compressão (retirado de Faria, 2013)	31
3.11	Diagrama força-extensão de materiais compósitos de madeira-cimento e de "cimento simples" à flexão. Adaptado de Wolfe e Gjinolli (1997).	32
4.1	Composição dos provetes (percentagem dos constituintes em peso) (adaptado de Faria, 2010).	33
4.2	Equipamento utilizado para a realização dos ensaios: a) câmara climática (<i>Fitoclima 300</i>); b) máquina de tração universal (<i>Zwick Z050</i>).	34
4.3	Provete E11.	35
4.4	Disposição das chapas metálicas.	35
4.5	Modelo de Provete segundo a EN 781 (2004) para ensaios à tração.	36
4.6	Esquema das garras utilizadas nos ensaios (medidas em mm).	37
4.7	Provete do tipo E2	38
4.8	Pormenor dos ensaios aos provetes E21 e E22.	39
4.9	Provete do tipo E3.	39
4.10	Tensões existentes em zonas descontinuas.	40
4.11	Pormenor dos ensaios aos provetes E31 e E32.	41
4.12	Determinação do coeficiente de concentração de tensão (adaptado de Pilkey e Pilkey, 2008)	42
4.13	Provetes E4: a) Furo a 100 mm; b) Furo a 50 mm.	43
4.14	Pormenor dos ensaios aos provetes E4.	44
5.1	Resultados obtidos no ensaio para a determinação do coeficiente de dilatação térmica.	46
5.2	Diagramas tensão - extensão dos ensaios de rotura à tração dos provetes. Em cima: Provetes E21. Em baixo: Provetes E22.	48
5.3	Modos de rotura obtidos nos provetes de CBPB durante os ensaios de tração uniaxial. Em cima: rotura entre extensómetros. Em baixo: rotura fora da zona dos extensómetros.	48
5.4	Heterogeneidade verificada nos provetes de CBPB testados	49
5.5	Comparação das propriedades mecânicas dos provetes com 12 e 16 mm de espessura.	51
5.6	Diagramas força - deslocamento dos ensaios de rotura à tração dos provetes E31 e E32	51
5.7	Modo de rotura verificados nos provetes E3: a) rotura pelo furo; b) rotura junto à garra.	52

5.8	Modo de rotura observado na utilização de um parafuso com 5 <i>mm</i> de diâmetro.	53
5.9	Diagramas força - deslocamento dos ensaios de rotura por tração em ligações aparafusadas em provetes com 12 mm de espessura. À esquerda: furo a 50 mm do bordo. À direita: furo a 100 mm do bordo.	54
5.10	Diagramas força - deslocamento dos ensaios de rotura por tração em ligações aparafusadas em provetes com 16 mm de espessura. À esquerda: furo a 50 mm do bordo. À direita: furo a 100 mm do bordo.	54
5.11	Modos de rotura obtidos nos provetes de CBPB durante os ensaios de tração em ligações aparafusadas. À esquerda: furo a 50 mm do bordo. À direita: furo a 100 mm do bordo.	54
5.12	Modelo numérico elástico e linear do ensaio de ligações aparafusadas para furos a 50 <i>mm</i> de distância. À esquerda: tensões na direção vertical. À direita: tensões na direção horizontal. (Tensões em kN/m^2)	55
5.13	Modelo numérico elástico e linear do ensaio de ligações aparafusadas para furos a 100 mm de distância. À esquerda: tensões na direção vertical. À direita: tensões na direção horizontal. (Tensões em kN/m^2)	56
5.14	Diagrama de tensões principais. Modelo numérico do ensaio em provetes com furo a 50 mm do bordo. (Tensões em kN/m^2)	57
5.15	Diagrama de tensões principais. Modelo numérico do ensaio em provetes com furo a 100 mm do bordo. (Tensões em kN/m^2)	57
5.16	Painel de CBPB com 3 m \times 1,25 m \times 12 mm de dimensões e ligações aparafusadas	59
5.17	Esquema de dimensões na ligação aparafusada em painel de CBPB.	60

Índice de Quadros

2.1	Variação das propriedades da madeira (Hoffmeyer, 1995).	12
2.2	Dimensões dos elementos de madeira (adaptado de Marra,1992).	14
3.1	Classificação de compatibilidade entre o cimento e a madeira através do temperatura máxima de hidratação do cimento (adaptado de Sandermann e Kohler, 1964).	25
3.2	Classificação de compatibilidade entre o cimento e a madeira através do índice de inibição (adaptado de Hofstrand <i>et al.</i> , 1984).	26
3.3	Classificação de compatibilidade entre o cimento e a madeira através do fator de compatibilidade C_A (adaptado de Hachmi <i>et al.</i> , 1990).	27
3.4	Propriedades mecânicas de placas com partículas de <i>Carpinus betelus</i> coladas com cimento (adaptado de Papadopoulos, 2008.	29
3.5	Valores obtidos por diversos autores nos ensaios de flexão efetuados em materias compósitos de cimento e madeira (adaptado de Faria, 2010).	31
4.1	Dimensões dos Provetes E21 e E22	37
4.2	Dimensões dos Provetes E31 e E32.	39
4.3	Dimensões dos Provetes E4.	41
5.1	Cálculo do coeficiente de dilatação térmica.	46
5.2	Valores de coeficientes de dilatação térmica para diferentes materiais (Glass e Zelinka, 2010; NP EN 1992, 2010; Website: <i>Federal Highway Administration</i>)	47
5.3	Resultados da carga de rotura e tensão de rotura em tração dos provetes de CBPB ensaiados	49
5.4	Resultados da extensão na rotura do módulo de elasticidade em tração dos provetes de CBPB ensaiados	50
5.5	Análise das propriedades mecânicas dos provetes E31 e E32	52
5.6	Resultados de carga de rotura em tração dos provetes de CBPB ensaiados.	58

Simbologia

Simbolos

Letras maiúsculas latinas

A área

A_c área crítica

A_{nc} área definida pela curva de calor libertado no processo de hidratação do cimento

A_{wc} área definida pela curva de calor libertado no processo de hidratação do cimento-madeira

C_A factor de compatibilidade

E módulo de Elasticidade

F força

H teor em água da madeira

I índice de Inibição

K_t coeficiente de concentração de tensões

L_0 comprimento inicial

L_f comprimento final

M_w massa da madeira

P_u força de rotura em tração

S_2 declive máximo de hidratação do cimento-madeira

S'_2 declive máximo de hidratação do cimento

T_2 temperatura máxima de hidratação do cimento-madeira

T'_2 temperatura máxima de hidratação do cimento

T'_{max} temperatura máxima de hidratação do cimento

V_w volume da madeira

Simbologia

Letras minúsculas latinas

b largura dos provetes

d diâmetro

e espessura dos provetes

f tensão

\bar{f} tensão média

$f_{c,0}$ tensão de compressão na direção paralela ao fio

$f_{c,90}$ tensão de compressão na direção perpendicular ao fio

f_h tensão de esmagamento localizado

f_{max} tensão máxima

f_{ref} tensão de referência

$f_{t,0}$ tensão de tração na direção paralela ao fio

$f_{t,90}$ tensão de tração na direção perpendicular ao fio

f_u tensão de rotura

h altura dos provetes

h_f distância ao bordo

l maior distância entre ligações

m_1 massa da madeira húmida

m_2 massa da madeira seca

t_2 intervalo de tempo até à temperatura máxima de hidratação do cimento-madeira

t'_2 intervalo de tempo até à temperatura máxima de hidratação do cimento

t'_{max} intervalo de tempo até à temperatura máxima de hidratação do cimento

Letras minúsculas gregas

α coeficiente de dilatação térmica linear

δ deslocamento

Δf variação da tensão

$\Delta \epsilon$ variação da extensão

$\Delta \phi_d$ diferença entre o diâmetro do furo e o diâmetro nominal do furo

Δl variação do comprimento

Δt variação da temperatura

ϵ extensão

ϵ_u extensão de rotura

$\epsilon_{v,s}$ extensão de retração do CBPB

ϕ diâmetro

ϕ_{bolt} diâmetro nominal do parafuso

ϕ_{furo} diâmetro do furo

σ tensão

Abreviaturas e siglas

CBPB Cement-Bonded ParticleBoards

CEN Comité Europeu de Normalização

DEC Departamento de Engenharia Civil

EC5 Eurocódigo 5

EUA Estados Unidos da América

FCT/UNL Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

GL *Glulam*

OSB *Oriented Strandboard*

PW *Plywood*

UNL Universidade Nova de Lisboa

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento geral

A madeira é um dos materiais de construção mais antigo e com utilização mais variada no mundo. Ao longo da História, a madeira foi utilizada como matéria-prima para a produção das primeiras ferramentas, de habitações, mobília, veículos e outros objetos decorativos. A madeira está ligada à tradição e História de diversos países. Em Portugal, esta teve uma presença de enorme importância, uma vez que é um país costeiro, uma das formas utilizadas para impedir o avanço e a degradação das dunas do litoral norte foi a plantação dos pinhais de Leiria a mando do Rei D. Afonso III no século XIII. Estes pinhais iriam mais tarde fornecer a madeira necessária para a construção das embarcações utilizadas durante a época dos Descobrimentos e nas rotas comerciais marítimas portuguesas nos séculos XV e XVI, que potenciaram o crescimento do nosso país. Este material apenas deixou de ser utilizado na construção de embarcações no século XIX em detrimento do aço.

Na construção em Portugal, a madeira também teve um papel preponderante até ao aparecimento das estruturas em aço e betão armado que possibilitaram a construção de edifícios e pontes de maiores dimensões do que aquelas que se tinham na altura. No entanto, nas últimas décadas, devido à crescente preocupação ambiental, tem existido uma maior consciencialização para a introdução de novas técnicas de construção sustentável. Embora parte da construção sustentável se baseie na redução do consumo de energia por habitação, a escolha de um material de construção que exiba bons atributos ambientais é uma grande área de interesse.

A madeira tem diversas características ambientalmente positivas. A principal talvez seja o facto de ser um material extremamente abundante e sustentável. No entanto a madeira maciça apresenta certas limitações, evidenciadas com a evolução dos processos construtivos. A madeira maciça é obtida através do corte do tronco das árvores de grande porte que, durante o crescimento, podem apresentar diversos defeitos que reduzem os valores da sua resistência, tais como, nós internos, desvios do fio ou ataques biológicos. A madeira depois de extraída necessita ainda de um período de secagem, que se pode alongar até aos dois anos. Durante este processo podem ocorrer ligeiras deformações que reduzam ainda mais a resistência das peças. Além disso, após a

sua aplicação, a madeira pode sofrer também diversas patologias e defeitos devido às condições de temperatura e humidade a que for exposta (Martins e Viera, 2004).

De forma a melhorar as características da madeira surgiu em meados do século passado uma técnica que consiste no fabrico de elementos derivados da madeira. Estes derivados são formados através de fragmentos menores de madeira que são unidos posteriormente através de uma resina ou outro tipo de ligante. Atualmente existem diversos produtos derivados da madeira com diferentes características, secções e comprimentos que podem ser utilizados na construção. Estes produtos possuem uma elevada resistência mecânica na direção das fibras e homogeneidade em relação à madeira.

É possível identificar dois grandes grupos de derivados de madeira, os aglomerados e os contraplacados. Os contraplacados são formados através de colagens de finas lâminas de madeira, cruzando o seu veio na vertical e na horizontal, formando um painel. Os aglomerados são produzidos através da mistura de partículas de madeira com uma resina sintética, obtendo-se uma pasta que é prensada a altas temperaturas, formando um painel (Martins e Viera, 2004).

Dentro do grupo dos aglomerados podem-se encontrar os derivados de madeira e cimento, que diferem dos outros aglomerados pela adição de cimento no processo de fabrico ao invés de resina. A adição do cimento tem como função o acréscimo da resistência do material à compressão, sendo que a flexibilidade e a resistência à tração são dadas pelas partículas de madeira (Faria, 2013). Estes derivados apresentam uma alta resistência ao fogo e aos ataques biológicos possuindo também uma superfície lisa e durável.

1.2 Motivação

Os estudos efetuados sobre os derivados de madeira e cimento têm, na sua maioria, abordado apenas o processo de fabrico e as suas propriedades gerais tais como a compatibilidade entre o cimento e a madeira e os métodos para melhorar a compatibilidade entre os dois materiais. Embora estes estudos sejam necessários para criar uma base para desenvolvimento futuro deste tipo de material, não se focam nos problemas fundamentais que são necessários investigar para que estes derivados sejam utilizados em aplicações estruturais. Deste modo é necessário determinar as propriedades mecânicas destes derivados utilizando uma amostra e condições de carga suficientes para calcular valores seguros de dimensionamento.

1.3 Objetivos

O presente estudo integra-se num projeto de investigação que se encontra a decorrer no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DEC-FCT/UNL) sobre a possibilidade da utilização de painéis de aglomerados de madeira e cimento, ou CBPB (Cement Bonded Particle Boards), como elementos estruturais. Esta dissertação foi realizada em parceria com a VIROC, produtora e distribuidora em Portugal do CBPB, um dos derivados de madeira e ci-

mento mais utilizados no mercado. Este trabalho procura complementar o estudo já efetuado por Gonçalo Faria (Faria, 2013) sobre o comportamento de pilares construídos com CBPB. Este estudo foi desenvolvido com os seguintes objetivos:

- elaborar uma pesquisa bibliográfica sobre os aglomerados de madeira e cimento, examinando as suas principais características físicas e mecânicas, as normas aplicáveis, o seu processo de fabrico e os problemas que envolvem a compatibilidade entre os materiais cimento e madeira;
- efetuar ensaios de variação de temperatura e registar a variação do comprimento dos painéis de CBPB de forma a determinar o valor do coeficiente de dilatação térmica do material em estudo;
- efetuar ensaios de tração uniaxial até à rotura de forma a determinar a resistência à tração do material;
- analisar a distribuição de tensões que pode ocorrer no material, devido a descontinuidades existentes na secção, através de ensaios à tração;
- estudar a rotura por tração que ocorre nas zonas de ligações aparafusadas dos painéis de CBPB, analisando os modos de rotura e os fatores que influenciam a resistência, com o auxílio de um programa de cálculo automático.

1.4 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, incluindo o presente. De seguida apresenta-se uma descrição sumária de cada um dos seguintes capítulos:

No **Capítulo 2** é feita uma caracterização da madeira que é um dos elementos constituintes do CBPB. São apresentadas as diversas características deste material, tais como a sua estrutura interna, as suas propriedades mecânicas e físicas tal como as desvantagens inerentes ao seu uso em construção. Também são apresentados os diversos produtos derivados da madeira existentes no mercado. São descritos os processos de fabrico tal como os elementos que constituem estes derivados.

No **Capítulo 3** é realizado um enquadramento dos derivados de madeira e cimento, nos quais se inserem os CBPB. É descrito o processo de fabrico deste material e os problemas existentes com a compatibilidade entre o cimento e a madeira. São ainda apresentadas algumas soluções para melhorar a compatibilidade e são abordadas as características mecânicas do CBPB.

No **Capítulo 4** é descrito o programa experimental. São apresentados os métodos de ensaio e os tipos de provete utilizados neste estudo para alcançar os objetivos propostos anteriormente.

Capítulo 1. Introdução

O **Capítulo 5** consiste na apresentação e análise dos resultados experimentais obtidos nos ensaios descritos no capítulo anterior, nomeadamente os ensaios de determinação do coeficiente de dilatação térmica, os ensaios de tração uniaxial, os ensaios de tração em peças furadas e os ensaios de rotura por tração em ligações aparafusadas.

No **Capítulo 6** apresentam-se as conclusões deste estudo e ainda algumas recomendações de possíveis desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

A Madeira Como Material de Construção

2.1 Introdução

A madeira é um material orgânico composto por celulose, lenhina, hemicelulose e por uma pequena porção de materiais extrativos contidos na sua estrutura celular. Variações nas proporções deste material e na variação da estrutura celular tornam a madeira mais leve ou pesada, rígida ou flexível, suave ou dura.

Estas propriedades da madeira podem variar segundo os três eixos direcionais: longitudinal, radial e tangencial (Figura 2.1). As propriedades da madeira são relativamente semelhantes para árvores da mesma espécie e região, daí que seja adequada a descrição da madeira por tipo espécie de árvore.

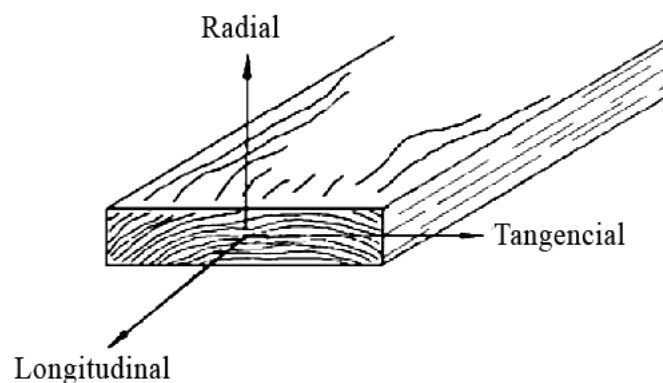


Figura 2.1: Eixos principais da madeira (adaptado de Kretschmann, 2010).

No entanto, de forma a podermos utilizar a madeira de forma eficiente em engenharia, é preciso conhecer e distinguir as propriedades e os componentes da madeira em detalhe.

2.2 A árvore

As árvores, das quais é extraída a madeira (também denominada por lenho), são constituídas, de um modo geral, por raiz, fuste e copa (Figura 2.2). Todos estes componentes têm funções distintas e específicas no ciclo de vida da árvore.

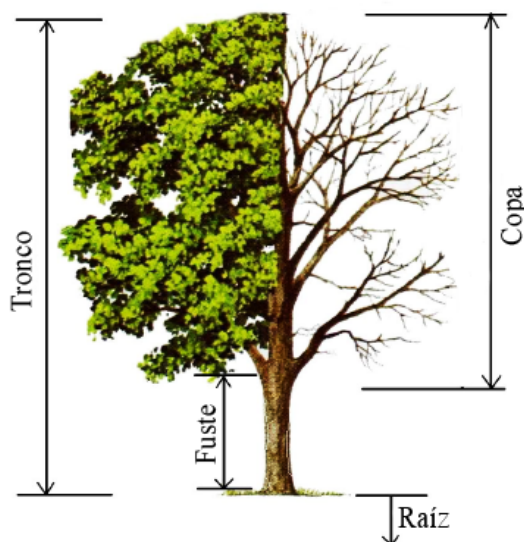


Figura 2.2: Estrutura de uma árvore (adaptado de Humphries e Sutton, 1996).

A raiz fixa a árvore ao solo e capta deste a água e os sais minerais necessários para a vida da árvore. O fuste é a parte da árvore que se encontra entre a raiz e os primeiros ramos. Tem a função de conferir estabilidade à árvore de forma a resistir às ações externas a que esta é submetida e, também, transportar a água e nutrientes da raiz à copa. A copa é formada pelos ramos e folhas da árvore e tem como função a realização da fotossíntese. O conjunto formado pelo material lenhoso da copa e o fuste forma o tronco da árvore, de onde se aproveita a madeira utilizada na construção.

De forma a podermos identificar com detalhe as diferentes características da madeira do tronco, é vantajoso definir em três níveis diferentes os tipos de divisão estrutural presentes na madeira, como podemos ver na Figura 2.3(Franco, 2008):

- Ultra-estrutura: É a estrutura elementar das paredes celulares presentes na madeira. Não é visível com um microscópio comum. Permite compreender os fenómenos de dilatação e retração da madeira.
- Microestrutura: É a estrutura lenhosa visível ao microscópio que permite entender os diferentes valores de rigidez na direção longitudinal e transversal da madeira.
- Macroestrutura: É a estrutura da madeira visível a olho nu ou com a ajuda de uma lupa. Permite entender a razão dos defeitos existentes na madeira reduzirem as resistências mecânicas desta.

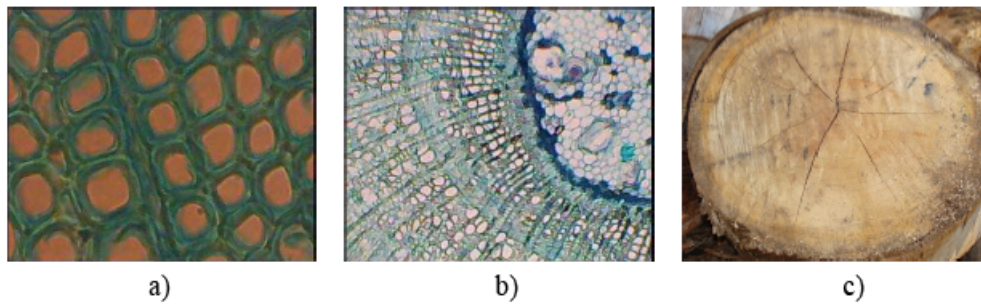


Figura 2.3: As três divisões estruturais: a) ultra-estrutura; b) microestrutura; c) macroestrutura (adaptado de Martins, 2009).

2.3 A macroestrutura

Como vimos anteriormente, as propriedades da madeira diferenciam-se consoante o plano direcional onde se encontram (plano longitudinal, radial e tangencial).

No plano transversal, perpendicular ao eixo axial da árvore, é possível observar os diferentes constituintes do tronco que, de forma geral, podem ser divididos, do centro para o exterior, em: medula, anéis de crescimento e casca (Figura 2.4).

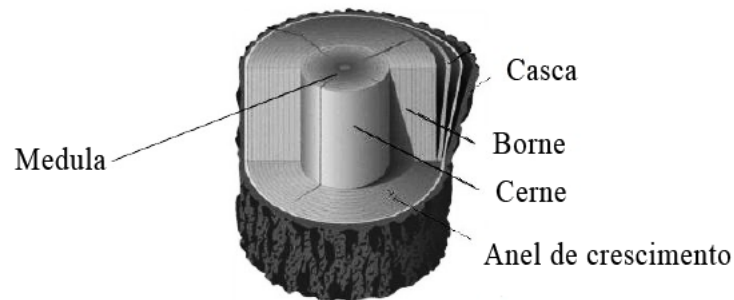


Figura 2.4: Constituição do tronco de uma árvore (adaptado de Franco, 2008).

A medula é a estrutura central do tronco. É composta por um tecido macio e esponjoso e é desprovida de resistência mecânica daí que a sua presença em elementos de madeira reduza bastante a sua resistência.

A casca é a camada externa do tronco que tem como função proteger o lenho no interior. É composta por duas camadas de espessura variável. A camada externa é constituída por tecido morto enquanto que a camada interna é formada por tecido vivo e tem a função de transportar os nutrientes (Franco 2008).

Os anéis de crescimento encontram-se entre a medula e a casca. Estes anéis traduzem o crescimento da árvore sendo possível, através da sua visualização, determinar

a idade e a região onde se desenvolveu. Este facto deve-se a que, em regiões frias e temperadas, as árvores possuem um ritmo diferente de crescimento ao longo do ano. No período entre a Primavera e o Verão a árvore forma uma camada de cor clara e fina e no período entre o Verão e o Outono forma uma camada escura e espessa. Este par de camadas formam um anel de crescimento que corresponde, deste modo, a um ano de vida da árvore. Nas regiões tropicais, onde o clima não se altera substancialmente ao longo do ano, as duas camadas são bastante semelhantes uma com a outra, tornando os anéis de crescimento mais largos e pouco diferenciados (Carvalho, 2007).

O conjunto dos anéis de crescimento formam o lenho. Este tem como funções a sustentação do elemento, a circulação da seiva e o armazenamento de nutrientes. O lenho pode ser dividido em duas zonas, a primeira é o cerne que se encontra junto à medula e apresenta uma cor escura. O cerne é um tecido denso formado por células mortas, o que lhe confere uma maior resistência mecânica. A camada que envolve o cerne é denominada por borne que é constituído por células vivas e a sua espessura mantém-se constante ao longo do tempo (Carvalho, 2007).

2.4 Propriedades da madeira

A madeira tem um número elevado de diferentes propriedades quando comparada com outros materiais de construção. Além disso, as suas propriedades físicas e, especialmente, as suas características mecânicas diferem consideravelmente consoante o plano direcional em estudo. Este facto deve-se à madeira ser um material heterogéneo, anisotrópico e adaptada ao clima ou região onde se desenvolveu.

Como este tema não se insere no âmbito do presente trabalho, em seguida apresentam-se apenas as propriedades físicas e mecânicas mais importantes da madeira.

2.4.1 Propriedades físicas

2.4.1.1 Teor em água

O teor em água da madeira, H , define-se pelo quociente, em percentagem, entre a massa de água evaporada pela madeira após secagem e a massa desta em seco. Este quociente pode ser expresso pela Equação (2.1).

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (2.1)$$

onde m_1 é a massa da madeira húmida e m_2 é a massa da madeira seca.

É possível alterar o teor de água de uma peça de madeira para valores desejados, sendo que, para a averiguação das propriedades da madeira, o seu teor de água deva ser aproximadamente 18% (Branco, 2003).

A madeira, sendo um material higroscópico, atrai e retém humidade do ambiente onde se insere. Esta troca de humidade entre a madeira e o ar depende da humidade relativa e da temperatura de ambos.

É importante ter em conta este equilíbrio de humidade entre o ar e a madeira pois influencia bastante as propriedades e o desempenho da madeira isto porque ao

absorver ou libertar água a madeira incha ou retrai, respetivamente. Estas variações dimensionais podem provocar o aparecimento de empenos e fendas na madeira (LNEC M9, 1997).

2.4.1.2 Massa Volúmica

A massa volúmica é uma das propriedades físicas mais importantes da madeira. Esta é calculada através da razão entre a sua massa (M_w) e o seu volume (V_w) para um dado teor em água, por norma 12%. A massa volúmica da madeira influencia fortemente as propriedades mecânicas desta, isto pois, quanto mais densa e pesada uma madeira for, mais fortes se tornam as suas propriedades mecânicas.

2.4.2 Propriedades mecânicas

Em engenharia, é importante ter conhecimento das propriedades mecânicas de um material para que seja possível relacionar as resistências e deformações com as tensões aplicadas. Dito isto, devido à anisotropia e à presença de defeitos, a madeira tem propriedades mecânicas únicas e independentes nas três direções principais dos seus eixos: longitudinal (paralelo às fibras), radial e tangencial. Embora existam diferenças nas propriedades entres os eixos tangencial e radial, estas diferem bastante quando comparadas com o eixo longitudinal, daí que se opte por definir apenas as propriedades da madeira segundo a direção paralela às fibras e na direção perpendicular a estas (Martins, 2009).

De seguida apresentam-se, resumidamente, algumas das propriedades mecânicas principais da madeira.

2.4.2.1 Tração

A madeira apresenta uma elevada resistência à tração na direção paralela às fibras. Em ensaios realizados em provetes de madeira, esta apresenta um comportamento linear de tensão-deformação enquanto carregada e uma rotura frágil. De notar que o comportamento mecânico da madeira é fortemente influenciado pela existência de defeitos (Carvalho, 2007). Os valores característicos da resistência à tração paralela às fibras variam entre os 8 e 42 MPa (EN 338, 1995).

Na direção perpendicular às fibras, a madeira apresenta valores muito menores de resistência, cerca de 30 a 70 vezes menores do que na direção paralela. Esta diferença deve-se ao facto de existirem menos fibras nesta direção (Branco, 2003).

2.4.2.2 Compressão

A madeira apresenta valores elevados de resistência à compressão na direção paralela às fibras, embora sejam menores quando comparadas com a tração. Os valores característicos para a madeira maciça classificada variam entre os 16 e 34 MPa (EN 338, 1995). Tal como visto na tração, a madeira apresenta um comportamento linear quando carregada embora a rotura por compressão seja dúctil. De notar que a existência de nós

na madeira não influencia significativamente a sua resistência à compressão (Branco, 2003).

A resistência à compressão na direção perpendicular às fibras é, tal como na tração, mais reduzida.

Na Figura 2.5 podemos relacionar as resistências à compressão e à tração da madeira.

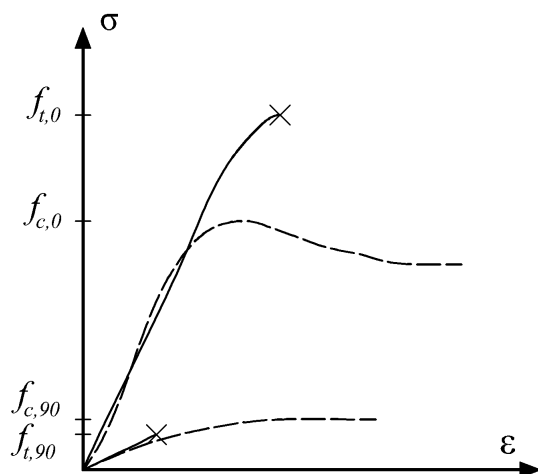


Figura 2.5: Curva de tensão-extensão ($\sigma - \epsilon$), em madeira isenta de defeitos, na direção das fibras e na direção perpendicular às fibras. A traço contínuo indicam-se as curvas em tração e a tracejado as curvas em compressão (adaptado de Carvalho, 2007).

2.4.2.3 Flexão

A resistência à flexão é uma propriedade fundamental num material estrutural, pois é a resistência ao esforço realizado quando o material é usado como um elemento viga. A madeira, mesmo tendo uma reduzida massa volumica, pode apresentar elevados valores de resistência à flexão.

2.5 Fatores que influenciam as propriedades mecânicas da madeira

As propriedades da madeira anteriormente descritas tiveram por base provetes isentos de defeitos. Embora seja importante o conhecimento destas propriedades num estado ótimo, elas não representam nem descrevem com precisão o comportamento da madeira maciça contendo nós, inclinações do fio entre outras características redutoras da resistência.

De seguida apresentam-se alguns dos principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas da madeira.

2.5. Fatores que influenciam as propriedades mecânicas da madeira

2.5.1 Massa específica e densidade

A substância que constitui a madeira é mais pesada que a água. A sua massa específica é aproximadamente 1,5 vezes maior que a água, independente da espécie de madeira. No entanto, diversos tipos de madeira, mesmo quando secas, flutuam em água, sendo assim evidente que parte do volume da madeira é ocupado por vazios criados por cavidades nas células da madeira. Uma redução no volume destes vazios cria espécies de árvores com mais madeira por unidade de volume, isto é, mais densas (Glass e Zelinka, 2010).

Como os valores da rigidez aumentam com a densidade, esta torna-se um bom indicador da resistência da madeira isenta de defeitos (Winandy, 1994). No entanto, os valores da densidade podem ser influenciados pela presença de bolsas de resinas e de conteúdos extrativos presentes na madeira que não contribuem para a resistência desta.

2.5.2 Nós

Um nó é uma parte de um ramo que se incorporou no tronco da árvore. Estes, em geral, reduzem as propriedades mecânicas de uma peça de madeira devido à interrupção da continuidade e desvio da direção da fibra que provocam.

A influência dos nós depende do seu tamanho, localização, forma, solidez, desvio provocado na direção da fibra e do tipo de tensões a que a madeira é submetida. Podem ter uma maior influência na resistência à tração do que na resistência à compressão de uma peça de madeira influenciando, deste modo, a resistência à flexão, porque um nó localizado numa zona inferior de uma viga de madeira (zona de tração) provoca uma maior redução no valor da carga limite desta, do que um nó localizado na parte superior (zona de compressão) (Glass e Zelinka, 2010).

2.5.3 Fio da Madeira

Em algumas aplicações de madeira estrutural, os esforços principais podem não ser sempre paralelos aos eixos de orientação da fibra. Isto pode-se dever à escolha do projetista, à forma como a madeira foi removida do tronco ou devido a irregularidades que ocorreram durante o crescimento da árvore (Kretschmann, 2010)

Como se viu anteriormente, as propriedades mecânicas da madeira são influenciadas pela orientação das fibras, daí que qualquer desvio possa provocar a inutilização de uma peça de madeira (Winandy, 1994).

2.5.4 Fluência

Uma peça de madeira, quando carregada inicialmente, irá deformar-se de forma elástica, voltando a recuperar a sua forma inicial após a remoção da carga. No entanto, se a carga for mantida por um longo período de tempo, provocará uma deformação não recuperável na madeira. Este efeito é denominado por fluência. Devido a este fenómeno, a madeira pode deformar-se substancialmente para cargas relativamente fracas

dependendo do tempo de aplicação destas. Com consequência desta deformação, o valor da carga que provoca a rotura na madeira torna-se mais reduzido.

2.5.5 Teor em água

O teor em água é um fator que influencia as propriedades mecânicas da madeira, isto porque, com o seu aumento, diminui a resistência e o módulo de elasticidade da madeira. Este efeito só é verificável para valores de teor em água inferiores ao ponto de saturação das fibras (Branco, 2003). Os valores das propriedades mecânicas da madeira aumentam com o decréscimo do teor em água relativamente ao ponto de saturação para valores entre os 15%-20%. Abaixo destes valores algumas espécies de madeira voltam a reduzir os seus valores de resistência (Winandy, 1994).

As mudanças no valor do teor em água têm efeitos diferentes nas várias propriedades mecânicas. No Quadro 2.1 apresentam-se as variações aproximadas das propriedades mecânicas da madeira livre de defeitos para uma variação de teor de água de 1%.

Quadro 2.1: Variação das propriedades da madeira (Hoffmeyer, 1995).

Propriedade	Variação (%)
Compressão paralela	5
Compressão perpendicular	5
Tração paralela	2,5
Tração perpendicular	2
Flexão	4
Corte	3
Módulo Elasticidade paralela	1,5

2.5.6 Ataques Biológicos

A madeira é propícia à deterioração provocada por fungos e insetos se inserida em climas húmidos e quentes. A deterioração da madeira não deve ser tolerada, pois a sua resistência é rapidamente reduzida mesmo nas fases iniciais de decomposição. Estima-se que uma perda de 5% do peso da madeira possa resultar em perdas de resistência de 50%. Se as condições ambientais favoráveis à deterioração não forem controladas, terá de se aplicar um tratamento químico à madeira para a proteger. De referir que as fases iniciais de deterioração são impossíveis de detetar (Kretschmann, 2010; Winandy, 1994).

2.6 Derivados de madeira

Como foi referido anteriormente, a madeira é um material com propriedades sub-ótimas para o uso em construção devido principalmente à sua anisotropia e heterogeneidade. Outra das desvantagens da madeira maciça é a necessidade de proceder ao corte de uma árvore de grande porte para se extrair peças com as dimensões necessárias para o

uso em construção. Embora a madeira seja uma matéria-prima renovável, o tempo de crescimento de uma árvore para corte é bastante longo, desta forma, com o aumento da procura deste material, o número de árvores de maior porte tem vindo a diminuir tornando esta matéria-prima mais dispendiosa.

De forma a ultrapassar estas dificuldades, surgiu uma técnica de conversão da madeira que consiste na redução de elementos deste material em fragmentos menores. Estes fragmentos são depois ligados entre si de forma a produzir um novo elemento de maior dimensão. Estes elementos são denominados derivados da madeira. Devido ao seu processo de fabrico, os derivados de madeira oferecem diversas vantagens em relação à madeira maciça, entre elas:

- Permitem que seja utilizado, no fabrico, a quase totalidade dos elementos da árvore, isto é, ramos, toros de pequena dimensão, elementos com defeitos localizados e madeiras de diferentes espécies;
- Por ser um material fabricado, é possível obter peças com secções e comprimentos definidos pelo projetista;
- Permitem reduzir significativamente a importância dos defeitos das peças de madeira e, desta forma, obter um produto mais homogêneo, com propriedades mecânicas controladas e relativamente mais resistente que a madeira que lhe dá origem.

2.6.1 Materiais constituintes

A madeira é o principal componente dos produtos derivados, podendo chegar a ter uma participação de 94% da massa total (Stark *et al*, 2010). Diversos tipos de elementos de madeira são utilizados no fabrico da variedade de produtos existentes. Alguns dos principais elementos de madeira são as lâminas (veneer), tiras (strands), flocos (flakes), lascas (chips), partículas (particles) e fibras (fibers) que são utilizados na produção de diferentes elementos, tais como, a madeira lamelada colada (Glulam - GL), as placas de contraplacado (Plywood - PW), os painéis de aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas (Oriented Strandboard - OSB), os painéis de partículas (Particle Boards) e os painéis de fibras (Fiber Boards). Marra (1992) identificou estes elementos de madeira vulgarmente utilizados e classificou-os segundo a sua dimensão. Na Figura 2.6 pode-se observar os diferentes tipos de elementos e a sua designação e no Quadro 2.2 estão representadas as dimensões de alguns elementos.

Segundo Marra (1992), de um modo geral, a resistência de um derivado de madeira diminui quando se reduzem as dimensões do elemento, assumindo que a densidade se mantém constante. No entanto, ao reduzir as dimensões, forma-se um produto mais homogêneo onde as propriedades da matéria-prima se tornam menos relevantes. Marra (1992), acrescenta que a resistência perdida ao reduzir as dimensões dos elementos pode ser recuperada aumentando a densidade do material e a quantidade de conteúdo ligante.

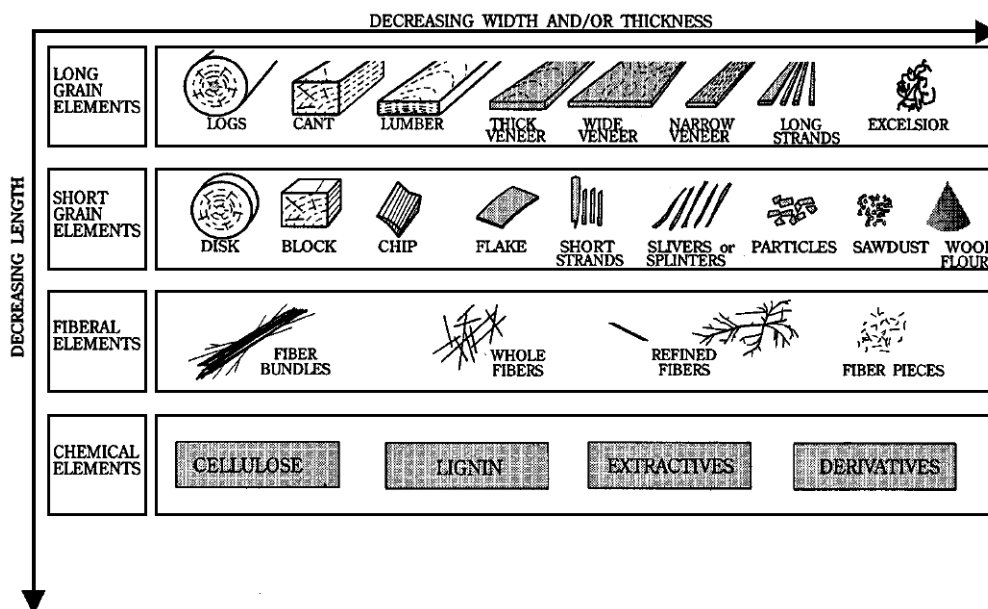


Figura 2.6: Classificação dos elementos de madeira (retirado de Marra, 1992).

Quadro 2.2: Dimensões dos elementos de madeira (adaptado de Marra, 1992).

Elemento	Comprimento	Largura	Espessura
Madeira Serrada	1 - 6 m	10 - 30 cm	12,5 - 50 mm
Lâmina	1 - 2 m	10 - 120 cm	0,5 - 12,5 mm
Wafers	25 - 75 mm	25 - 75 mm	0,6 - 1,25 mm
Flocos	12,5 - 75 mm	12,5 - 75 mm	0,25 - 0,6 mm
Tiras	12,5 - 75 mm	6 - 25 mm	0,25 - 0,6 mm
Farpas	6 - 75 mm	0,125 - 0,6 mm	0,125 - 0,6 mm
Partículas	1,25 - 12,5 mm	0,125 - 1,25 mm	0,125 - 1,25 mm
Feixe de fibras	1,25 - 25 mm	0,125 - 0,5 mm	0,125 - 0,5 mm
Fibras	1 - 6 mm	0,025 - 0,075 mm	0,025 - 0,075 mm
Celulose		Dimensões moleculares	

Os ligantes têm como principais funções unir todos os componentes dos derivados de madeira e transferir e distribuir tensões entre os mesmos, desta forma aumentam a resistência e a rigidez do material (Wood Handbook, 2010).

Existem diversos tipos de ligantes no mercado sendo os mais comuns as colas e as resinas que são constituídas por compostos químicos tais como formaldeídos, ureia, melanina, polímeros isocianatos, entre outros. A madeira pode também ser ligada com materiais inorgânicos como plásticos, gesso, cerâmicos e cimento Portland sendo este último o elemento em estudo nesta dissertação como poderemos ver no capítulo seguinte.

Para além de madeira e ligantes, os produtos derivados podem ainda conter aditivos. Estes componentes podem ter como objetivo garantir estabilidade dimensional, resistência ao fogo e aos agentes biológicos.

2.6.2 Principais derivados de madeira

Hoje em dia, existem no mercado, diversos tipos de derivados de madeira que podem ser divididos em diversos grupos dependendo do seu processo de fabrico e materiais constituintes. Deste modo, de seguida, apresentam-se os três grandes grupos de compósitos de madeira, os lamelados, os contraplacados e os aglomerados. No âmbito desta dissertação será estudado outro grupo de compósitos, os derivados de madeira e cimento que serão apresentados no próximo capítulo.

2.6.2.1 Madeira lamelada colada (GL)

A madeira lamelada colada, em inglês *Glulam*, é um dos derivados utilizado atualmente em aplicações estruturais em construção civil. Normalmente é constituído por, pelo menos, quatro lâminas de madeira ligadas por uma cola onde o sentido das fibras é paralelo à direção do elemento em construção. Um dos principais problemas das estrutura em madeira maciça é a dificuldade em obter peças com comprimentos superiores a 12 metros e secções superiores a 20 x 30 cm² (Negrão e Faria, 2009), a madeira lamelada permite ultrapassar este problema. As lâminas têm tipicamente 45 mm de espessura e nas extremidades podem ter ligações do tipo *fingerjoint* de modo a criar elementos de maior comprimento. O processo de fabrico deste tipo de derivado permite utilizar membros de madeira de qualidade inferior reduzindo significativamente a importância dos defeitos destas e, deste modo, produz-se um produto mais homogêneo e resistente do que a madeira que lhe dá origem (Rowell, 2005). Outra vantagem deste produto é permitir o fabrico de peças curvas e com secções variáveis.

2.6.2.2 Contraplacados (PW)

Os contraplacados, em inglês *plywood*, são formados por três lâminas finas de madeira (ou múltiplos de três) ligadas entre si por uma cola formando um painel. Os painéis, normalmente, não ultrapassam os 25 mm de espessura, no entanto é possível ligar diversos painéis por sobreposição (Figura 2.7). Cada lâmina é usualmente colocada

Capítulo 2. A Madeira Como Material de Construção

perpendicularmente à lâmina precedente de forma a aumentar a estabilidade dimensional do plano. As lâminas exteriores são designadas por folhas e a lâmina central por alma (Martins e Vieira, 2004).

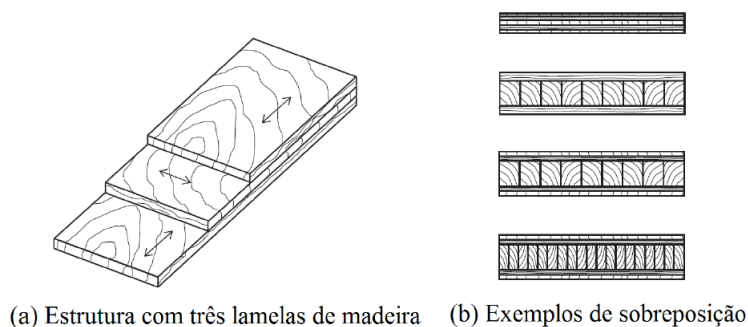


Figura 2.7: Esquema ilustrativo de um contraplacado (adaptado de Porteous e Kermani, 2007).

De forma a se poder aproveitar madeiras com defeitos localizados, e deste modo obter um maior aproveitamento dos toros de madeira, as lâminas podem ser formadas através de dois processos distintos. O primeiro consiste no desenrolamento da lâmina de madeira através de um corte tangencial ao toro que depois é descascada por rotação. O segundo consiste na serragem do toro segundo a direção paralela ou perpendicular do fio (Martins e Vieira, 2004). A Figura 2.8 permite visualizar estas formas de corte.

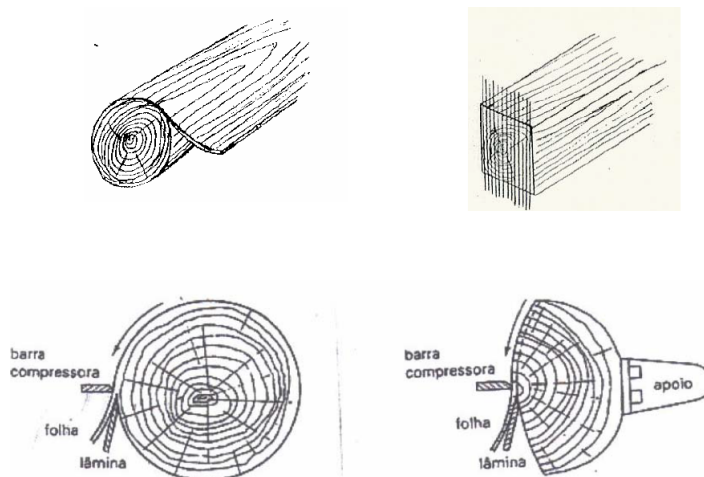


Figura 2.8: Esquema de corte da lâmina de um contraplacado, adaptado de Patton 1982.

Embora os contraplacados possam ser utilizados em aplicações estruturais tais como coberturas e paredes, são normalmente usados como elemento decorativo ou revestimento de interiores e exteriores. As suas dimensões podem variar de 900 mm a 1830 mm de largura e de 1220 mm e 3100 mm de comprimento, sendo no entanto a sua

dimensão mais frequente 1200 x 2440 mm² (Martins e Vieira, 2004). Algumas das suas aplicações podem ser visualizadas na Figura 2.9.



Figura 2.9: Diferentes aplicações de contraplacados.

2.6.2.3 Aglomerados de tiras longas e orientadas (OSB)

Os aglomerados de tiras longas e orientadas, do inglês Oriented Strandboard, é um painel fabricado a partir de tiras finas de madeira que são coladas com uma resina resistente à água e depois prensadas. Os painéis são normalmente produzidos por três ou mais camadas de tiras, as camadas exteriores estão geralmente alinhadas na direção do comprimento do painel enquanto que a camada interior pode estar alinhada perpendicularmente ou aleatoriamente (Stark *et al.*, 2010), como podemos ver na Figura 2.10. Este tipo de sobreposição de camadas confere aos painéis OSB excelentes valores de módulo de elasticidade e de resistência à flexão (Martins, 2004).

Hoje em dia existem vários tipos de painéis OSB embora as suas aplicações em construção sejam similares aos contraplacados, entre os seus usos destacam-se: coberturas, tapumes, cofragens, escadas, isolamentos acústicos e decorações de interiores. Algumas destas aplicações podem ser visualizadas na Figura 2.11.

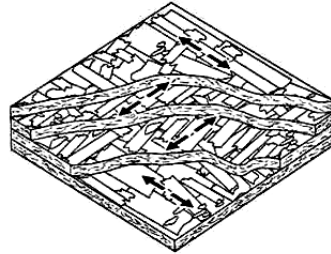


Figura 2.10: Esquema ilustrativo de um aglomerado de tiras longas e orientadas (adaptado de Pfeil e Pfeil 2003).



Figura 2.11: Diferentes aplicações de OSB's.

Capítulo 3

Os Derivados de Madeira e Cimento

3.1 Enquadramento geral

O cimento é um dos materiais ligantes mais versátil e utilizado em engenharia. A sua utilização mais comum é, provavelmente, na produção de betão, onde o cimento é combinado com agregados de pedra de forma a melhorar a sua resistência à compressão e a sua durabilidade. Para garantir uma maior resistência à tração e também prevenir o aparecimento de fendas, o betão pode ser reforçado com varões de aço. Outra forma de reforçar o cimento pode ser através da mistura com fibras de outro material. Com esta finalidade surgem os derivados de madeira e cimento, entre outros produtos.

Os derivados de madeira e cimento são placas fabricadas sobre pressão, contendo partículas de madeira misturadas e ligadas entre si com cimento hidráulico, podendo conter outros aditivos (EN 633, 1993), formando um produto sólido cuja resistência à compressão e durabilidade são dadas pelo cimento e a flexibilidade e resistência à tração dadas pelas partículas de madeira.

Embora os derivados de madeira e cimento existam desde o início do século passado, o maior interesse no seu uso na construção surgiu por volta da década de 1970 pois foram considerados substitutos eficazes dos painéis de fibras de amianto devido às preocupações que surgiram sobre os efeitos nocivos que estas fibras representam para a saúde pública. O uso dos derivados de madeira e cimento tem sido limitado a aplicações não estruturais, tais como: revestimentos, isolamentos acústicos e para efeitos estéticos. Atualmente têm sido desenvolvidos estudos para o uso destes materiais em aplicações estruturais (Wolfe e Gjinolli, 1996).

Os derivados de madeira e cimento contêm algumas das vantagens dos derivados de madeira mencionados anteriormente, sendo bastante resistentes ao fogo e aos ataques biológicos de fungos e insetos tendo, deste modo, uma elevada procura em países com climas húmidos e quentes onde o risco destes ataques é maior. Além disso, o cimento providencia uma superfície lisa e durável que, podendo ser facilmente pintada, dá a estes produtos um aspeto final agradável com um baixo custo de manutenção. No entanto, alguns conteúdos extrativos contidos em certas espécies de madeira são conhecidos por inibir ou retardar o processo de hidratação do cimento, formando compósitos com pouca resistência mecânica.

Existem, hoje em dia, no mercado, diferentes produtos de derivados de madeira e cimento. Estes produtos diferem entre si, principalmente, na densidade e na dimensão das partículas de madeira que contêm. Os produtos mais comuns existentes no mercado são: as placas de lã de madeira e cimento, as placas de fibra de madeira e cimento e, por fim, as placas de aglomerado de madeira e cimento.

3.2 Placa de aglomerado madeira-cimento (CBPB)

O aglomerado de madeira-cimento, em inglês cement-bonded particleboard (CBPB), é uma placa constituída por 20% a 25% de partículas de madeira ligadas por cimento, usualmente do tipo Portland (Machado, 1995). Este tipo de aglomerado difere dos derivados de madeira tradicionais por não necessitar da adição de resinas para garantir a sua coesão, sendo esta garantida pelo cimento sob a aplicação de pressão (Figura 3.1).



Figura 3.1: Placa de aglomerado madeira-cimento.

As placas de CBPB são produzidas usualmente por três camadas, onde as camadas exteriores são formadas por partículas finas de modo a obter uma superfície lisa e a camada central por partículas grossas. As partículas são orientadas aleatoriamente nas três camadas (Machado, 1995). As dimensões dos painéis são geralmente $2600 \times 3000 \text{ mm}^2$ e a espessura varia entre os 8 e 32 *mm* (VIROC). Os painéis possuem usualmente uma densidade entre os 1200 kg/m^3 e os 1350 kg/m^3 , esta característica pode ser uma desvantagem quando comparado a outros produtos derivados (Figura 3.2), tornando difícil o seu transporte no local. Os aglomerados de madeira-cimento possuem a vantagem de possuírem uma elevada resistência ao fogo e durabilidade aos agentes biológicos (Machado, 1995).

O CBPB é hoje produzido e distribuído em Portugal pela VIROC, sendo que a maior parte da produção destina-se à exportação para países como o Reino Unido, França, EUA, Moçambique e Angola. A VIROC produz painéis com diversos acabamentos

3.2. Placa de aglomerado madeira-cimento (CBPB)

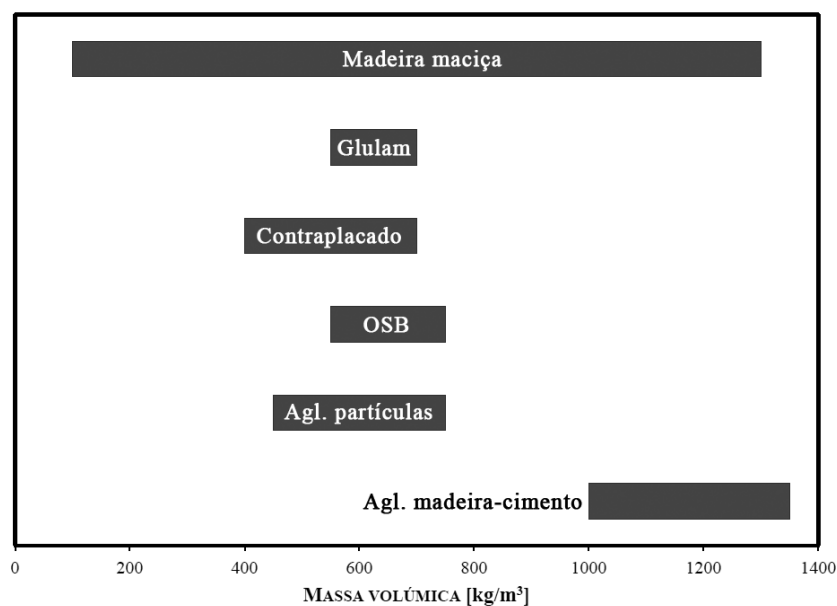


Figura 3.2: Gama de variação da massa volúmica entre placa (Machado, 2005)

dependendo da aplicação que se pretenda, podendo para aplicações exteriores ter um acabamento em bruto ou um acabamento lixado para interiores.

A VIROC também disponibiliza diversas soluções para acabamentos em pintura. Segundo Machado (1995) é aconselhável a aplicação de um primário caso seja necessário afixar outros elementos às placas, isto é devido ao elevado nível de alcalinidade apresentado por este material. O CBPB pode ser usado em diversas aplicações decorativas ou estruturais que podemos visualizar na Figura 3.3, entre elas: revestimento de fachadas, paredes, pavimentos, tetos, coberturas e como elemento de cofragem perdida.

3.2.1 Processo de Fabrico do CBPB

Como foi descrito anteriormente, os painéis de CBPB são formados por madeira, cimento, água e outros químicos. A madeira é reduzida a pequenas partículas que são depois ligadas entre si por cimento e prensadas.

O processo de fabrico do CBPB pode ser resumido a um processo de etapas como indicado na Figura 3.4.

O primeiro passo no processo de fabrico do CBPB é o descasque dos toros de madeira. Este processo é necessário pois, como poderemos ver mais à frente, a casca da madeira contém materiais extrativos que podem dificultar o processo de hidratação do cimento.

Após o processo de descasque, os toros de madeira são triturados através de uma descascadora mecânica de modo a formar as pequenas aparas que constituem os painéis de CBPB. Estas aparas são, depois de armazenadas, aparadas por duas afinadoras diferentes formando partículas de duas espessuras diferentes (finas e grossas). A espessura das aparas é controlada por um peneiro com uma malha de 4 mm. Após o processo



Figura 3.3: Diversas aplicações de painéis CBPB produzidas pela Viroc - a) coberturas; b) paredes; c) cofragem perdida; d) tectos; e) pavimentos; f) fachadas.

de aparação, as partículas de madeira são de novo armazenadas para o processo de mistura.

Segundo Faria (2010) a mistura dos vários elementos do CBPB é realizada pela seguinte ordem:

1. Pesagem das partículas finas e grossas;
2. Deposição das partículas na misturadora com um traço 1:3 finas:grossas;
3. Introdução de água;
4. Adição de sulfato de alumínio e silicato de sódio;
5. Introdução do cimento Portland do tipo II (CEM II / A- 42,5R).

Após o processo de mistura, o material formado é colocado em camadas sobre uma chapa de aço. Esta colocação é composta por três fases, de forma a colocar as misturas com partículas finas no exterior e a mistura com partículas grossas no interior. As placas de CBPB produzidas são depois sobrepostas, ficando separadas entre si pelas chapas de aço.

As placas de CBPB são depois prensadas em conjunto a uma pressão de 35 a 30 MPa até ao final de cura e endurecimento do cimento. Este processo é realizado em estufa, a cerca de 50°C, com uma humidade relativa controlada durante cerca de 10

3.2. Placa de aglomerado madeira-cimento (CBPB)

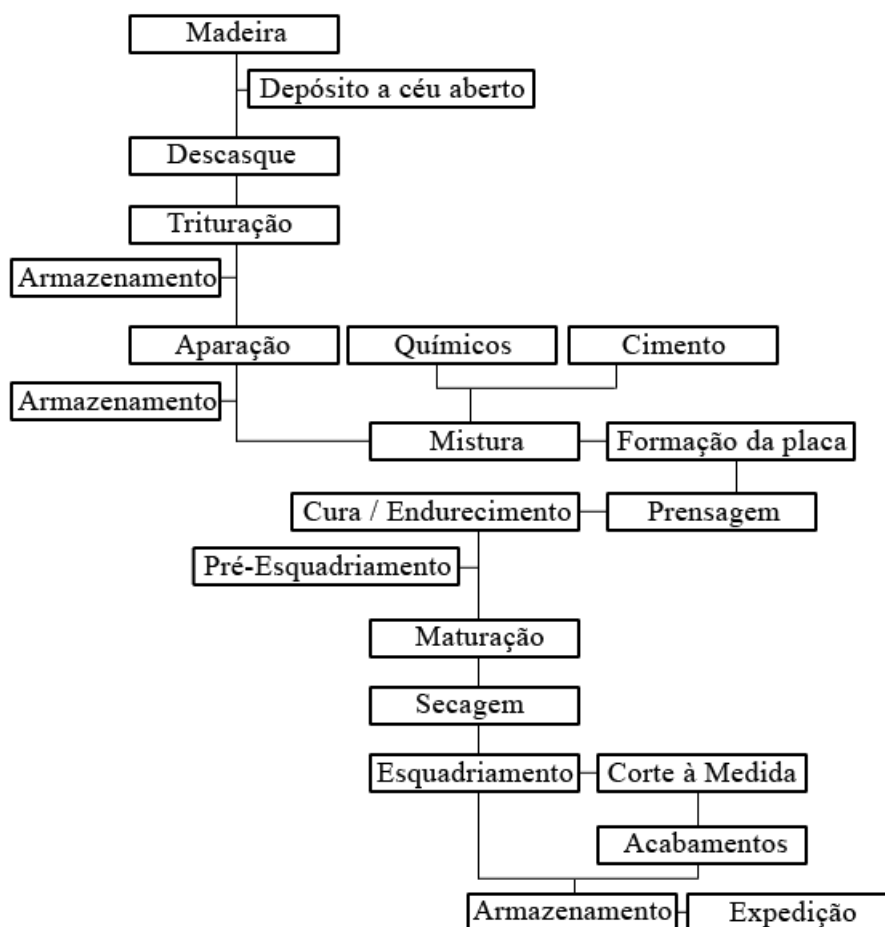


Figura 3.4: Fases do processo de produção do CBPB (retirado de Faria, 2010).

horas. O processo de maturação das placas é depois efetuado em armazém durante 7 dias a uma humidade relativa de cerca de 10%.

No final do processo, as placas passam por um processo de corte e controlo de qualidade. Consoante a aplicação, o painel pode ser cortado, lixado, pintado com primário ou trabalhado nas arestas para a produção de encaixes.

3.2.2 Normas aplicáveis aos aglomerados madeira-cimento

1. EN633 - *Cement-bonded particleboards - Definition and classification*

Esta norma apresenta a definição e classificação deste tipo de placa, baseando-se: no tipo de ligante utilizado (cimento Portland ou um ligante à base de magnésio); no acabamento das superfícies (superfície bruta, lixada ou revestida); na cor das superfícies (sem ou com coloração); consoante as faces e/ou bordos de encontram laborados.

2. EN634-1 - *Cement-bonded particleboards - Specifications - Part 1: General requirements*

Esta norma apresenta os requisitos gerais (tolerâncias dimensionais, geométricos e de teor em água) que as placas de CBPB devem obedecer.

3. EN634-2 - *Cement-bonded particleboards - Specifications - Part 2: Requirements for OPC bonded particleboards for use in dry, humid and exterior conditions*

Esta norma estipula as exigências mínimas que as placas deste tipo, para todos os tipos de utilização, devem obedecer e apresenta os valores a serem observados no controlo interno em fábrica. Esta norma também especifica dois tipos de aglomerados madeira-cimento de acordo com o valor do 5 percentil do módulo de elasticidade (classe 1 - 5º percentil $\geq 4500\text{N/mm}^2$; classe 2 - 5º percentil $\geq 4000\text{N/mm}^2$), obtido através de ensaios de provetes no controlo de qualidade. (Machado, 2005)

3.3 Compatibilidade madeira-cimento

O ligante mais utilizado nos compósitos de madeira é o cimento Portland. O cimento Portland, quando misturado com água, inicia um processo denominado por hidratação. A hidratação é um processo químico complexo no qual o cimento se torna numa massa sólida e agrega os materiais com que se encontra em contacto. De referir que este processo químico é exotérmico, ou seja, ocorre uma libertação de calor. O gráfico da Figura 3.5 ilustra o calor libertado pelo cimento durante o processo de hidratação.

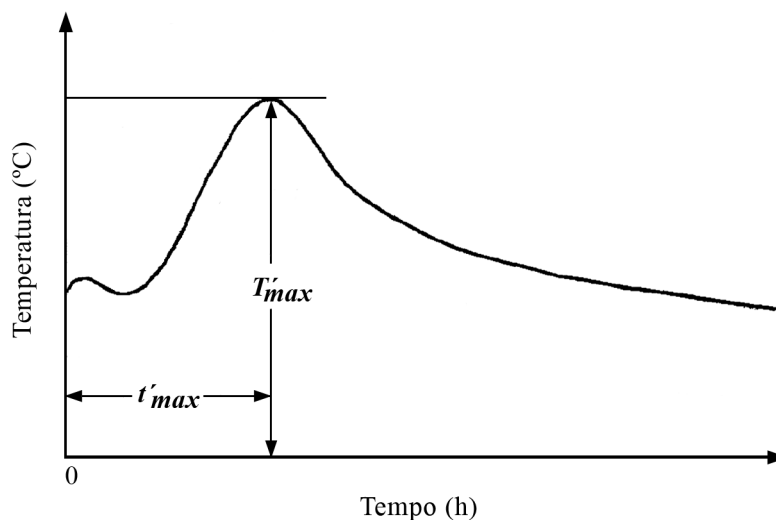


Figura 3.5: Curva de temperatura no processo de hidratação do cimento (adaptado de Wei *et al.*, 2000).

Uma das desvantagens existentes na utilização dos compósitos de madeira e cimento é a compatibilidade entre estes dois materiais. Foi provado que o contacto entre determinados conteúdos extrativos de certas espécies de madeira com o cimento pode inibir o processo de hidratação deste (Hachmi e Moslemi, 1989). A Figura 3.6 mostra os efeitos que estes conteúdos extrativos podem ter no processo de hidratação: redução

3.3. Compatibilidade madeira-cimento

da temperatura máxima de hidratação e intervalo de tempo para atingir esse máximo (Hachmi *et al.*, 1990).

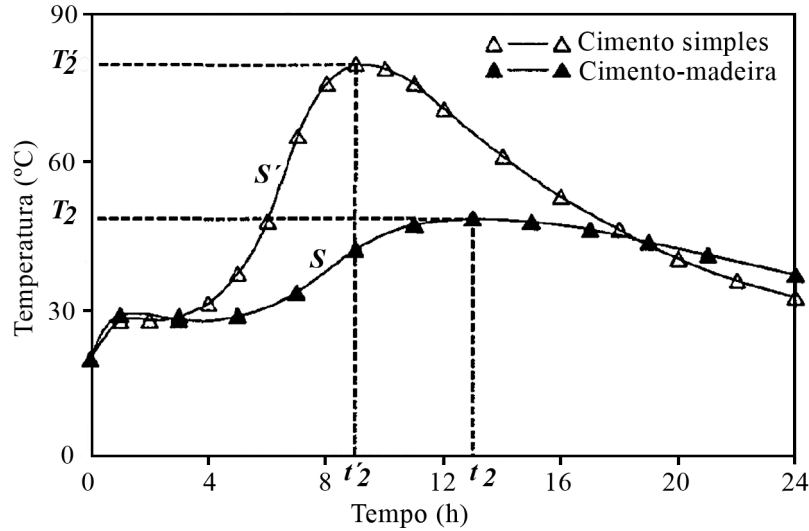


Figura 3.6: Curva de temperatura no processo de hidratação do cimento e do cimento com madeira (adaptado de Hachmi *et al.*, 1990).

Desta forma, podemos afirmar que, se o processo de hidratação do cimento não for perturbado, ou ligeiramente perturbado, pela presença da madeira, ambos os materiais são compatíveis. Caso contrário, são incompatíveis. De modo a avaliar a compatibilidade entre o cimento e a madeira de diversas espécies, vários autores propuseram métodos de classificação.

Em 1964, Sandermann e Kohler (1964) testaram 99 espécies diferentes de madeira e classificaram a sua compatibilidade com o cimento baseando-se na temperatura máxima de hidratação (T_2). A classificação era feita da forma ilustrada no Quadro 3.1

Quadro 3.1: Classificação de compatibilidade entre o cimento e a madeira através do temperatura máxima de hidratação do cimento (adaptado de Sandermann e Kohler, 1964).

Temperatura (°C)	Classificação
$T_2 < 50$	Não compatível
$50 < T_2 < 60$	Moderadamente compatível
$T_2 > 60$	Compatível

No mesmo ano, Weathermax e Tarkow (1964) propuseram a fórmula do índice de inibição, I , demonstrado na equação (3.1). Esta avaliação baseava-se na comparação entre os intervalos de tempo para que se atingisse a temperatura máxima de hidratação no cimento simples (t'_2) e no cimento com madeira (t_2).

$$I = \left(\frac{t_2 - t'_2}{t'_2} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Capítulo 3. Os Derivados de Madeira e Cimento

Quadro 3.2: Classificação de compatibilidade entre o cimento e a madeira através do índice de inibição (adaptado de Hofstrand *et al.*, 1984).

Índice de inibição (%)	Classificação
$I < 10$	Baixa inibição
$I = 10 - 50$	Moderada inibição
$I = 50 - 100$	Alta inibição
$I > 100$	Extrema inibição

Em 1984, Hofstrand *et al.* (1984) incorporaram na equação 3.1 a temperatura máxima e o declive das curvas registadas durante o processo de hidratação do cimento simples e do cimento com madeira, no cálculo do índice de inibição resultando a equação 3.2.

$$I = \left[\left(\frac{t_2 - t'_2}{t'_2} \right) \left(\frac{T'_2 - T_2}{T'_2} \right) \left(\frac{S' - S}{S'} \right) \right] \times 100 \quad (3.2)$$

onde T'_2 é a temperatura máxima de hidratação da mistura cimento-madeira, S é o declive máximo de hidratação da mistura de cimento e S' é o declive máximo de hidratação da mistura de cimento-madeira. O índice de inibição seria classificado como indica o Quadro 3.2, em que, quanto menor for o índice, maior será a compatibilidade entre a madeira e o cimento.

No entanto, em 1989, Hachimi e Moslemi (1989) demonstraram que estes métodos de avaliação poderiam conduzir a resultados pouco consistentes, isto é, as mesmas espécies de madeira poderiam ser consideradas compatíveis utilizando um dos métodos mas, ao mesmo tempo consideradas incompatíveis utilizando um método diferente. Esta discordância entre resultados poderia dever-se ao facto das condições de hidratação do cimento e do traço da mistura madeira:cimento não terem sido constantes entre os estudos.

Deste modo, Hachimi *et al.* (1990) propuseram um novo método para a avaliação da compatibilidade entre o cimento e a madeira baseado no fator C_A . Este fator é calculado através da razão entre a área definida pela curva de temperatura durante o processo de hidratação do cimento com madeira com a área de cimento simples, como podemos ver na Figura 3.7 e na equação (3.3).

$$C_A = \left(\frac{A_{wc}}{A_{nc}} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

onde A_{wc} é a área definida pela curva de calor libertado na hidratação do cimento-madeira e A_{nc} é a área definida pela curva de calor libertado na hidratação do cimento simples.

A compatibilidade entre a madeira e o cimento seria classificada como indica o Quadro 3.3.

No entanto, diversos autores (Semple *et al.*, 1999; Miller e Moslemi, 1991; Lee e Hong, 1986), constataram que o fator C_A pode não refletir a real compatibilidade entre a madeira e o cimento.

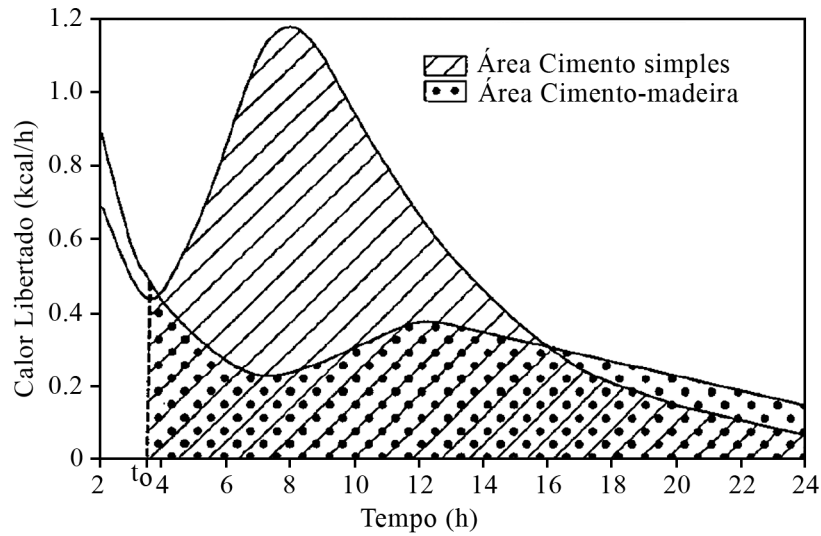


Figura 3.7: Representação da área da curva de hidratação de uma mistura de cimento simples e de uma mistura de cimento com madeira (adaptado de Hachmi *et al.*, 1990).

Quadro 3.3: Classificação de compatibilidade entre o cimento e a madeira através do fator de compatibilidade C_A (adaptado de Hachmi *et al.*, 1990).

Fator de compatibilidade C_A	Classificação
$C_A < 28 \%$	Não compatível
$28 \% < C_A < 68 \%$	Moderadamente compatível
$C_A > 68 \%$	Compatível

Deste modo, é possível verificar que ainda não existe consenso para a forma de avaliar a compatibilidade entre os dois materiais. No entanto, segundo Faria (2010), a qualificação da compatibilidade entre os componentes do compósitos de madeira e cimento depende da função que estes poderão desempenhar. Assim um painel avaliado como moderadamente compatível poderá não ser indicado como elemento estrutural, mas eficaz como elemento de revestimento.

3.3.1 Tratamento de compatibilidade com adjuvantes

De modo a obter compósitos de melhor qualidade é necessário adotar processo de forma a maximizar a compatibilidade entre o cimento e a madeira. Estas medidas podem ser aplicadas antes do processo de fabrico, como por exemplo, idade da árvore, época de corte e armazenamento da madeira, ou durante o fabrico, através do pré-tratamento das partículas de madeira, traço da mistura, tipo de cimento e escolha de adjuvantes.

3.3.1.1 Idade da árvore

Segundo Pugel *et al.* (1990), os aglomerados de madeira e cimento produzidos a partir de madeira proveniente de árvores jovens apresentam uma maior incompatibilidade

entre materiais. Este facto deve-se à presença de uma maior percentagem de borne do que de cerne nas árvores jovens sendo que o borne possui uma maior quantidade de extractivos.

3.3.1.2 Época de corte

Segundo Fischer *et al.* (1974), a concentração de extractivos, nomeadamente açúcares, presentes no tronco da árvore alteram-se significativamente ao longo do ano, sendo mais elevado durante os meses de primavera e menor nos meses de verão e inverno. Desta forma, de modo a poder melhorar a compatibilidade entre a madeira e o cimento é aconselhável utilizar madeiras cujo corte foi efectuado nos meses de verão e inverno.

3.3.1.3 Armazenamento

As condições de armazenamento da madeira podem alterar as concentrações de açúcares presentes no material. Como foi provado por Schwarz e Simatupang (1984), para madeira *Fagus Silvatica* a concentração de açúcar passou de 0,2% para 0,1%, sendo o primeiro valor referente a um armazenamento desprotegido e o segundo a um ambiente seco e protegido. Segundo Lee *et al.* (1987) esta variação deve-se a acções enzimáticas, transformando os açúcares em produtos não inibitórios. No entanto, embora o armazenamento possa apresentar melhorias nas concentrações de açúcares, este processo não reduziu a concentração de taninos (Simatupang, 1986; Valenzuela, 1989).

3.3.1.4 Tipo de cimento e adjuvantes

Segundo Beraldo (1997), para o fabrico de aglomerados de madeira e cimento é recomendada a utilização de cimento Portland de alta resistência do tipo V (CP-V-ARI). É igualmente recomendada a utilização de adjuvantes ou aceleradores de presa tais como o cloreto de cálcio ($CaCl_2$). Os aceleradores de presa têm a capacidade de fornecer ao cimento temperaturas mais elevadas no processo de hidratação garantindo mais rapidamente uma maior resistência inicial e anulando desta forma os efeitos provocados pelos extractivos presentes na madeira.

3.3.1.5 Lavagem das partículas de madeira

A lavagem tem como função a remoção de alguns açúcares presentes na madeira. Este processo pode ser realizado com água quente ou fria, a diferentes níveis de pH e com a adição de químicos. Segundo Beraldo e Carvalho (2004) este processo é mais eficaz quando utilizado em espécies de madeira com comportamento de extrema inibição.

3.4 Propriedades mecânicas do CBPB

Sendo o CBPB um material compósito, a sua resistência mecânica não depende apenas da resistência dos materiais que o constitui mas também da razão entre os volumes

3.4. Propriedades mecânicas do CBPB

desses materiais, isto é, do traço de mistura. O traço de mistura ideal para os aglomerados será aquele que contém a máxima quantidade de madeira devido ao menor impacto ambiental. No entanto, como vimos anteriormente, mais quantidade de madeira significa maior quantidade de produtos extrativos o que pode prejudicar compatibilidade entre a madeira e o cimento, além disso, se o material ligante for escasso, este poderá não conseguir unir todas as partículas de madeira, formando um compósito menos resistente.

Segundo Papadopoulos (2008) quanto maior for a percentagem de partículas de madeira, melhor a distribuição de tensões do aglomerado e sendo o cimento um material com módulo de elasticidade superior ao da madeira, a rigidez do aglomerado aumenta se a percentagem de cimento também aumentar, como podemos verificar no Quadro 3.4.

Quadro 3.4: Propriedades mecânicas de placas com partículas de *Carpinus betulus* coladas com cimento (adaptado de Papadopoulos, 2008).

Madeira : Cimento	Densidade [kg/m^3]	Tensão de rotura à flexão [N/mm^2]	Módulo de Elasticidade [N/mm^2]
1:3	1270	12,68	6009,6
1:4	1280	10,56	7056,4

Coutts e Campbell (1980) estudaram a resistência à flexão de diversos aglomerados de madeira e cimento, alterando a percentagem de fibras de madeira, obtendo uma resistência máxima para 8% de fibras por massa (Figura 3.8). Os autores ainda referem que a queda dos valores de resistência após os 8% se deve ao facto das fibras de madeira se unirem entre si de forma menos eficiente, formando bolas de pasta de madeira.

3.4.1 Resistência à compressão

Faria (2013) avaliou o comportamento à compressão de diversos provetes de CBPB, fornecidos pela VIROC, com um traço de 1:3 de madeira:cimento. Com base em 111 ensaios realizados constatou que o CBPB apresenta um comportamento distinto consoante a superfície solicitada. Nos ensaios em provetes com $32 \times 32 \times 32mm^3$ de dimensão, o material, quando carregado na face perpendicular ao plano da placa, apresentou um comportamento dúctil e uma resistência e módulo de elasticidade médios de 41,7 MPa e 0,28 GPa, respetivamente. Quando carregado na outra face, obteve uma resistência e um módulo de elasticidade médios de 22,4 MPa e 1,99 GPa, respetivamente, como podemos observar na Figura 3.9.

Em provetes com $100 \times 64 \times 32mm^3$ de dimensão, Faria (2013), obteve uma resistência e módulo de elasticidade médios de 24 MPa e 5,22 GPa, respetivamente, quando solicitando o material na face paralela ao plano do painel (Figura 3.10).

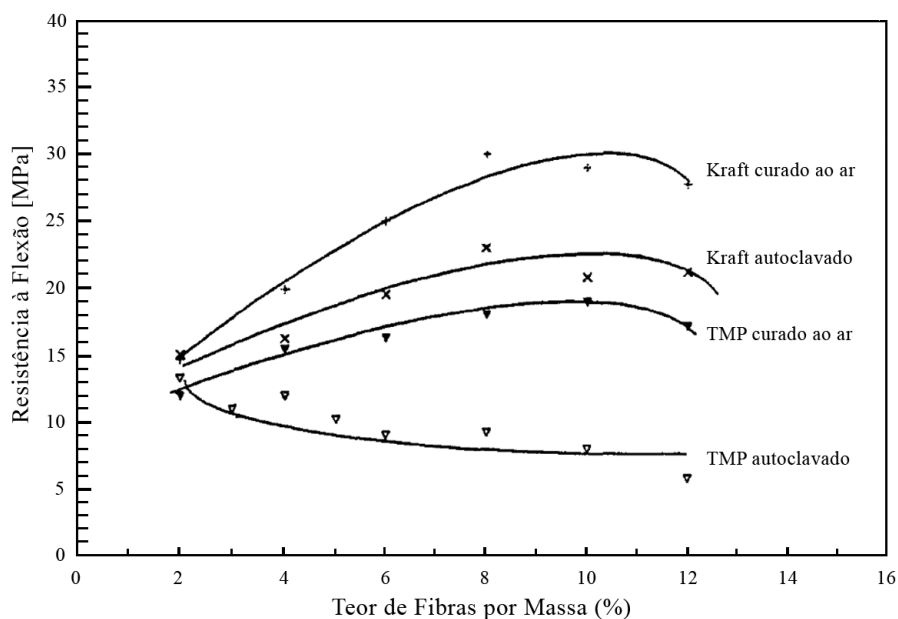


Figura 3.8: Influência do teor de fibras por massa para diferentes aglomerados de madeira e cimento na resistência à flexão (retirado de Coutts e Campbell , 1980).

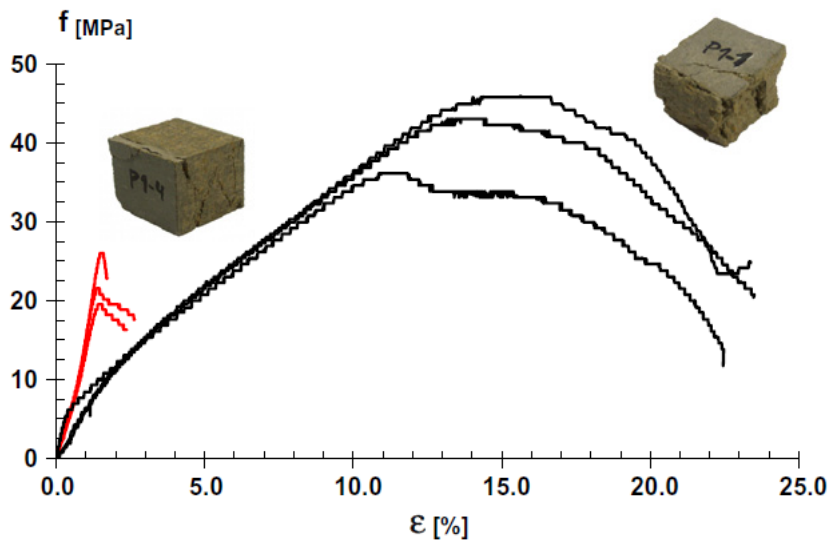


Figura 3.9: Diagrama tensão - extensão dos provetes de CBPB ensaiados à compressão em ambas as faces (retirado de Faria, 2013).

3.4. Propriedades mecânicas do CBPB

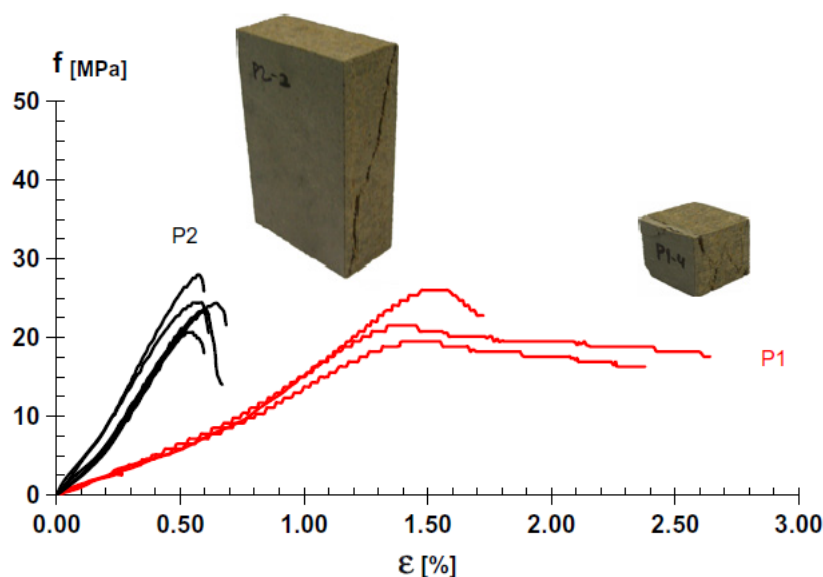


Figura 3.10: Diagrama tensão - extensão de dois provetes diferentes de CBPB ensaiados à compressão (retirado de Faria, 2013)

3.4.2 Resistência à flexão

No Quadro 3.5 são apresentadas as resistências e os módulos de elasticidade à flexão obtidos por diversos autores em ensaios realizados a derivados de madeira e cimento.

Quadro 3.5: Valores obtidos por diversos autores nos ensaios de flexão efetuados em materias compósitos de cimento e madeira (adaptado de Faria, 2010).

Autor	Espécie de madeira	Madeira : Cimento	Tensão de rotura à tração [N/mm^2]	Módulo de elasticidade [N/mm^2]
Papadopoulos (2008)	<i>Carpinus betulus</i>	1:3	13	6010
		1:4	11	7056
Wolfe e Gelmer (1996)	<i>Southern pine</i>	1:2 a 1:2,5	2 a 4	-
Lee (2005)	<i>Taxodium distichum</i>	-	3	924
Dinwoodie e Paxton (1991)	-	-	10 a 13	-

Segundo Wolfe e Gjinolli (1996), os derivados de madeira e cimento apresentam um comportamento tensão-extensão como o observado na Figura 3.11. A parte inicial do diagrama apresenta um comportamento linear, semelhante ao do cimento, até atingir uma resistência máxima. Quando o cimento cede, o diagrama torna-se não linear, sendo que, a partir deste ponto, são as partículas de madeira que contêm a fissuração, permitindo que o material compósito resista a maiores esforços.

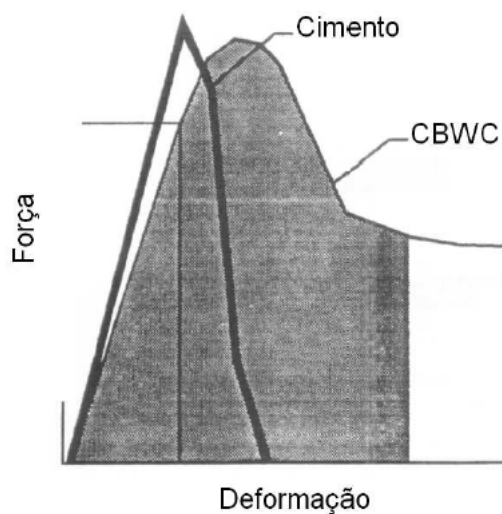


Figura 3.11: Diagrama força-extensão de materiais compósitos de madeira-cimento e de "cimento simples" à flexão. Adaptado de Wolfe e Gjinolli (1997).

Segundo Coutts e Campbell (1980) e Soroushian e Marikunte (1992) os derivados de madeira e cimento resistem entre os 7 e 30 MPa à tração por flexão (Figura 3.8), dependendo do traço de mistura e tipo de fibra de madeira. Referem ainda que a humidade tende a diminuir a resistência destes compósitos, tornando as partículas de madeira mais flexíveis e incapazes de evitar a fissuração do cimento.

Capítulo 4

Descrição Dos Ensaios

4.1 Introdução

Nos ensaios realizados foram utilizados compósitos de partículas de madeira e cimento ou CBPB. O material foi fornecido em Janeiro de 2011 pela VIROC, empresa que o comercializa em Portugal.

A constituição do material, segundo a VIROC, é feita por partículas de madeira (20,7%), cimento Portland (66,7%), água (10,7%) e químicos (1,9%), (Figura 4.1).

Os provetes são constituídos por dois tipos diferentes de partículas de madeira: as partículas finas e grossas. As partículas finas encontram-se na face exterior do provete e as grossas no interior. O tipo de madeira utilizada é o *Pinus Pinastas* ou o *Pinus Pinea* e o cimento Portland é do tipo II (CEM II / A-L42,5). Os químicos usados para acelerar a presa e desfibrar as partículas de madeira são o silicato de sódio (Na_2SiO_3) e o sulfato de alumínio ($Al_2(SO)_3$), respetivamente.

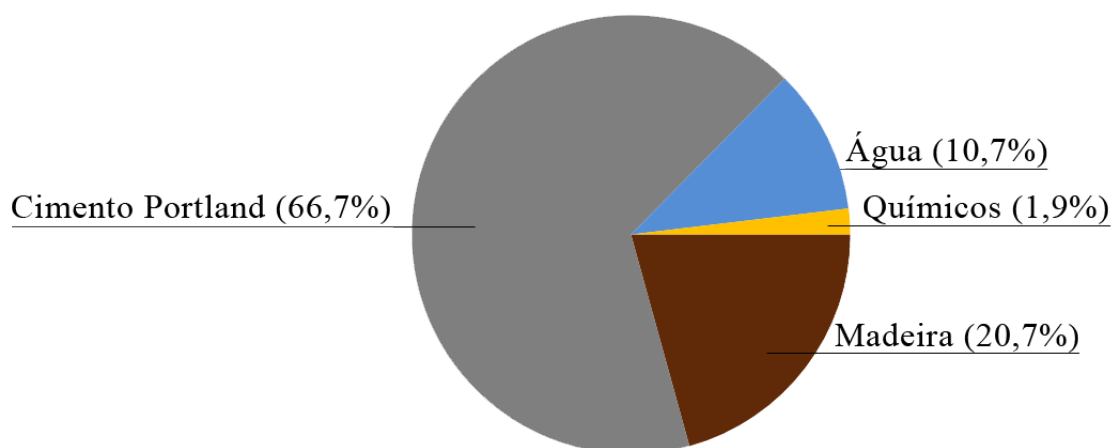


Figura 4.1: Composição dos provetes (percentagem dos constituintes em peso) (adaptado de Faria, 2010).

Foram realizados ensaios de provetes para a determinação do coeficiente de dilatação térmica, bem como diversos ensaios de tração. Dos ensaios de tração realizados,

Capítulo 4. Descrição Dos Ensaios

verificou-se a resistência à tração uniaxial, a resistência à tração em peças furadas e a resistência de ligações aparafusadas à tração. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Para os ensaios de determinação do coeficiente de dilatação térmica foi utilizada uma câmara climática da marca *Fitoclíma 300* (Figura 4.2-a)). Os ensaios de tração foram realizados com recurso à máquina de tração universal da marca *Zwick*, modelo Z050 com capacidade de carga até 50 kN (Figura 4.2-b)).



Figura 4.2: Equipamento utilizado para a realização dos ensaios: a) câmara climática (*Fitoclíma 300*); b) máquina de tração universal (*Zwick Z050*).

4.2 Ensaio de determinação do coeficiente de dilatação térmica

O coeficiente de dilatação térmica (α) é definido como a constante que indica a variação de comprimento de um material (ΔL) provocada pela variação da temperatura (ΔT) em condições de pressão constante. O coeficiente de dilatação térmica pode ser calculado de acordo com a expressão 4.1.

$$\Delta L = \alpha \Delta T \cdot L_f \Leftrightarrow \alpha = \frac{\Delta L}{\Delta T \cdot L_f} \Leftrightarrow \alpha = \frac{L_f - L_0}{\Delta T \cdot L_f} \quad (4.1)$$

Onde L_0 e L_f são, respectivamente, o comprimento inicial e o comprimento final medido em mm.

Para a determinação do coeficiente de dilatação térmica do CBPB foram ensaiados dez provetes. Os provetes, designados por E11 têm todos uma forma quadrada ($400 \times 400 \times 10 \text{ mm}^3$), ver Figura 4.3.

4.2. Ensaio de determinação do coeficiente de dilatação térmica



Figura 4.3: Provete E11.

De forma a medir os deslocamentos foram colados seis discos metálicas em cada provete, posicionadas segundo a disposição da Figura 4.4 e utilizado um equipamento *Demec* de 200 mm de comprimento. O equipamento de medição utilizado é um dispositivo mecânico que permite medir a distância entre dois discos metálicos. Desta forma, foi possível medir seis deslocamentos em três direções diferentes: horizontal (A e B), vertical (C e D) e diagonal (E e F).

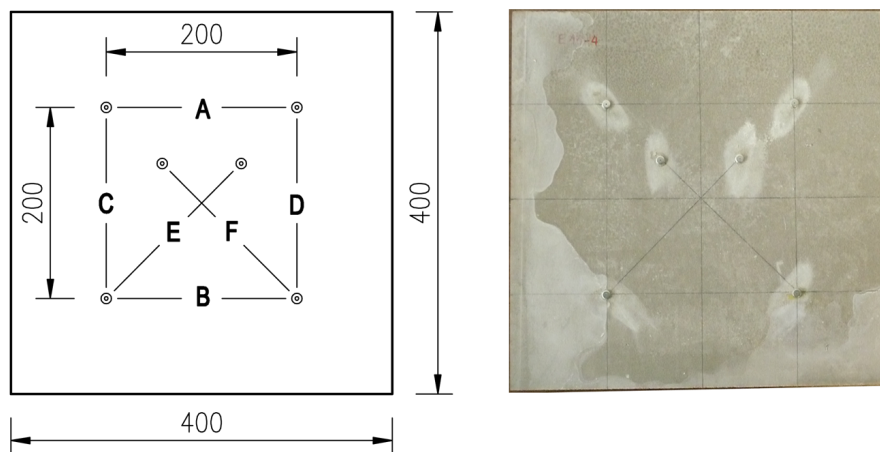


Figura 4.4: Disposição das chapas metálicas.

O procedimento experimental realizado pode ser descrito pelas seguintes etapas:

1. Colagem das chapas metálicas utilizando uma barra de invar de 200 mm;
2. Colocação dos provetes na câmara climática em repouso a uma temperatura de 20°C e 50% de humidade relativa. Os provetes permaneceram na câmara climática até se ter dado a estabilização da temperatura e humidade;

3. Medição do comprimento inicial (L_0) em todas as direções;
4. Medição do comprimento final (L_f) em todas as direções para uma variação de temperatura de -20°C , -10°C , $+10^\circ\text{C}$ e $+20^\circ\text{C}$.

4.3 Ensaios de resistência à tração

Segundo a norma EN 789 (2004), os provetes para ensaios à tração devem ser retangulares na secção transversal com uma espessura igual à espessura da placa e uma largura total de 250 ± 5 mm. O comprimento do provete deve depender do equipamento usado para a aplicação das cargas. A largura do provete deverá ser reduzida para 150 ± 5 mm num comprimento de 250 ± 5 mm. Esta redução deve ser obtida por meio de um raio de 650 ± 5 mm, ver Figura 4.5.

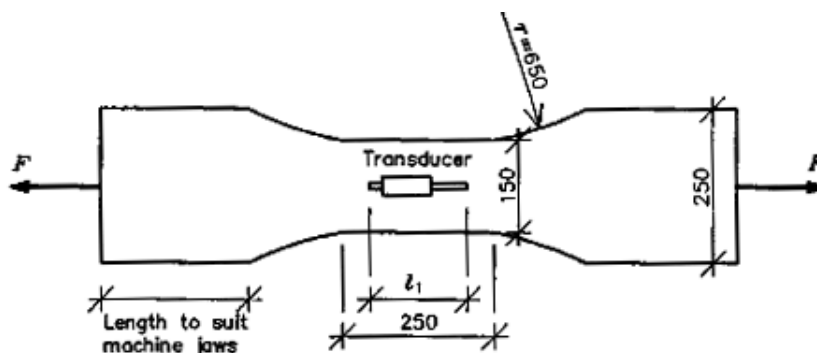


Figura 4.5: Modelo de Provette segundo a EN 781 (2004) para ensaios à tração.

Esta forma de provete não pôde ser utilizada para esta dissertação pois a sua largura é demasiado excessiva para ser testada na *ZwickZ050*. Foi também testada, no início desta dissertação, uma forma semelhante mas com mais dimensões reduzidas embora, nos ensaios efetuados, a rotura por tração não se tenha dado pela zona central do provete, resultando em valores de estudo inválidos. De forma a ultrapassar esta dificuldade, utilizaram-se, nos ensaios de tração, provetes de forma retangular. A especificação dos tipos de provetes utilizados será abordada nas secções seguintes.

Outra dificuldade que surgiu no início dos ensaios, foi o facto de ocorrer o esmagamento dos provetes testados esmagavam na zona de encaixe com as garras devido à força de aperto efetuada, tornando impossível a análise de resultados. Para resolver esta situação tornou-se necessário utilizar garras que maximizassem a zona de contacto com os provetes reduzindo desta forma a tensão. Deste modo conceberam-se novas garras que se adaptaram ao equipamento da *Zwick*, e que possuem uma maior área de contacto que as garras comerciais existentes. As garras foram fabricadas em aço e são constituídas por duas peças separadas tal como se pode verificar na Figura 4.6. Estas duas peças podem ser unidas utilizando 8 parafusos sendo possível, desta forma, controlar a força de aperto usando uma chave dinamométrica.

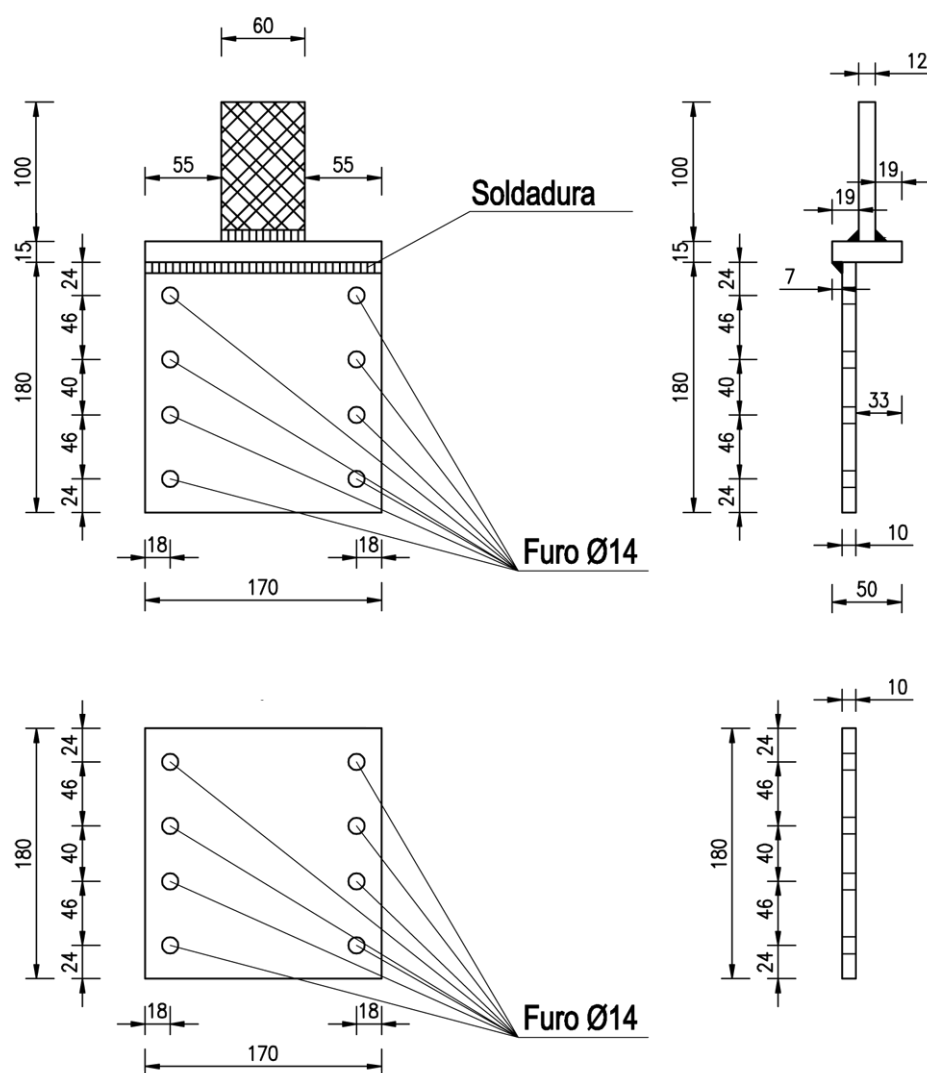


Figura 4.6: Esquema das garras utilizadas nos ensaios (medidas em mm).

4.3.1 Ensaio de tração uniaxial

Os ensaios de tração uniaxial tiveram como objetivo avaliar as características mecânicas do material de CBPB, quando solicitado a uma força de tração uniaxial. Nestes ensaios foram testados dois tipos de provetes, os E21 e E22, cujas dimensões são apresentadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1: Dimensões dos Provetes E21 e E22

Provete	Quantidade de provetes	Altura h [mm]	Largura b [mm]	Espessura e [mm]
E21	10	400	100	12
E22	10	400	100	16

Ambos os provetes têm uma forma retangular, apenas variando a espessura destes

Capítulo 4. Descrição Dos Ensaio

($400 \times 100 \times 12 - 16 \text{ mm}^3$), ver Figura 4.7. Os compósitos CBPB são constituídos por partículas de madeira orientadas segundo o plano do painel, sendo que com estes ensaios pretende-se registar o comportamento do material nesta direção.



Figura 4.7: Provete do tipo E2

Nestes ensaios foram avaliadas a tensão de rotura à tração (f_u), o módulo de elasticidade (E) e a extensão na rotura à tração (ϵ_u) utilizando, respetivamente, as seguintes expressões:

$$f_u = \frac{P_u}{b \times e} \quad (4.2)$$

$$E = \frac{\Delta f}{\Delta \epsilon} \quad (4.3)$$

$$\epsilon_u = \frac{\Delta h_e}{h_e} \quad (4.4)$$

Onde P_u é a força de rotura em tração, Δf é a variação da tensão, $\Delta \epsilon$ é a variação da extensão, Δh_e é a variação da distância entre os pontos de leitura do extensómetro e h_e é a distância entre os pontos de leitura do extensómetro. De notar que as variações da tensão e da extensão foram calculadas para 15% e 50% da tensão de rotura.

Os provetes foram fixados às garras sendo deixada uma folga de 80 mm entre estas como se pode verificar na Figura 4.8. A força de aperto utilizada foi de 10 Nm em cada parafuso. As garras foram depois acopladas ao mecanismo da *Zwick* por um sistema de aperto manual. Para a medição dos deslocamentos foi colocado um extensómetro mecânico com 45 mm de comprimento no espaço de folga entre as garras. Os ensaios foram efectuados com um controlo de deslocamentos de 1 mm/min.

Pode-se verificar que, devido ao formato das garras utilizadas, os provetes com 12 mm de espessura ficaram afastados 2 mm do eixo da aplicação da carga. O possível efeito deste afastamento nos resultados obtidos será analisado no próximo capítulo.

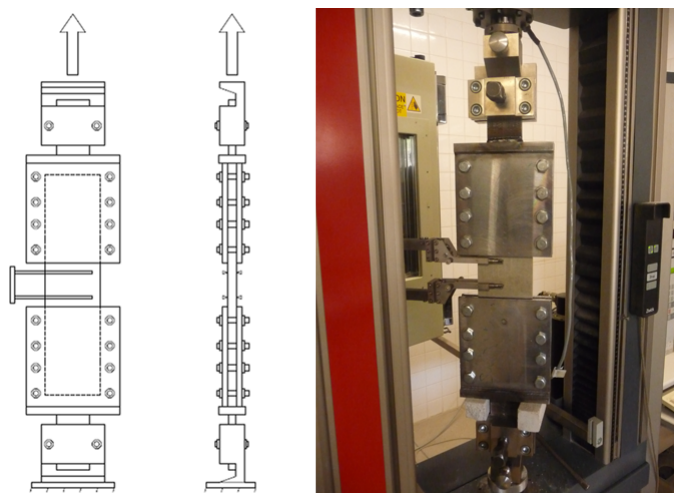


Figura 4.8: Pormenor dos ensaios aos provetes E21 e E22.

4.3.2 Ensaio de tração uniaxial em peças furadas

Os ensaios de tração uniaxial em peças furadas tiveram como objetivo analisar a distribuição de tensões que pode ocorrer localmente, devido às descontinuidades da secção do provete. Nestes ensaios foram testados dois tipos de provetes, os E31 e E32, cuja forma e dimensão podem ser observadas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2: Dimensões dos Provetes E31 e E32.

Provete	Quantidade de provetes	Altura h [mm]	Largura b [mm]	Espessura e [mm]
E31	5	400	100	12
E32	5	400	100	16

Pode-se verificar que as dimensões destes provetes não diferem daqueles usados na secção anterior, apenas possuem um furo no centro da peça com um diâmetro de 10 mm, como se pode observar na Figura 4.9.



Figura 4.9: Provete do tipo E3.

Nestes ensaios foi avaliado o comportamento dos provetes furados quando solicitados a uma força de tração. A existência de descontinuidades, como furos ou variações

Capítulo 4. Descrição Dos Ensaios

bruscas de secção, numa peça podem gerar tensões maiores na zona de descontinuidade do que a tensão média ao longo da peça, como se pode verificar na Figura 4.10.

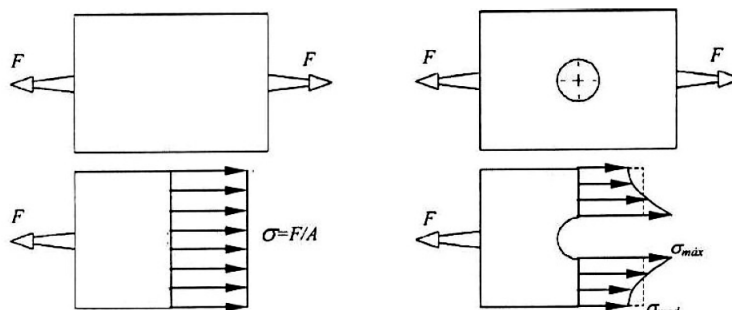


Figura 4.10: Tensões existentes em zonas descontinuas.

Para o dimensionamento de placas de aglomerados com estas características a tensão máxima (f_{max}) deve ser considerada para o cálculo da tensão admissível em vez da tensão média (\bar{f}). A tensão máxima pode ser calculada ao multiplicar a tensão média pelo coeficiente de concentração de tensões (K_t). O coeficiente de concentração de tensões, ou fator de forma, varia com a geometria da secção da placa e o seu valor pode ser determinado através do gráfico da Figura 4.12 (Pilkey e Pilkey, 2008).

Nestes ensaios foram avaliadas as tensões médias de rotura à tração (\bar{f}) e a tensão máxima de rotura à tração (f_{max}) utilizando, respetivamente, as seguintes expressões:

$$\bar{f} = \frac{P_u}{A_c} \quad (4.5)$$

$$f_{max} = K_t \times \bar{f} \quad (4.6)$$

Onde P_u é a força de rotura em tração e A_c é a menor área da secção da placa. De forma análoga ao ensaio descrito na secção anterior, os provetes foram fixados às garras sendo deixada uma folga de 80 mm entre estas como se pode verificar na Figura 4.11. A força de aperto utilizada foi de 10 Nm em cada parafuso. As garras foram depois acopladas ao mecanismo da *Zwick* por um sistema de aperto manual. Os ensaios foram efectuados com um controlo de deslocamentos de 1 mm/min.

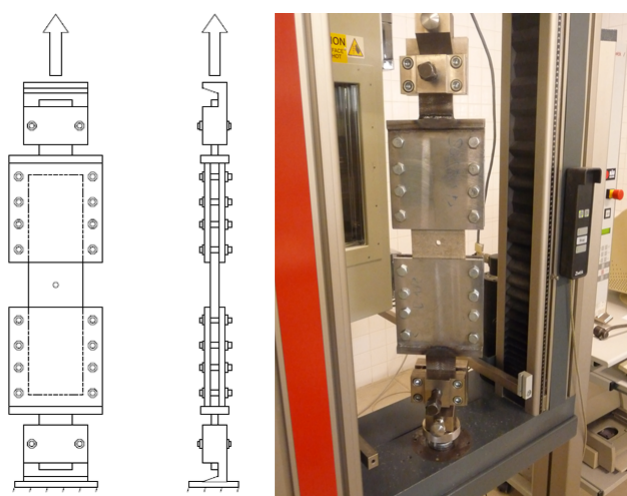


Figura 4.11: Pormenor dos ensaios aos provetes E31 e E32.

4.3.3 Ensaio de rotura por tração em ligações aparafusadas

Por vezes, quando se efetuam ligações com parafusos entre placas de CBPB, estas ligações podem provocar a rotura das placas. Esta rotura pode ser provocada pelas variações de comprimento das placas devido à retração do cimento ou à dilatação térmica, que causam tensões de esmagamento na zona de contato entre o parafuso e a placa provocando a rotura desta. Os ensaios de rotura por tração em ligações aparafusadas tiveram como objetivos analisar a influência da distância do parafuso ao bordo das placas de CBPB e ainda a influência da sua espessura na resistência da placa quando solicitada a uma força de tração.

Nestes ensaios foram testados quatro tipos de provetes cujas características são apresentadas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3: Dimensões dos Provetes E4.

Provetes	Quantidade de provetes	Altura h [mm]	Largura b [mm]	Espessura e [mm]	Distância ao bordo h_f [mm]
E41.1	5	300	100	12	50
E41.2	5	300	100	12	100
E42.1	5	300	100	16	50
E42.2	5	300	100	16	100

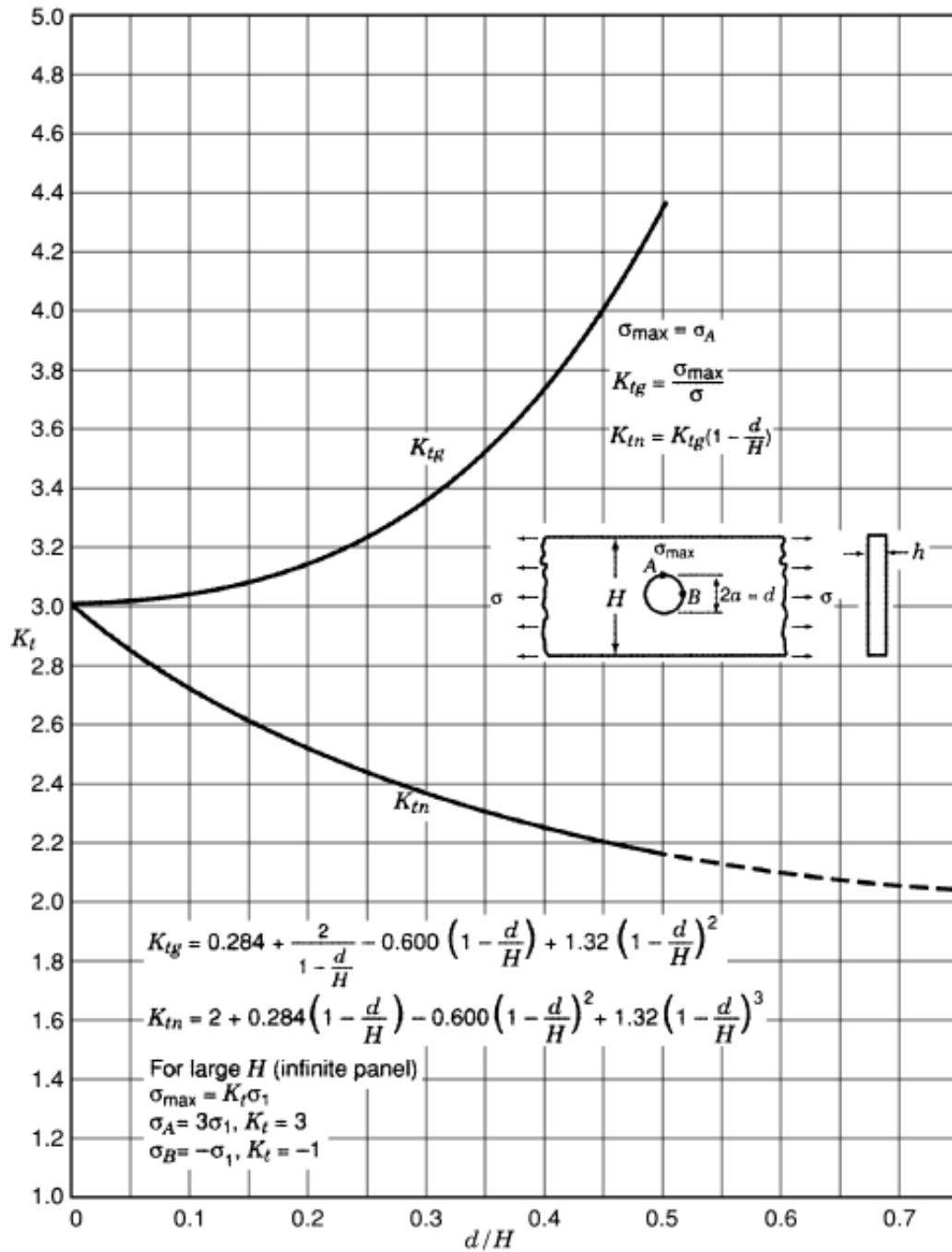


Figura 4.12: Determinação do coeficiente de concentração de tensão (adaptado de Pilkey e Pilkey, 2008)

4.3. Ensaios de resistência à tração

Todos os provetes têm uma forma retangular variando apenas a sua espessura ($300 \times 100 \times 12 - 16 \text{ mm}^3$) e a distância h_f do furo, com 10 mm de diâmetro, ao bordo do provete como podemos verificar na Figura 4.13. Nestes ensaios foi avaliada a força de tração exercida sobre o provete durante o ensaio (F) e do deslocamento (δ) efetuado pela garra.



Figura 4.13: Provetes E4: a) Furo a 100 mm; b) Furo a 50 mm.

Nestes ensaios foi avaliada a tensão de esmagamento (f_h), utilizando a seguinte equação:

$$f_h = \frac{P_u}{\phi_{bolt} \times e} \quad (4.7)$$

Onde, P_u é a força de rotura, ϕ_{bolt} é o diâmetro nominal do parafuso e e a espessura do provete. Os provetes foram fixos apenas na garra não furada numa extensão de 140 mm, utilizando uma força de aperto de 10 Nm em cada parafuso. A outra garra foi colocada na extremidade oposta do provete não se procedendo ao aperto dos parafusos desta garra, apenas se introduziu um parafuso de 8 mm de diâmetro entre o furo da garra e o furo do provete, como podemos verificar na Figura 4.14. As garras foram depois acopladas ao mecanismo da *Zwick* por um sistema de aperto manual. Os ensaios foram efetuados com um controlo de deslocamentos de 3 mm/min.



Figura 4.14: Pormenor dos ensaios aos provetes E4.

Capítulo 5

Apresentação e Análise dos Resultados

5.1 Introdução

Neste capítulo faz-se uma apresentação e análise dos valores registados durante a realização dos ensaios já descritos no Capítulo 4. Todas as análises efetuadas tiveram por base a formulação teórica e os objetivos definidos nos capítulos anteriores desta dissertação. O presente capítulo, à semelhança do anterior, será dividido em duas secções correspondentes a cada tipo de ensaio, nomeadamente, os ensaios de dilatação térmica e os ensaios de tração.

5.2 Ensaios de dilatação térmica

Os resultados dos ensaios para a determinação do coeficiente de dilatação térmica são apresentados de seguida. Na Figura 5.1 estão representadas as médias dos resultados das medições efetuadas ordenados pela variação de temperatura e valor de cálculo do coeficiente. É possível verificar que as medições registadas para -20°C de variação de temperatura diferem das outras medições, isto poderá dever-se ao facto da câmara climática utilizada não ter conseguido manter a humidade relativa de 50% para essa variação de temperatura. Todas as leituras efetuadas neste ensaio encontram-se no Anexo 1.

Com os ensaios efetuados nos provetes E11 foi possível determinar a média do valor do coeficiente de dilatação térmica nas diversas direções, tal como a média total. Como as condições de ensaio não foram mantidas para os -20°C de variação de temperatura, estes valores, embora registados, foram desprezados no cálculo da determinação do coeficiente.

No Quadro 5.1 estão indicados os valores médios das leituras para os quatro níveis de temperatura medidos. Determinou-se que o valor médio do coeficiente de dilatação térmica é de $1,15 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

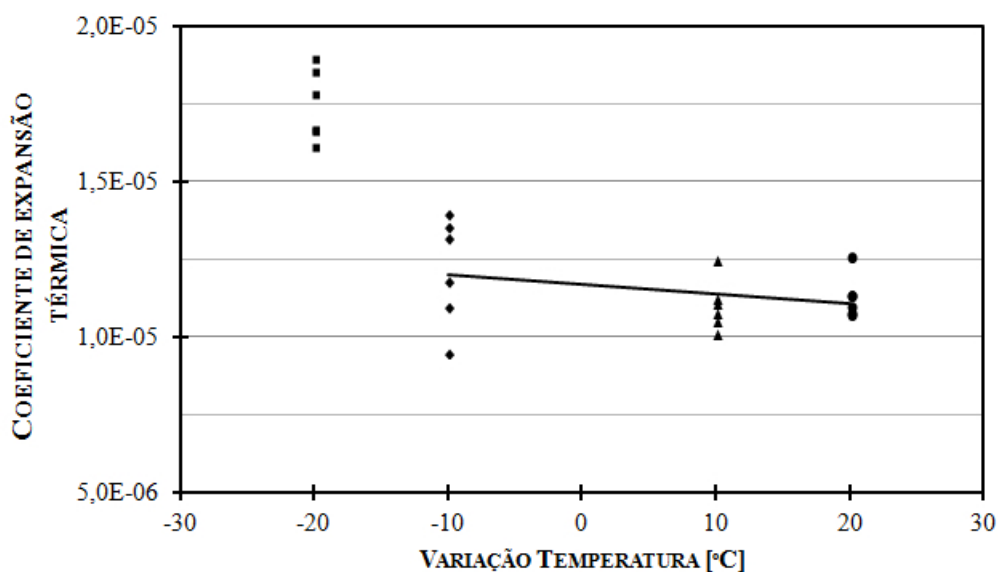


Figura 5.1: Resultados obtidos no ensaio para a determinação do coeficiente de dilatação térmica.

Quadro 5.1: Cálculo do coeficiente de dilatação térmica.

Coeficiente de Expansão Térmica [10 ⁻⁵ /°C]						
Média ± Desvio Padrão						
ΔT[°C]	A	B	C	D	E	F
-20	1,90 ± 0,10	1,85 ± 0,08	1,78 ± 0,08	1,67 ± 0,11	1,66 ± 0,10	1,61 ± 0,06
-10	1,40 ± 0,21	1,35 ± 0,15	1,17 ± 0,18	1,31 ± 0,28	1,09 ± 0,22	0,95 ± 0,20
+10	1,25 ± 0,20	1,11 ± 0,21	1,12 ± 0,15	1,08 ± 0,13	1,05 ± 0,10	1,01 ± 0,17
+20	1,26 ± 0,24	1,13 ± 0,23	1,13 ± 0,22	1,10 ± 0,19	1,08 ± 0,15	1,08 ± 0,18
	1,25 ± 0,11		1,16 ± 0,08		1,04 ± 0,06	
	1,15 ± 10					

Analisando os valores obtidos podemos verificar que o desvio padrão toma valores elevados, quando comparado com a média obtida, no entanto, os resultados obtidos foram os esperados tendo em conta os valores médios de coeficiente de dilatação do cimento e da madeira. O coeficiente de dilatação térmica para uma pasta de cimento Portland tem em média um valor entre os $1,8$ e $2,0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ e para a madeira $3,1$ a $4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. O coeficiente de dilatação térmica para estes materiais e para outros materiais derivados da madeira e cimento podem ser vistos no Quadro 5.2.

Quadro 5.2: Valores de coeficientes de dilatação térmica para diferentes materiais (Glass e Zelinka, 2010; NP EN 1992, 2010; Website: *Federal Highway Administration*)

Materiais	Coeficiente de dilatação Térmica [$10^{-5}/^{\circ}\text{C}$]
CBPB	1,04 - 1,25
Pasta de cimento Portland	1,8 - 2,0
Madeira	0,31 - 0,45
Argamassa	1,1 - 1,2
Betão	1

5.3 Ensaio de tração

5.3.1 Ensaio de tração uniaxial

Nesta secção são apresentados e analisados os resultados referentes aos ensaios de tração uniaxial nos provetes de CBPB. Nestes ensaios foram testados, ao todo, 20 provetes com 12 e 16 mm de espessura. Na Figura 5.2 encontram-se ilustrados os diagramas de tensão - extensão dos provetes estudados.

No decorrer dos ensaios foram observados dois modos de rotura diferentes como se pode verificar na Figura 5.3. As roturas ocorreram na zona da secção central entre os extensómetros e na zona junto das garras. É de referir que os provetes que romperam fora da zona de leitura dos extensómetros originaram valores de extensão diferentes dos esperados. Desta forma decidiu-se não incluir no estudo os valores de extensão obtidos nas roturas junto das garras.

Tendo em conta os acontecimentos observados no decorrer dos ensaios e analisando os diagramas apresentados na figura anterior, é possível verificar que os provetes evidenciam um comportamento dúctil antes da rotura e que o valor da tensão de rotura é superior nos provetes com 16 mm de espessura.

No Quadro 5.3 estão apresentados os valores de carga de rotura em tração (P_u) a tensão de rotura (f_u) e os respetivos valores médios e de desvio padrão.

Comparando os valores de tensão de rotura, tem-se que os valores obtidos para os provetes de 16 mm de espessura têm um aumento de 34% relativamente aos provetes com 12 mm. Este facto pode-se dever à excentricidade da força de tração devido ao afastamento de 2 mm do eixo da carga podendo provocar, além da força de tração inicial, uma flexão no provete, reduzindo desta forma o valor da tensão de rotura. No entanto este esforço de flexão pode ter sido reduzido devido ao atrito das rótulas existentes nas garras da máquina universal de tração. Outra causa para a redução da tensão de rotura nos provetes de 12 mm serão as próprias características dos provetes. Como vimos anteriormente, as placas de CBPB são formadas por uma camada interna de partículas grossas de madeira e uma camada externa de partículas mais finas e foi verificado, durante o período dos ensaios, que as camadas externas possuem a mesma espessura nos provetes de 12 e 16 mm. Tendo em conta que a camada de partículas finas de madeira possui um maior traço de cimento:madeira, podemos concluir que esta camada terá uma menor resistência à tração, se considerarmos que é a madeira que confere a resistência de tração ao material.

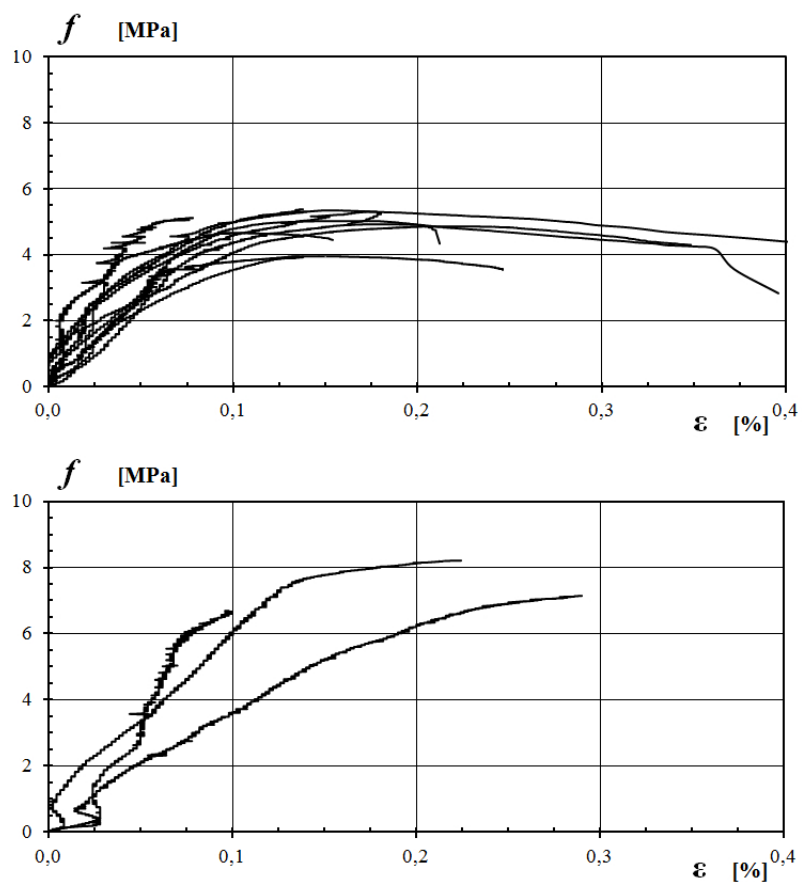


Figura 5.2: Diagramas tensão - extensão dos ensaios de rotura à tração dos provetes. Em cima: Provetes E21. Em baixo: Provetes E22.

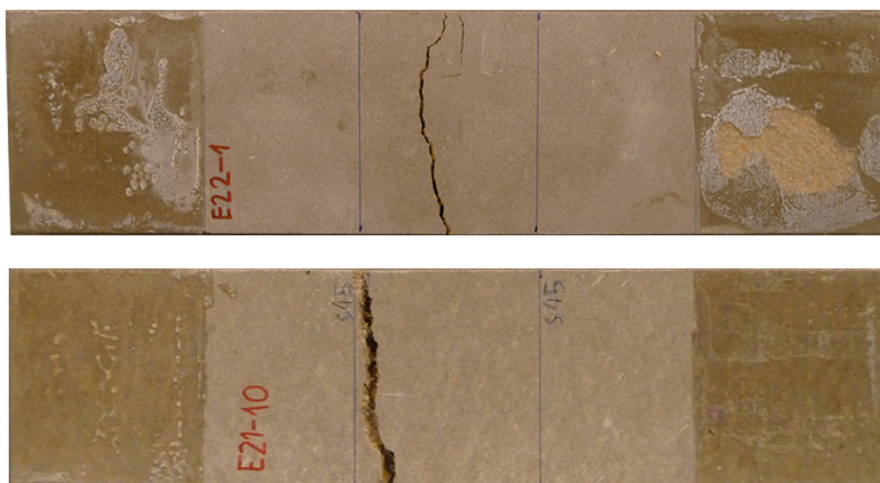


Figura 5.3: Modos de rotura obtidos nos provetes de CBPB durante os ensaios de tração uniaxial. Em cima: rotura entre extensómetros. Em baixo: rotura fora da zona dos extensómetros.

5.3. Ensaio de tração

Quadro 5.3: Resultados da carga de rotura e tensão de rotura em tração dos provetes de CBPB ensaiados

Provete	Espessura e [mm]	P_u [N]	f_u [MPa]	Média \pm Desvio Padrão [MPa]
E21-1	12	6420	5,3	4,9 \pm 0,5
E21-2		6022	5,0	
E21-3		6134	5,1	
E21-4		6383	5,3	
E21-5		4738	3,9	
E21-6		5919	4,9	
E21-7		6454	5,4	
E21-8		5823	4,9	
E21-9		4745	4,0	
E21-10		5595	4,7	
E22-1	16	13135	8,2	7,3 \pm 1
E22-2		13477	8,4	
E22-3		8847	5,5	
E22-4		11623	7,3	
E22-6		10698	6,7	
E22-7		11068	6,9	
E22-9		13648	8,5	
E22-10		11431	7,1	

Deste modo os provetes de 12 mm de espessura possuem uma menor área de secção resistente à tração que os provetes com 16 mm. Além disto, como podemos verificar na Figura 5.4, as camadas internas dos provetes de CBPB contém zonas de vazios, o que pode também reduzir resistência de rotura, sendo mais prejudicial em placas com espessuras reduzidas.



Figura 5.4: Heterogeneidade verificada nos provetes de CBPB testados

Capítulo 5. Apresentação e Análise dos Resultados

No Quadro 5.4 apresentam-se os resultados obtidos de extensão de rotura (ϵ_u) e o valor do módulo de elasticidade em tração (E) com os respetivos valores médios e de desvio padrão. Como foi referido anteriormente, no cálculo deste valores, foram desprezados os resultados obtidos nos provetes cuja rotura se deu pela zona da garra.

Quadro 5.4: Resultados da extensão na rotura do módulo de elasticidade em tração dos provetes de CBPB ensaiados

Provete	Espessura e [mm]	ϵ_u [%]	E [GPa]	Média \pm Desvio Padrão [MPa]
E21-1	12	0,150	8,51	5,84 \pm 1,44
E21-2		0,174	4,62	
E21-4		0,174	6,21	
E21-5		0,134	6,28	
E21-6		0,180	5,75	
E21-7		0,138	6,72	
E21-8		0,220	4,04	
E21-9		0,100	4,61	
E22-1		16	0,224	
E22-6	0,098		8,36	
E22-10	0,290		3,29	

Analisando o quadro anterior verifica-se que, estatisticamente, o desvio padrão toma um valor bastante elevado para o módulo de elasticidade, sobretudo para os provetes com 16 mm de espessura onde o valor do desvio padrão é próximo de metade da média. Para um melhor estudo deste material deveriam ter sido realizados mais ensaios que, por motivos de logística, não foram possíveis de realizar. No entanto o valor médio do módulo de elasticidade à tração é semelhante entre os provetes de 12 e 16 mm de espessura.

Na Figura 5.5 apresentam-se as propriedades mecânicas determinadas para os provetes com 12 mm de espessura (E21) e os provetes com 16 mm de espessura (E22).

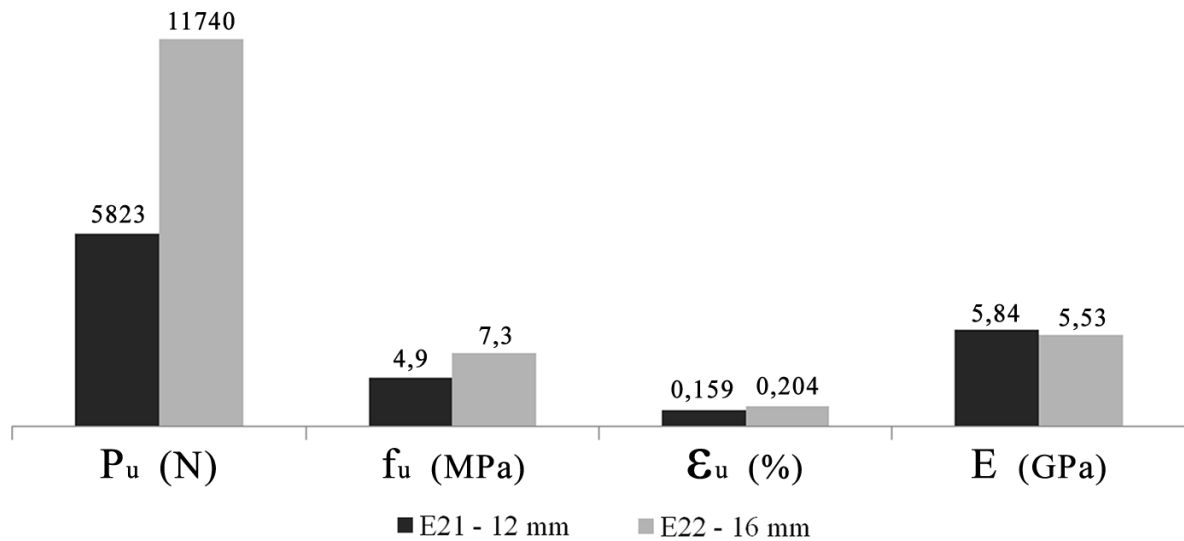


Figura 5.5: Comparação das propriedades mecânicas dos provetes com 12 e 16 mm de espessura.

5.3.2 Ensaio de tração uniaxial em peças furadas

Foram ensaiados à tração dez provetes de CBPB com 12 e 16 mm de espessura. Na Figura 5.6 encontram-se ilustrados os gráficos de força-deslocamento. Durante o decorrer dos ensaios, observaram-se dois modos diferentes de rotura dos provetes. O primeiro modo de rotura, que coincide com o expectável, deu-se pela zona do furo, o segundo modo de rotura observado deu-se junto à zona de aperto da garra, como se pode observar na Figura 5.7.

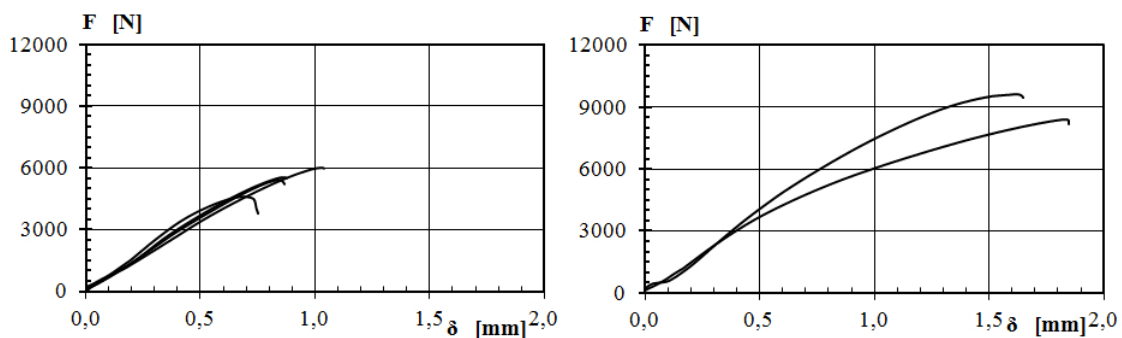


Figura 5.6: Diagramas força - deslocamento dos ensaios de rotura à tração dos provetes E31 e E32

Como foi referido anteriormente, estes ensaios pretendem estudar a influência das discontinuidades dos provetes na sua tensão de rotura, desse modo decidiu-se excluir do estudo os resultados obtidos pelos provetes com um modo de rotura distante da zona do furo.

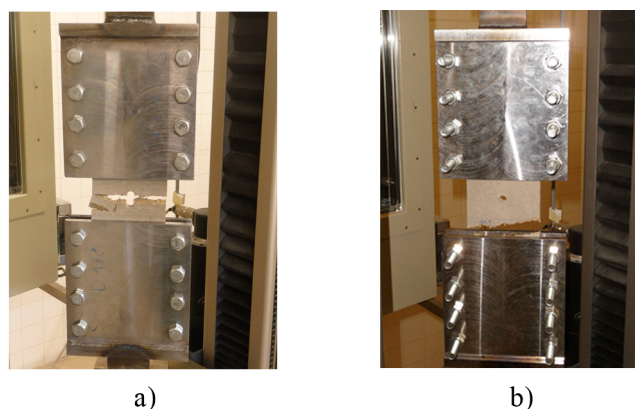


Figura 5.7: Modo de rotura verificados nos provetes E3: a) rotura pelo furo; b) rotura junto à garra.

No Quadro 5.5 apresentam-se as propriedades mecânicas determinadas para os provetes em estudo. Analisam-se a força de rotura em tração (P_u), a tensão média de rotura à tração (\bar{f}) e a tensão máxima de rotura à tração (f_{max}). Foi também analisada a razão entre as tensões médias e máxima com a tensão de referência (f_{ref}) que é a tensão de rotura observada para os provetes de 12 e 16 mm calculada na Secção 5.3.1. De notar que o coeficiente de concentração de tensões (K_t) foi semelhante para todos os provetes e foi obtido, através da Figura 4.12, com o valor de 2,7.

Quadro 5.5: Análise das propriedades mecânicas dos provetes E31 e E32

Provete	Espessura	A_c	f_{ref}	P_u	\bar{f}	\bar{f} / f_{ref}	f_{max}	f_{max} / f_{ref}
	e [mm]	[mm ²]	[MPa]	[N]	[MPa]		[MPa]	
E31-1	12	1080	4,9	6020	5,6	1,14	15,1	3,1
E31-2	12	1080	4,9	5441	5,0	1,03	13,6	2,8
E31-3	12	1080	4,9	5513	5,1	1,04	13,8	2,8
E31-4	12	1080	4,9	4600	4,3	0,87	11,5	2,3
E32-1	16	1440	7,3	8413	5,8	0,80	15,8	2,2
E32-5	16	1440	7,3	9638	6,7	0,92	18,1	2,5

Como se pode observar, as tensões de rotura obtidas diferem bastante das tensões máximas expectáveis através do cálculo do coeficiente de concentração de tensões, visto que a razão entre estas duas varia entre as duas e três unidades. No entanto os valores de tensão média encontram-se muito próximos da tensão de referência, sendo que a razão entre estas varia muito próximo da unidade. Isto pode significar que, embora a tensão de cedência da fibra próxima do furo seja rapidamente atingida, o material, devido à sua ductilidade demonstrada na Secção 5.3.1, redistribui as tensões para as fibras adjacentes resultando num aumento do valor da carga até atingir a rotura. De referir que os valores de força de rotura observados para os provetes de 12 mm de espessura foram mais elevados que alguns dos valores de força de rotura observados

nos ensaios de tração uniaxial, como vimos na secção 5.3.1, isto pode se dever de novo à heterogeneidade verificada nestes provetes.

5.3.3 Ensaio de rotura por tração em ligações aparafusadas

Foram ensaiados à tração 20 provetes de CBPB com 12 e 16 mm de espessura com um furo distanciado a 50 e 100 mm do bordo. Este ensaio foi inicialmente realizado utilizando um parafuso com 5 mm de diâmetro, no entanto, como se pode verificar pela Figura 5.8 o modo de rotura deu-se pelo corte do provete na zona do parafuso e não por esmagamento e tração como era esperado. Deste modo, utilizou-se nos ensaios seguintes um parafuso com 8 mm de diâmetro.



Figura 5.8: Modo de rotura observado na utilização de um parafuso com 5 *mm* de diâmetro.

Nas Figuras 5.9 e 5.10 encontram-se ilustrados os diagramas de força - deslocamento dos ensaios realizados à rotura de ligações aparafusadas por tração. No decorrer dos ensaios foi possível distinguir dois momentos distintos até ser atingida a rotura do provete. O primeiro, originando a parte inicial dos diagramas força-deslocamento, traduz as tensões de esmagamento existentes entre o parafuso e o provete. O segundo momento, originando uma zona com menor declive na parte final dos diagramas força-deslocamento, traduz as tensões de tração provocadas no provete que o levaram à rotura.

Na Figura 5.11 apresentam-se as roturas obtidas durante os ensaios dos provetes. Verifica-se que a distância do furo ao bordo do provete altera o mecanismo de rotura, visto que, os provetes com um furo a 50 mm do bordo apresentaram, na sua maioria, fendas perpendiculares e paralelas à direção da carga aplicada enquanto que os provetes com um furo a 100 mm do bordo apresentam apenas fendas perpendiculares à carga.

Capítulo 5. Apresentação e Análise dos Resultados

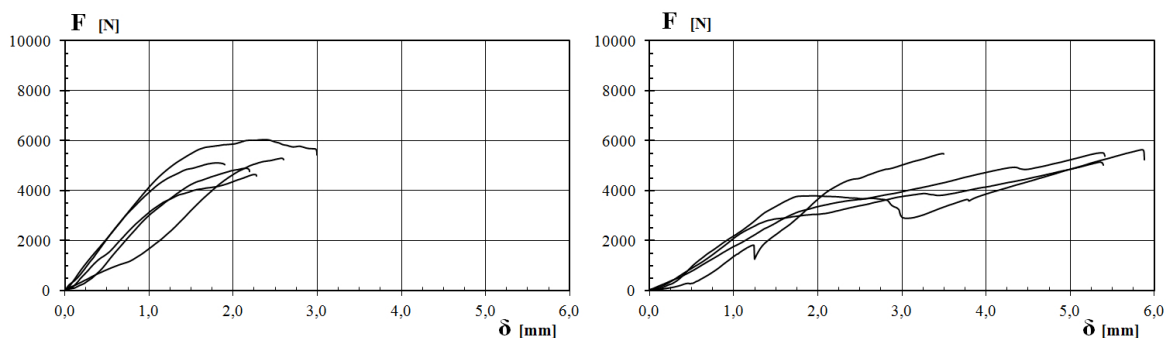


Figura 5.9: Diagramas força - deslocamento dos ensaios de rotura por tração em ligações aparafusadas em provetes com 12 mm de espessura. À esquerda: furo a 50 mm do bordo. À direita: furo a 100 mm do bordo.

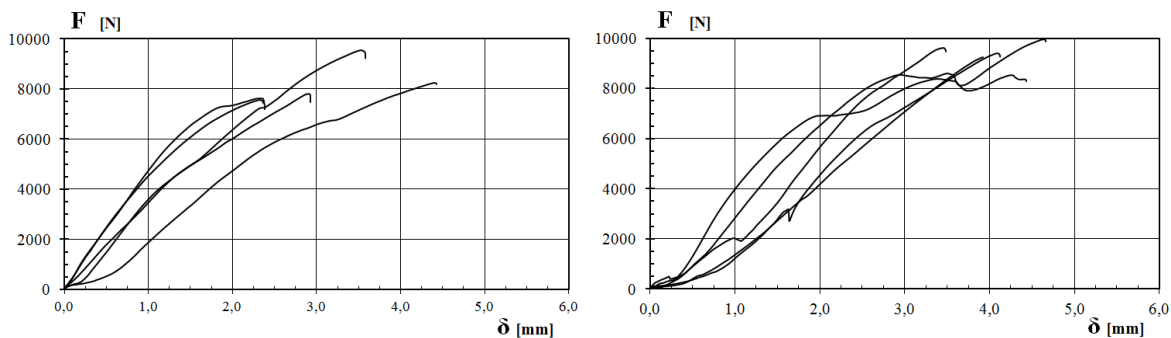


Figura 5.10: Diagramas força - deslocamento dos ensaios de rotura por tração em ligações aparafusadas em provetes com 16 mm de espessura. À esquerda: furo a 50 mm do bordo. À direita: furo a 100 mm do bordo.

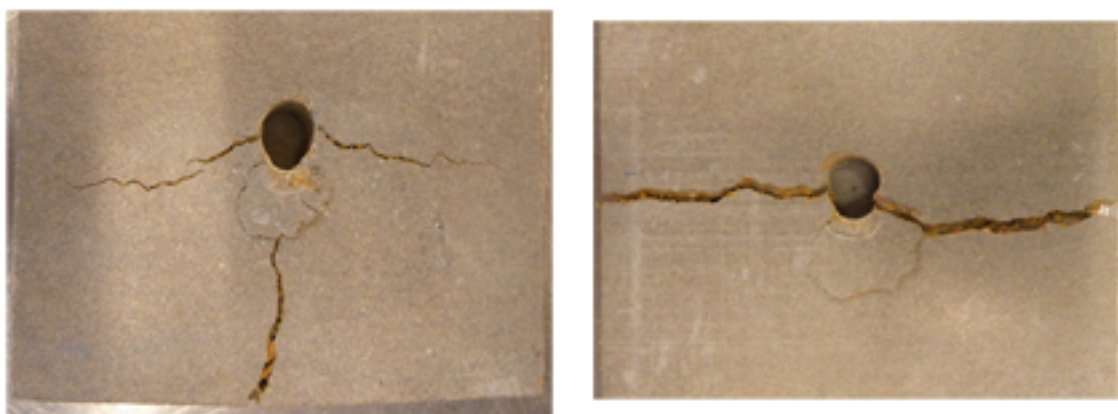


Figura 5.11: Modos de rotura obtidos nos provetes de CBPB durante os ensaios de tração em ligações aparafusadas. À esquerda: furo a 50 mm do bordo. À direita: furo a 100 mm do bordo.

Para melhor entender a distribuição de tensões que ocorre durante a ruptura das ligações, foi efetuada uma modelação em elementos finitos dos ensaios efetuados com o auxílio do programa de cálculo automático SAP2000.

Para esta simulação considerou-se um comportamento elástico e linear do material CBPB utilizando-se elementos de membrana. A malha de elementos finitos foi discretizada com elementos quadrangulares com 2,5 mm de lado. O furo foi simulado de forma aproximada através de um octógono.

Para as translações considerou-se que os três nós do furo em contato com o parafuso, se encontravam restringidos aos deslocamentos em todas as direções. A carga total foi distribuída por uma área de $25 \times 100 \text{ mm}^2$ na zona do provete mais afastada do furo.

Na análise efetuada para as Figuras 5.12 e 5.13 verificou-se que as tensões se dissipam com o aumento da distância entre o bordo e o furo (h_f), isto porque, o bolbo de tensões regista uma maior área nos provetes onde o furo se encontra a 100 mm de distância do bordo. Deste modo, quanto maior a distância h_f , mais uniformes são as tensões existentes, sendo distribuídas em todo o comprimento do provete. É possível também verificar que nos provetes com um furo a 50 mm do bordo, ocorrem tensões de tração consideravelmente elevadas junto ao bordo na direção horizontal, o que pode justificar a ruptura observada durante os ensaios.

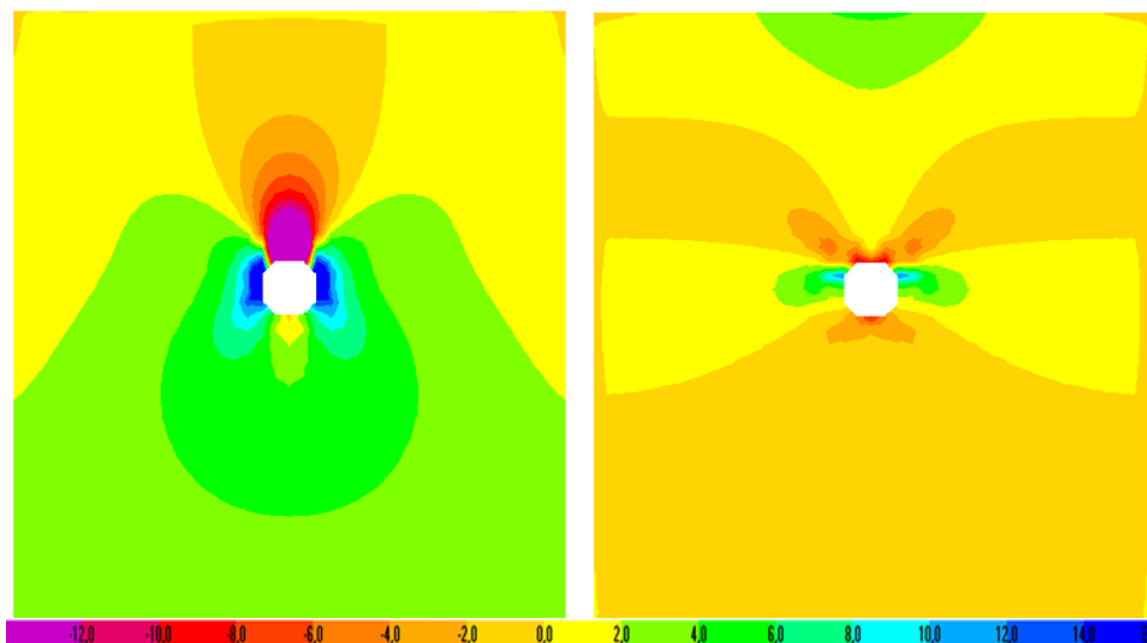


Figura 5.12: Modelo numérico elástico e linear do ensaio de ligações aparafusadas para furos a 50 mm de distância. À esquerda: tensões na direção vertical. À direita: tensões na direção horizontal. (Tensões em kN/m^2)

Nas Figuras 5.14 e 5.15 é possível visualizar o diagrama de tensões principais para os provetes com furo a 50 e 100 mm do bordo, respetivamente. É possível contatar que as trações, predominantes a azul, se direcionam para o bordo mais afastado do furo, exceto na Figura 5.14, onde é possível verificar tensões horizontais junto do bordo

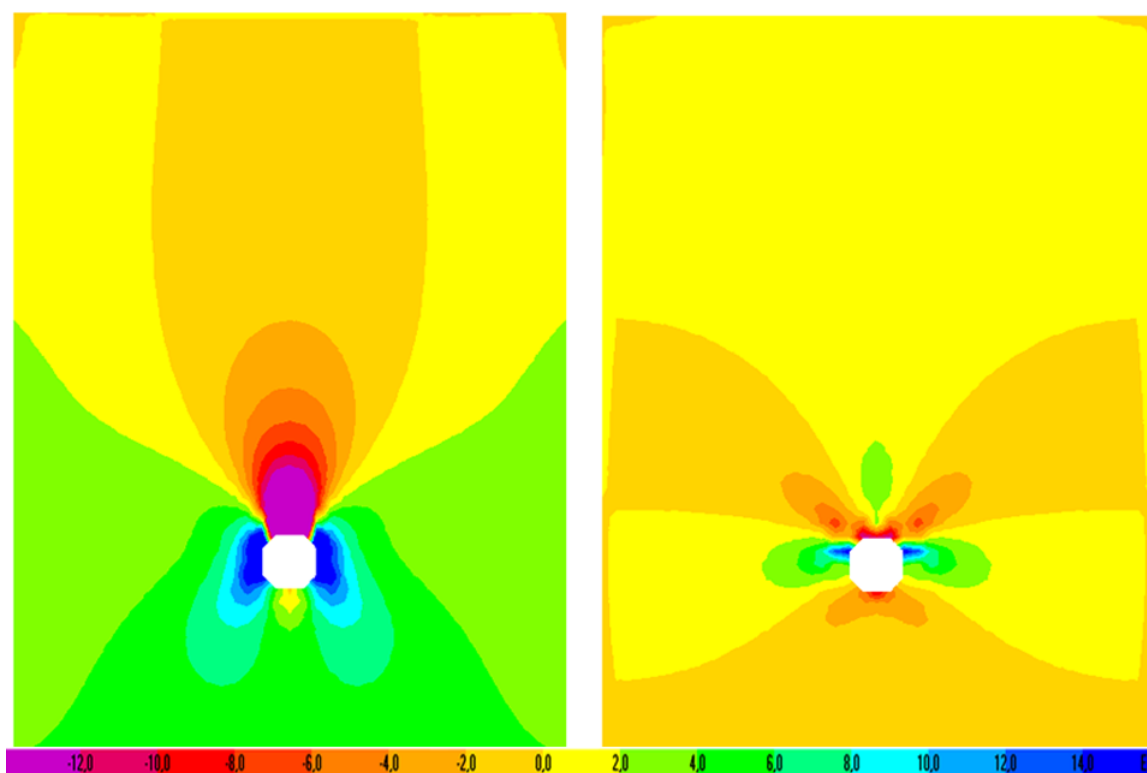


Figura 5.13: Modelo numérico elástico e linear do ensaio de ligações aparafusadas para furos a 100 mm de distância. À esquerda: tensões na direção vertical. À direita: tensões na direção horizontal. (Tensões em kN/m^2)

mais próximo do furo. As compressões localizam-se, maioritariamente, na zona de esmagamento entre o parafuso e o painel.

No Quadro 5.6 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios para a carga de rotura em tração (P_u) e a tensão de esmagamento (f_h) variando a distância (h_f) do furo ao bordo do provete e os respetivos valores médios.

Com base nos ensaios efetuados verificou-se que, tal como esperado, a resistência à rotura por tração aumentou com a espessura do provete e com o aumento da distância (h_f), tendo-se verificado para este um acréscimo médio de 10%. É expectável que a resistência à rotura por tração na zona de ligação convirja para um determinado valor à medida que a distância (h_f) aumente, isto porque, como vimos nos modelos numéricos, as tensões tendem-se a uniformizar quando o furo se encontra mais afastado do bordo. Deste modo, devido aos resultados observados, podemos concluir que a resistência à rotura por tração possa convergir para valores de h_f entre os 50 e 100 mm. No entanto é recomendável, como segurança, que as ligações aparafusadas estejam localizadas a, pelo menos, 100 mm do bordo mais próximo.

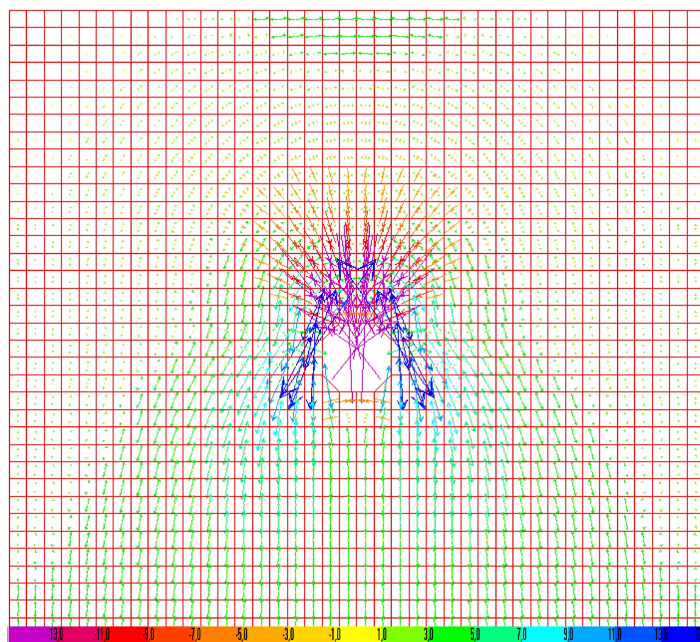


Figura 5.14: Diagrama de tensões principais. Modelo numérico do ensaio em provetes com furo a 50 mm do bordo. (Tensões em kN/m^2)

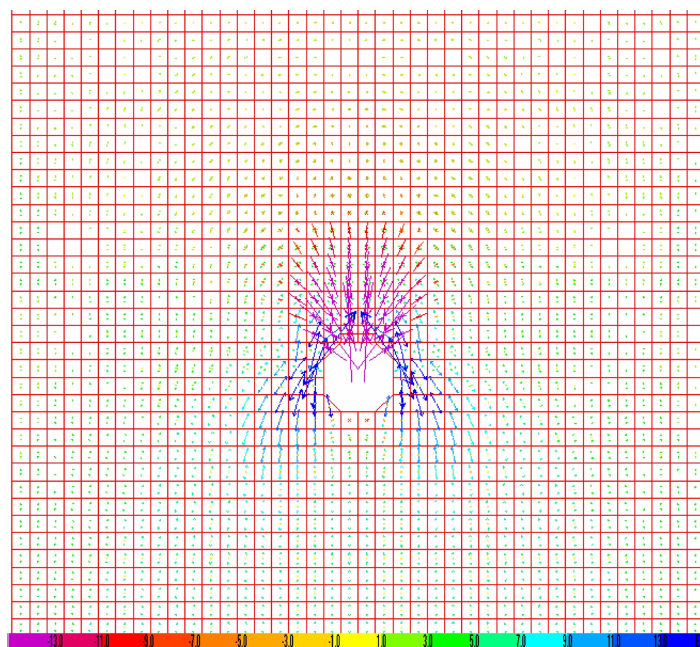


Figura 5.15: Diagrama de tensões principais. Modelo numérico do ensaio em provetes com furo a 100 mm do bordo. (Tensões em kN/m^2)

Quadro 5.6: Resultados de carga de rotura em tração dos provetes de CBPB ensaiados.

Provete	Espessura e [mm]	Distância ao bordo h_f [mm]	P_u [N]	P_{medio} [N]	f_h [MPa]	$f_{h,medio}$ [MPa]
E41.1-1	12	50	5286	5199	55	54
E41.1-2			6049		63	
E41.1-3			4655		48	
E41.1-4			4891		51	
E41.1-5			5113		53	
E41.2-1	12	100	5884	5534	61	58
E41.2-2			5644		59	
E41.2-3			5529		58	
E41.2-4			5476		57	
E41.2-5			5137		54	
E42.1-1	16	50	7635	8162	60	64
E42.1-2			7820		61	
E42.1-3			8233		64	
E42.1-4			9547		75	
E42.1-5			7574		59	
E42.2-2	16	100	9255	9206	72	72
E42.2-3			8521		67	
E42.2-4			9635		75	
E42.2-5			9414		74	

5.4 Estudo dos efeitos de retração e temperatura nas ligações

No decorrer desta investigação, ao analisar os resultados dos diversos ensaios, e por sugestão da empresa VIROC, verificou-se que seria pertinente realizar um estudo da influência da temperatura e da retração na rotura dos painéis de CBPB nas zonas de ligação. A retração do CBPB impõe uma redução na dimensão do painel ao longo do tempo, não dependendo das cargas aplicadas neste. A retração do CBPB depende da humidade ambiente, das dimensões do painel e da composição dos materiais deste. No caso em estudo, será dimensionado o diâmetro do furo necessário para que um painel com $3 \text{ m} \times 1,25 \text{ m} \times 12 \text{ mm}$ de dimensões, como representado na Figura 5.16, não apresente rotura na zona de ligação devido às ações de temperatura e retração. Neste caso iremos considerar que as ligações estão localizadas a uma distância de 50 mm do bordo do painel.

Ao considerar a temperatura e a retração como as únicas ações atuantes no painel, temos que, o valor da variação do comprimento deste é dada por:

$$\Delta l = \alpha \Delta T l + \epsilon_{vs} l \quad (5.1)$$

Onde, α é o coeficiente de dilatação linear, ΔT é a variação de temperatura, ϵ_{vs} é a extensão de retração do CBPB e l é a maior distância, em metros, entre as ligações.

5.4. Estudo dos efeitos de retração e temperatura nas ligações

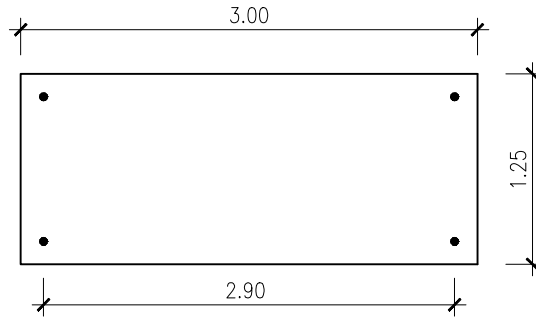


Figura 5.16: Painel de CBPB com 3 m × 1,25 m × 12 mm de dimensões e ligações aparafusadas

O valor do coeficiente de dilatação térmica linear foi calculado na Secção 5.2 desta dissertação, e será considerada uma variação de temperatura correspondente a uma redução de -25°C . O valor da extensão de retração do CBPB a tempo infinito não é conhecido, mas como se verificou no cálculo do coeficiente de dilatação térmica, as características físicas deste material são bastante influenciadas pelas características do cimento. O valor da extensão de retração do betão pode tomar diferentes valores, embora a sua ordem de grandeza varie entre 0,02 a 0,04 % seguindo as recomendações do EC2 (NP EN 1992, 2010). No entanto esta ordem de grandeza foi avaliada para secções transversais com espessura equivalente elevada quando comparado com o painel analisado neste estudo. Deste modo, adota-se um valor superior ao do betão, para o caso em estudo assumiu-se 0,1%. Este valor deve ser confirmado em ensaios de retração do CBPB.

Aplicando a Equação 5.1, tem-se que:

$$\Delta l = -1,15 \times 10^{-5} \times 25 \times 2,90 \times 10^3 - 0,1 \times 10^{-2} \times 2,9 \times 10^3 = -0,83 - 2,90 \approx 4\text{mm} \quad (5.2)$$

Tendo em conta o valor obtido é possível sugerir as seguintes medidas para que, devido aos efeitos anteriormente descritos, não ocorra contacto entre o parafuso e o painel evitando, assim, a possível rotura deste:

$$\phi_{furo} > \phi_{bolt} + \Delta\phi_d \quad (5.3)$$

Onde,

$$\Delta\phi_d = \Delta l \times \frac{l}{2,9} \quad (5.4)$$

Onde, ϕ_{furo} é o diâmetro do furo para um parafuso, ϕ_{bolt} é o diâmetro nominal do parafuso e $\Delta\phi_d$ é a diferença entre o diâmetro do furo e o diâmetro do parafuso e onde Δl pode tomar o valor de 4 mm determinado acima, como demonstrado na Figura 5.17.

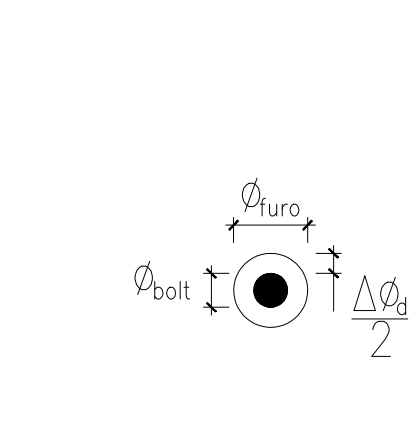


Figura 5.17: Esquema de dimensões na ligação aparafusada em painel de CBPB.

Capítulo 6

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1 Conclusões e comentários finais

A presente dissertação integra-se num projeto de investigação e desenvolvimento apoiada pela VIROC, para a utilização do material CBPB (Cement-Bonded Particle Boards) em aplicações estruturais. Para isto desenvolveram-se dentro do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa diversos estudos para determinar as diferentes propriedades físicas e mecânicas deste material. Neste trabalho abordou-se o comportamento do CBPB a forças de tração e a determinação do coeficiente de dilatação térmica deste material.

O CBPB é um material compósito formado por de partículas de madeira, no entanto, a madeira por si só, também pode ser utilizada para aplicações estruturais. A madeira possui resistências mecânicas bastante elevadas à tração, compressão, flexão e corte na direção paralela à fibra mas menores na direção perpendicular. A heterogeneidade a anisotropia e os diversos defeitos que podem ser encontrados em peças de madeira, tornam esta um material sub-ótimo de ser utilizado em aplicações estruturais quando comparada com o betão ou o aço.

De forma a tentar minimizar os defeitos inerentes da madeira surgiu uma técnica de conversão desta, que consiste na redução dos toros de madeira em elementos de menor dimensão. Estes elementos são depois ligados uns aos outros de modo a formar um novo produto. Estes produtos são denominados por derivados de madeira e podem possuir dimensões e características distintas, consoante a sua aplicação em construção. A madeira que constitui estes derivados pode ser extraída de diversas origens, tais como: madeiras com defeitos localizados, madeiras de pequeno porte, madeiras provenientes de desperdícios de construção e de serrações. Este modo de fabrico permite criar um produto mais compacto e uniforme que a madeira sólida, mantendo ainda a elevada resistência desta.

Uma classe de produtos derivados da madeira são os compostos de madeira e cimento nos quais se inserem os CBPB. Estes compostos são constituídos por madeira, água, químicos e sobretudo cimento que tem a função de ligar as partículas de madeira.

Capítulo 6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

O cimento também providencia uma superfície lisa, durável e fácil de pintar a estes produtos. Um dos problemas do fabrico destes compósitos é a compatibilidade entre a madeira e o cimento, pois a madeira contém produtos extrativos que perturbam o processo de hidratação do cimento. Embora este problema esteja a ser estudado à mais de três décadas hoje ainda não existe um método de avaliação da compatibilidade entre os dois materiais que seja consensual embora existam processos, tais como a adição de aceleradores de presa que podem minorar estes problemas.

Nos ensaios realizados foram utilizados provetes de CBPB constituídos por: partículas de madeira (20,7%), cimento Portland tipo II (CEM II / A-L42,5) (66,7%), água (10,7%) e químicos (1,9%). Com base nos 10 ensaios realizados e nas 240 medições efetuadas com os provetes do tipo E1 pode-se concluir que o coeficiente de dilatação térmica do CBPB toma em média o valor de $1,15 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$. Este valor era expectável na medida em que o CBPB é formado por um traço de 1:3 madeira:cimento. Sendo que este valor é pouco menor que o coeficiente de dilatação térmica de uma pasta de cimento Portland mas acima da madeira.

Dos 20 ensaios realizados com os provetes do tipo E2 foi possível verificar que a tensão de rotura do CBPB varia com a espessura do provete. Isto pode dever-se a esforços induzidos pelas garras durante o ensaio, ou a características próprias dos provetes, como a igual espessura das camadas de partículas finas ou a existência de zonas de vazios no interior do provete. Foi também possível verificar nestes ensaios a existência de um patamar plástico antes da rotura do provete, podendo este efeito ser devido à resistência providenciada pelas partículas de madeira. Foi determinada uma resistência e módulo de elasticidade médios à tração para provetes com 12 mm de espessura de 4,9 MPa e 5,84 GPa, respetivamente. Com os provetes de 16 mm de espessura obteve-se uma resistência e módulo de elasticidade médios de 7,3 MPa e 5,53 GPa, respetivamente.

Com base nos dez ensaios realizados neste estudo com os provetes tipo E3 pode-se verificar que a existência de descontinuidades na secção de uma peça de CBPB não reduz significativamente a resistência à tração deste material. Como foi visto, a tensão de rotura média à tração (\bar{f}) obtida nos ensaios foi bastante próxima da tensão de referência (f_{ref}) obtida no estudo dos provetes E2.

Nos 20 ensaios realizados relativamente à resistência à tração em peças aparafusadas, o CBPB apresentou uma resistência à rotura por esmagamento na ordem dos 62 MPa, onde esta depende da distância entre o parafuso e o bordo mais próximo e da espessura da peça. Foi também possível verificar que a distribuição de tensões junto à superfície de contato entre o parafuso e a placa depende da distância do furo ao bordo. Tendo em conta os resultados obtidos é recomendável que em ligações aparafusadas, os furos estejam localizados a mais de 100 mm do bordo mais próximo.

Em relação ao diâmetro do furo recomendável para impedir a rotura dessa zona devido aos efeitos de temperatura e retração, é aconselhável que a diferença entre o diâmetro do furo e o diâmetro do parafuso seja calculada pela expressão: $\Delta\phi_d = \Delta l \times \frac{l}{2,9}$, onde Δl pode tomar o valor de 4 mm.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Embora este trabalho tenha aprofundado algumas das características físicas e mecânicas do CBPB, nomeadamente a sua resistência à tração e o seu coeficiente de dilatação térmica, durante o processo de investigação foi verificado que é necessário realizar novos estudos do material para que este possa ser utilizado estruturalmente. Deste modo, apresentam-se de seguida algumas sugestões passíveis de ser desenvolvidas em futuras investigações:

- realização de novas atividades experimentais, com uma maior amostra de provetes, para a caracterização do comportamento à tração do material CBPB, de forma a melhor entender a diferença entre resistências de painéis com diferentes espessuras;
- realização de atividades experimentais para a caracterização do comportamento à flexão do material CBPB, permitindo o estudo da sua possível aplicação em pavimentos;
- realização de atividades experimentais para a caracterização de outras propriedades físicas do CBPB, tais como a retração e a influência da humidade na expansão linear e resistência do material;
- realização de um estudo aprofundado sobre a rotura na zona de ligação devida aos fatores ambientais;

Bibliografia

- Beraldo, A. L. (1997): *Compósito biomassa vegetal-cimento*, Materiais não convencionais para construções rurais, Campina Grande: Editora Gráfica Marcone, pp. 1-48.
- Beraldo A. L. e Carvalho, J. V. (2004): *Compósito Eucalyptus grandis - cimento Portland*, Scientia Forestalis 65, pp. 150-161.
- Branco, J. M. (2003): *Comportamento das Ligações Tipo Cavilha em Estruturas Mistas Madeira-Betão*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.
- Carvalho, S. F. (2007): *Impregnação de Cor em Madeira*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.
- Coutts, R. S. P. e Campbell, M.D. (1980): *Wood fibre-reinforced cement composites*, Journal of Materials Science 15, pp.1962-1970.
- EN 338 (1995): *European Norm: Structural Timber - Strength Classes*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- EN 633 (1993): *European Norm: Cement-bonded particleboards - Definition and classification*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- EN 789 (2004): *European Norm: Timber structures - Test methods - Determination of mechanical properties of wood based panels*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- Faria, G. (2010): *Comportamento estrutural de pilares construídos com CBPB*, Dissertação de Mestrado, FCT-UNL
- Faria, G., Chastre, C., Lúcio, V. e Nunes, A. (2013): *Compression behaviour of short columns made from cement-bonded particle board*, Construction and Building Materials 40, Elsevier, pp.60-69.
- Fischer, V. F., Weinhaus, O., Ryssel, M. e Oldbrecht, J. (1974): *The water-soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lightweight wood-wools boards*, Holztechnologie 15(1), pp. 12-19.
- Franco, S. I. (2008): *Proposta de Atribuição de Propriedades Mecânicas a Elementos Estruturais de Madeira por Inspeção Visual in situ*, Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.
- Glasse, S. V. e Zelinka, S. L. (2010): *Moisture Relations and Physical Properties of Wood*, Wood Handbook - Wood as an engineering material, Forest Products Laboratory, pp.4-1 - 4-19, Madison, Wisconsin.

Capítulo 6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

- Hachmi, M., Moslemi, A.A. e Campbell, A.G. (1990): *A new technique to classify the compatibility of wood with cement*, Wood Science Technologies, 24, pp. 345-354.
- Hachmi, M. e Moslemi, A.A. (1989): *Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives*, Forest Products Journal, 39(6), pp. 55-58.
- Hoffmeyer, P. (1995): *Wood as a Building Material, Timber Engineering*, Step 1, Almere Centrum Hout, Leitura A4.
- Hofstrand, A. D. e Moslemi, A. A. (1987): *Curing characteristics of wood particle from nine northern Rocky Mountain species mixed with Portland Cement*, Forest Products Journal 34 , pp. 57-61.
- Humphries, C. J. e Sutton, J. R. (1996): *Árvores de Portugal e Europa*. Fundo para a Protecção dos Animais Selvagens (FAPAS) , Porto.
- Kretschmann, D. E. (2010): *Mechanical Properties of Wood, Wood Handbook - Wood as an engineering material*, Forest Products Laboratory, pp.5-1 - 5-46, Madison, Wisconsin.
- Lee, W. C., Hong, Z. e Phillips, D. R. (1987): *Effect of cement/wood ratios and wood storage conditions on hydration temperature, hydration time, and compressive strength of wood-cement mixtures*, Wood and fiber science, Volume 9, n. 3, pp. 262-268.
- Lee, W.C. e Hong, Z. (1986): *Compressive strength of cylindrical samples as an indicator of wood-cement compatibility*, Forest Products Journal 36(11/12), pp. 87-90.
- LNEC M9 (1997): *Madeiras para construção: Humidade na madeira*, Ficha LNEC, Lisboa.
- Machado, J. S. (2005): *Placas de derivados de madeira*, LNEC, Lisboa.
- Marra, A. A. (1992): *Technology of wood bonding: principles and practice*, Van Nostrand Reinhold, 454 p.
- Martins, S. F. (2009): *Estruturas de Madeira - Inspeção e Diagnóstico. Aplicação em Caso de Estudo*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.
- Martins, J. G. e Vieira, A. (2004): *Materiais de construção: Derivados de madeira*, Sebenta de Materiais I, UFP, Porto.
- Miller, D.P. e Moslemi, A. A. (1991): *Wood-cement composites: species and heartwood-sapwood effects on hydration and tensile strength*, Forest Products Journal 41(3), pp. 9-14.
- Negrão, J., Faria, A. (2009): *Projecto de Estruturas de Madeira*, Publindústria, Edições Técnicas, Porto.
- NP EN 1992 (2010): Eurocode 2 - *Design of concrete structures - General rules for buildings*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- Papadopoulos, A. N. (2008): *Mechanical properties and decay resistance of hornbeam cement bonded particleboards*, Advances in Materials Science and Engineering, Hindawi Publishing Corporation.

- Patton, W. J. (1982): *Materiais de Construção*, Editora Pedagógica e Universitária, S. Paulo.
- Pfeil, W. e Pfeil, M. (2003): *Estruturas de Madeira*, Livros Técnicos e Científicos S.A.
- Pilkey, W. D. e Pilkey, D. F. (2008): *Peterson's Stress Concentration Factors*, John Wiley & Sons.
- Porteous, J. e Kermani, A. (2007): *Structural Timber Design to Eurocode 5*, Blackwell Science.
- Pugel, A. D., Price, E. W. e Hse, C. Y. (1990): *Composites from southern pine juvenile wood: part 2 - durability and dimensional stability*, Forest Products journal 40, 99. 57-61.
- Rowell, R. M. (2005): *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, Taylor & Francis.
- Sandermann, W. e Kohler, R. (1964): *Studies on mineral-bonded wood materials. IV - A short test of the aptitudes of woods for cement-bonded materials*, Holzforschung 18, pp. 53-59.
- Schwarz, H. G. e Simatupang, M. H. (1984): *Einfluss der chemischen Zusammensetzung von portlandzement auf die druckfestigkeit von versuchskörpern aus zement und fichtener buchenspäнем*, Holz als roh-und werkstoff 41, pp. 65-69.
- Semple, K. E., Cunningham, R. B. e Evans, P. D. (1999): *Cement hydration tests using wood flour may not predict the suitability of Acacia mangium and Eucalyptus pellita for the manufacture of wood wool cement boards*, Holzforschung 53(3), pp. 327-332.
- Simatupang, M. H. (1986): *Abbaureaktionen von glucose, cellobiose un holz unter dem einfluss von portlandzementmörtel*, Holzforschung 40, pp. 149-155.
- Soroushian, P. e Marikunte, S. (1992): *High performance cellulose fiber reinforced cement composites*, E&FN Spon, pp. 84-99.
- Stark, N. M., Cai, Z. e Carll, C. (2010): *Wood-Based Composite Materials-Panel Products- Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood-Nonwood Composite Materials*, Wood Handbook - Wood as an engineering material, Forest Products Laboratory, pp.11-1 - 11-28, Madison, Wisconsin.
- Valenzuela, W. A. (1989): *Contribution à la détermination de l'aptitude d'essences forestières pour la fabrication de panneaux de fibro-ciment*, Tese de Doutorado, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- Weatherwax, R. C. e Tarkow, H. (1964): *Effect of wood on setting of Portland cement*, Forest Products Journal 14, pp.567-570.
- Website: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/> - *Federal Highway Administration*, em Janeiro de 2012.
- Wei, Y. M., Zhou, Y. G. e Tomita, B. (2000): *Hydration behavior of wood cement-based composite I: evaluation of wood species effects on compatibility and strength with ordinary portland cement*, Journal of wood science, Volume 46, pp.296-302.

Capítulo 6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Winandy, J. E.(1994): *Wood Properties*, Arntzen, Ch. J. ed. Encyclopedia of Agriculture Science, Academic Press, Volume 4, pp.549-561.

Wolfe, R. W.e Gjinolli, A. (1996): *Cement-Bonded Wood Composites as an Engineering Material*, Forest Products Society, pp. 84-91.

Anexo A

Resultados dos ensaios para a determinação do coeficiente de dilatação térmica

Anexo A. Resultados dos ensaios para a determinação do coeficiente de dilatação térmica

LEITURA A							
Temperatura 0º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,026	20	199,957	0	0,069	20	1,72478E-05
2	200,055	20	199,984	0	0,071	20	1,77451E-05
3	200,03	20	199,948	0	0,082	20	2,04969E-05
4	200,013	20	199,938	0	0,075	20	1,87488E-05
5	199,453	20	199,376	0	0,077	20	1,93028E-05
6	200,021	20	199,942	0	0,079	20	1,97479E-05
7	200,078	20	200	0	0,078	20	1,94924E-05
8	200,021	20	199,942	0	0,079	20	1,97479E-05
9	199,879	20	199,807	0	0,072	20	1,80109E-05
10	199,937	20	199,861	0	0,076	20	1,9006E-05
Temperatura 10º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,026	20	200	10	0,026	10	1,300E-05
2	200,055	20	200,032	10	0,023	10	1,150E-05
3	200,03	20	199,994	10	0,036	10	1,800E-05
4	200,013	20	199,988	10	0,025	10	1,250E-05
5	199,453	20	199,427	10	0,026	10	1,304E-05
6	200,021	20	199,997	10	0,024	10	1,200E-05
7	200,078	20	200,046	10	0,032	10	1,599E-05
8	200,021	20	199,991	10	0,03	10	1,500E-05
9	199,879	20	199,848	10	0,031	10	1,551E-05
10	199,937	20	199,911	10	0,026	10	1,300E-05
Temperatura 30º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,026	20	200,045	30	0,019	10	9,49877E-06
2	200,055	20	200,077	30	0,022	10	1,0997E-05
3	200,03	20	200,06	30	0,03	10	1,49978E-05
4	200,013	20	200,04	30	0,027	10	1,34991E-05
5	199,453	20	199,475	30	0,022	10	1,10302E-05
6	200,021	20	200,051	30	0,03	10	1,49984E-05
7	200,078	20	200,101	30	0,023	10	1,14955E-05
8	200,021	20	200,043	30	0,022	10	1,09988E-05
9	199,879	20	199,909	30	0,03	10	1,50091E-05
10	199,937	20	199,961	30	0,024	10	1,20038E-05
Temperatura 40º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,026	20	200,065	40	0,039	20	9,749E-06
2	200,055	20	200,093	40	0,038	20	9,497E-06
3	200,03	20	200,091	40	0,061	20	1,525E-05
4	200,013	20	200,074	40	0,061	20	1,525E-05
5	199,453	20	199,504	40	0,051	20	1,278E-05
6	200,021	20	200,064	40	0,043	20	1,075E-05
7	200,078	20	200,12	40	0,042	20	1,050E-05
8	200,021	20	200,07	40	0,049	20	1,225E-05
9	199,879	20	199,94	40	0,061	20	1,526E-05
10	199,937	20	199,995	40	0,058	20	1,450E-05

Anexo A. Resultados dos ensaios para a determinação do coeficiente de dilatação térmica

LEITURA B							
Temperatura 0º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,034	20	199,964	0	0,07	20	1,75E-05
2	200,065	20	199,991	0	0,074	20	1,85E-05
3	200,062	20	199,982	0	0,08	20	2E-05
4	200,024	20	199,951	0	0,073	20	1,82E-05
5	200,022	20	199,951	0	0,071	20	1,77E-05
6	200,045	20	199,97	0	0,075	20	1,87E-05
7	200,108	20	200,031	0	0,077	20	1,92E-05
8	199,917	20	199,846	0	0,071	20	1,78E-05
9	200,113	20	200,037	0	0,076	20	1,9E-05
10	199,996	20	199,922	0	0,074	20	1,85E-05
Temperatura 10º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,034	20	200,008	10	0,026	10	1,300E-05
2	200,065	20	200,043	10	0,022	10	1,100E-05
3	200,062	20	200,03	10	0,032	10	1,600E-05
4	200,024	20	199,998	10	0,026	10	1,300E-05
5	200,022	20	199,995	10	0,027	10	1,350E-05
6	200,045	20	200,017	10	0,028	10	1,400E-05
7	200,108	20	200,079	10	0,029	10	1,449E-05
8	199,917	20	199,893	10	0,024	10	1,200E-05
9	200,113	20	200,087	10	0,026	10	1,299E-05
10	199,996	20	199,966	10	0,03	10	1,500E-05
Temperatura 30º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,034	20	200,052	30	0,018	10	9E-06
2	200,065	20	200,086	30	0,021	10	1,05E-05
3	200,062	20	200,09	30	0,028	10	1,4E-05
4	200,024	20	200,046	30	0,022	10	1,1E-05
5	200,022	20	200,042	30	0,02	10	1E-05
6	200,045	20	200,068	30	0,023	10	1,15E-05
7	200,108	20	200,123	30	0,015	10	7,5E-06
8	199,917	20	199,945	30	0,028	10	1,4E-05
9	200,113	20	200,139	30	0,026	10	1,3E-05
10	199,996	20	200,017	30	0,021	10	1,05E-05
Temperatura 40º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,034	20	200,072	40	0,038	20	9,498E-06
2	200,065	20	200,101	40	0,036	20	8,997E-06
3	200,062	20	200,122	40	0,06	20	1,500E-05
4	200,024	20	200,079	40	0,055	20	1,375E-05
5	200,022	20	200,066	40	0,044	20	1,100E-05
6	200,045	20	200,082	40	0,037	20	9,248E-06
7	200,108	20	200,164	40	0,056	20	1,399E-05
8	199,917	20	199,957	40	0,04	20	1,000E-05
9	200,113	20	200,15	40	0,037	20	9,245E-06
10	199,996	20	200,047	40	0,051	20	1,275E-05

Anexo A. Resultados dos ensaios para a determinação do coeficiente de dilatação térmica

LEITURA C							
Temperatura 0º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,027	20	199,958	0	0,069	20	1,72E-05
2	200,052	20	199,981	0	0,071	20	1,77E-05
3	200,01	20	199,932	0	0,078	20	1,95E-05
4	200,002	20	199,93	0	0,072	20	1,8E-05
5	200,001	20	199,934	0	0,067	20	1,67E-05
6	200,046	20	199,977	0	0,069	20	1,72E-05
7	200,058	20	199,985	0	0,073	20	1,82E-05
8	200,016	20	199,942	0	0,074	20	1,85E-05
9	199,89	20	199,821	0	0,069	20	1,73E-05
10	200,091	20	200,021	0	0,07	20	1,75E-05
Temperatura 10º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,027	20	200,007	10	0,02	10	1E-05
2	200,052	20	200,031	10	0,021	10	1,05E-05
3	200,01	20	199,979	10	0,031	10	1,55E-05
4	200,002	20	199,974	10	0,028	10	1,4E-05
5	200,001	20	199,979	10	0,022	10	1,1E-05
6	200,046	20	200,022	10	0,024	10	1,2E-05
7	200,058	20	200,033	10	0,025	10	1,25E-05
8	200,016	20	199,993	10	0,023	10	1,15E-05
9	199,89	20	199,87	10	0,02	10	1E-05
10	200,091	20	200,07	10	0,021	10	1,05E-05
Temperatura 30º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,027	20	200,046	30	0,019	10	9,5E-06
2	200,052	20	200,071	30	0,019	10	9,5E-06
3	200,01	20	200,035	30	0,025	10	1,25E-05
4	200,002	20	200,03	30	0,028	10	1,4E-05
5	200,001	20	200,022	30	0,021	10	1,05E-05
6	200,046	20	200,071	30	0,025	10	1,25E-05
7	200,058	20	200,079	30	0,021	10	1,05E-05
8	200,016	20	200,036	30	0,02	10	1E-05
9	199,89	20	199,914	30	0,024	10	1,2E-05
10	200,091	20	200,114	30	0,023	10	1,15E-05
Temperatura 40º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,027	20	200,062	40	0,035	20	8,749E-06
2	200,052	20	200,087	40	0,035	20	8,748E-06
3	200,01	20	200,068	40	0,058	20	1,450E-05
4	200,002	20	200,06	40	0,058	20	1,450E-05
5	200,001	20	200,044	40	0,043	20	1,075E-05
6	200,046	20	200,084	40	0,038	20	9,498E-06
7	200,058	20	200,106	40	0,048	20	1,200E-05
8	200,016	20	200,056	40	0,04	20	9,999E-06
9	199,89	20	199,945	40	0,055	20	1,376E-05
10	200,091	20	200,135	40	0,044	20	1,099E-05

Anexo A. Resultados dos ensaios para a determinação do coeficiente de dilatação térmica

LEITURA D							
Temperatura 0º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,054	20	199,982	0	0,072	20	1,8E-05
2	199,682	20	199,618	0	0,064	20	1,6E-05
3	200,033	20	199,957	0	0,076	20	1,9E-05
4	200,029	20	199,966	0	0,063	20	1,57E-05
5	200,017	20	199,952	0	0,065	20	1,62E-05
6	200,049	20	199,982	0	0,067	20	1,67E-05
7	200,078	20	200,015	0	0,063	20	1,57E-05
8	200,029	20	199,963	0	0,066	20	1,65E-05
9	200,089	20	200,022	0	0,067	20	1,67E-05
10	200,108	20	200,044	0	0,064	20	1,6E-05
Temperatura 10º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,054	20	200,037	10	0,017	10	8,5E-06
2	199,682	20	199,662	10	0,02	10	1E-05
3	200,033	20	200,002	10	0,031	10	1,55E-05
4	200,029	20	199,996	10	0,033	10	1,65E-05
5	200,017	20	199,992	10	0,025	10	1,25E-05
6	200,049	20	200,022	10	0,027	10	1,35E-05
7	200,078	20	200,057	10	0,021	10	1,05E-05
8	200,029	20	199,995	10	0,034	10	1,7E-05
9	200,089	20	200,063	10	0,026	10	1,3E-05
10	200,108	20	200,079	10	0,029	10	1,45E-05
Temperatura 30º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,054	20	200,071	30	0,017	10	8,5E-06
2	199,682	20	199,702	30	0,02	10	1E-05
3	200,033	20	200,057	30	0,024	10	1,2E-05
4	200,029	20	200,052	30	0,023	10	1,15E-05
5	200,017	20	200,037	30	0,02	10	1E-05
6	200,049	20	200,072	30	0,023	10	1,15E-05
7	200,078	20	200,099	30	0,021	10	1,05E-05
8	200,029	20	200,055	30	0,026	10	1,3E-05
9	200,089	20	200,109	30	0,02	10	1E-05
10	200,108	20	200,13	30	0,022	10	1,1E-05
Temperatura 40º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,054	20	200,088	40	0,034	20	8,498E-06
2	199,682	20	199,717	40	0,035	20	8,764E-06
3	200,033	20	200,087	40	0,054	20	1,350E-05
4	200,029	20	200,086	40	0,057	20	1,425E-05
5	200,017	20	200,064	40	0,047	20	1,175E-05
6	200,049	20	200,087	40	0,038	20	9,498E-06
7	200,078	20	200,118	40	0,04	20	9,996E-06
8	200,029	20	200,076	40	0,047	20	1,175E-05
9	200,089	20	200,136	40	0,047	20	1,174E-05
10	200,108	20	200,15	40	0,042	20	1,05E-05

Anexo A. Resultados dos ensaios para a determinação do coeficiente de dilatação térmica

LEITURA E							
Temperatura 0º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,033	20	199,971	0	0,062	20	1,55E-05
2	200,051	20	199,986	0	0,065	20	1,62E-05
3	200,028	20	199,953	0	0,075	20	1,87E-05
4	200,017	20	199,954	0	0,063	20	1,57E-05
5	200,016	20	199,95	0	0,066	20	1,65E-05
6	200,099	20	200,029	0	0,07	20	1,75E-05
7	200,102	20	200,031	0	0,071	20	1,77E-05
8	200,098	20	200,035	0	0,063	20	1,57E-05
9	199,951	20	199,886	0	0,065	20	1,63E-05
10	200,103	20	200,038	0	0,065	20	1,62E-05
Temperatura 10º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,033	20	200,016	10	0,017	10	8,5E-06
2	200,051	20	200,036	10	0,015	10	7,5E-06
3	200,028	20	199,998	10	0,03	10	1,5E-05
4	200,017	20	199,992	10	0,025	10	1,25E-05
5	200,016	20	199,993	10	0,023	10	1,15E-05
6	200,099	20	200,08	10	0,019	10	9,5E-06
7	200,102	20	200,077	10	0,025	10	1,25E-05
8	200,098	20	200,075	10	0,023	10	1,15E-05
9	199,951	20	199,931	10	0,02	10	1E-05
10	200,103	20	200,081	10	0,022	10	1,1E-05
Temperatura 30º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,033	20	200,052	30	0,019	10	9,5E-06
2	200,051	20	200,069	30	0,018	10	9E-06
3	200,028	20	200,051	30	0,023	10	1,15E-05
4	200,017	20	200,04	30	0,023	10	1,15E-05
5	200,016	20	200,035	30	0,019	10	9,5E-06
6	200,099	20	200,121	30	0,022	10	1,1E-05
7	200,102	20	200,125	30	0,023	10	1,15E-05
8	200,098	20	200,117	30	0,019	10	9,5E-06
9	199,951	20	199,972	30	0,021	10	1,05E-05
10	200,103	20	200,126	30	0,023	10	1,15E-05
Temperatura 40º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,033	20	200,069	40	0,036	20	8,999E-06
2	200,051	20	200,09	40	0,039	20	9,748E-06
3	200,028	20	200,076	40	0,048	20	1,200E-05
4	200,017	20	200,07	40	0,053	20	1,325E-05
5	200,016	20	200,056	40	0,04	20	9,999E-06
6	200,099	20	200,136	40	0,037	20	9,245E-06
7	200,102	20	200,152	40	0,05	20	1,249E-05
8	200,098	20	200,141	40	0,043	20	1,074E-05
9	199,951	20	199,99	40	0,039	20	9,752E-06
10	200,103	20	200,149	40	0,046	20	1,15E-05

Anexo A. Resultados dos ensaios para a determinação do coeficiente de dilatação térmica

LEITURA F							
Temperatura 0º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,025	20	199,965	0	0,06	20	1,5E-05
2	200,056	20	199,99	0	0,066	20	1,65E-05
3	200,005	20	199,937	0	0,068	20	1,7E-05
4	200,021	20	199,957	0	0,064	20	1,6E-05
5	200,019	20	199,956	0	0,063	20	1,57E-05
6	200,105	20	200,041	0	0,064	20	1,6E-05
7	200,024	20	199,96	0	0,064	20	1,6E-05
8	200,044	20	199,982	0	0,062	20	1,55E-05
9	200,11	20	200,043	0	0,067	20	1,67E-05
10	200,008	20	199,943	0	0,065	20	1,62E-05
Temperatura 10º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,025	20	200,011	10	0,014	10	7E-06
2	200,056	20	200,041	10	0,015	10	7,5E-06
3	200,005	20	199,979	10	0,026	10	1,3E-05
4	200,021	20	199,999	10	0,022	10	1,1E-05
5	200,019	20	199,996	10	0,023	10	1,15E-05
6	200,105	20	200,084	10	0,021	10	1,05E-05
7	200,024	20	200,009	10	0,015	10	7,5E-06
8	200,044	20	200,026	10	0,018	10	9E-06
9	200,11	20	200,093	10	0,017	10	8,5E-06
10	200,008	20	199,99	10	0,018	10	9E-06
Temperatura 30º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,025	20	200,041	30	0,016	10	8E-06
2	200,056	20	200,073	30	0,017	10	8,5E-06
3	200,005	20	200,033	30	0,028	10	1,4E-05
4	200,021	20	200,041	30	0,02	10	1E-05
5	200,019	20	200,04	30	0,021	10	1,05E-05
6	200,105	20	200,128	30	0,023	10	1,15E-05
7	200,024	20	200,045	30	0,021	10	1,05E-05
8	200,044	20	200,063	30	0,019	10	9,5E-06
9	200,11	20	200,13	30	0,02	10	9,99E-06
10	200,008	20	200,025	30	0,017	10	8,5E-06
Temperatura 40º							
Provete	L0	T0	L	T	L-L0	T-T0	α
1	200,025	20	200,058	40	0,033	20	8,249E-06
2	200,056	20	200,095	40	0,039	20	9,747E-06
3	200,005	20	200,059	40	0,054	20	1,350E-05
4	200,021	20	200,071	40	0,05	20	1,250E-05
5	200,019	20	200,058	40	0,039	20	9,749E-06
6	200,105	20	200,148	40	0,043	20	1,074E-05
7	200,024	20	200,059	40	0,035	20	8,749E-06
8	200,044	20	200,084	40	0,04	20	9,998E-06
9	200,11	20	200,159	40	0,049	20	1,224E-05
10	200,008	20	200,058	40	0,05	20	1,250E-05