

**Comportamento estrutural de pilares construídos com CBPB**

Análise experimental do comportamento de pilares construídos com compósito de cimento Portland e partículas de madeira.



**Gonçalo Alexandre Ruas Faria**

(Licenciado em Ciências de Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Civil – Ramo de Estruturas  
pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa,

Orientador: Professor Doutor Válder José da Guia Lúcio  
Co-orientador: Professor Doutor Carlos Chastre Rodrigues

**Fevereiro de 2010**



## **AGRADECIMENTOS**

Ao orientador e ao co-orientador Professor Doutor Válder José da Guia Lúcio e Professor Doutor Carlos Chastre Rodrigues, respectivamente, que me possibilitaram dar o arranque a este novo projecto investigação em parceria com a VIROC.

À VIROC pelo fornecimento de todo o material, pois sem este não seria possível realizar este trabalho, nomeadamente ao Engenheiro Pinheiro Soares e ao Arquitecto Pedro Melo, e pela visita guiada às suas instalações, em especial, à Técnica de Laboratório Noémia Santos.

A todos aqueles que directamente ou indirectamente contribuíram para não só terminar a dissertação mas também para, na longa caminhada, concluir as várias etapas do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, em especial aos meus pais e ao meu irmão.



## RESUMO

A presente dissertação integra-se num projecto de investigação para a utilização de CBPB (Cement-Bonded ParticleBoards) como material estrutural e tem como objectivo explorar a possibilidade de utilização de CBPB em elementos estruturais predominantemente sujeitos a forças de compressão – pilares. Serão abordados aspectos relacionados com a resistência à compressão do CBPB, o comportamento de alguns tipos de ligações e a pormenorização de pilares.

Em Portugal, as placas de partículas de madeira coladas com cimento (CBPB) são comercializadas pela VIROC. Actualmente, o CBPB é utilizado como material de revestimento.

As características físicas e mecânicas deste compósito dependem do tipo de madeira, de cimento e de cura, do índice de inibição e do traço madeira:cimento. O CBPB é um material resistente a ataques biológicos e, em certas circunstâncias, é dimensionalmente instável.

Neste estudo avaliou-se o comportamento à compressão do CBPB, constituído 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, submetido à compressão e ao esmagamento.

Em relação à compressão, o CBPB apresentou uma resistência média e característica de 24 MPa e 18 MPa, respectivamente. Já a resistência ao esmagamento em ligações aparafusadas ronda os 50 a 60 MPa.

Palavra-chave: CBPB; cimento-madeira; compósito; ligações.



## ABSTRACT

This work is part of a research project for the use of CBPB (Cement-Bonded ParticleBoards) as structural material and aims to explore the possibility to use CBPB as structural elements, predominantly subjected to compressive forces – columns. In this dissertation issues related to the compressive strength of CBPB, the behaviour of some types of connections and proposals for the detailing of columns, are studied.

The cement- bonded particleboards (CBPB) are marketed in Portugal by VIROC. At present, the CBPB is used as a finishing material.

The physical and mechanical characteristics of composites depend on the type of wood, cement and curing, the inhibition index and the wood: cement ratio. The CBPB is a material resistant to biological attack and, in some conditions, may be dimensionally unstable.

This study aims to evaluate the compressive behaviour of CBPB consisting of *Portland* cement type II (CEM II / A-L 42,5R), *Pinus pinaster* and *Pinus pinea* wood, sodium silicate and aluminium sulphate.

In relation to compression, the CBPB showed a mean and characteristic resistance of 24 MPa and 18 MPa, respectively. The crushing average strength in bolted connections is around 50 to 60 MPa.

Keywords: CBPB; Cement-Bonded ParticleBoards; wood-cement; composites; connections.



## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	III
RESUMO .....	V
ABSTRACT .....	VII
ÍNDICE .....	IX
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Processo de Fabrico .....	2
1.2. Objectivos .....	7
1.3. Organização da Dissertação .....	7
2. OS COMPÓSITOS DE CIMENTO E MADEIRA .....	8
2.1. Compatibilidade entre os diferentes materiais .....	8
2.2. Traço da mistura .....	11
2.3. Características Mecânicas do CBPB .....	13
2.4. Outras características dos compósitos de cimento e madeira .....	17
2.5. Estabilidade dimensional .....	18
2.6. Pilares .....	19
2.7. Ligações .....	21
3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS .....	23
3.1. Provetes para ensaios à compressão uniaxial .....	23
3.2. Provetes para ensaios ao corte em ligações coladas .....	28
3.3. Provetes para o ensaio ao esmagamento em ligações aparafusadas .....	29
4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS .....	31
4.1. Ensaio à compressão uniaxial dos provetes do tipo <i>P</i> .....	31
4.2. Ensaio à compressão uniaxial dos provetes do tipo <i>C</i> .....	32
4.3. Ensaio ao corte de ligações coladas .....	43
4.4. Ensaio ao esmagamento em ligações aparafusadas .....	44
5. ANÁLISE DE RESULTADOS .....	48

5.1. Ensaio à compressão uniaxial .....	48
5.2. Ensaio ao corte de ligações coladas .....	58
5.3. Ensaio de esmagamento em ligações aparafusadas.....	59
6. CONCLUSÕES .....	67
7. REFERÊNCIAS.....	70
ANEXOS .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Edifício do centro de coordenação e controlo de tráfego do porto de Lisboa com a fachada revestida com CBPB [ 2 ].	1
Figura 2 – Composição do CBPB (percentagem dos constituintes em peso).	2
Figura 3 – Fases do processo de produção.	3
Figura 4 – Depósito de madeira a céu aberto na fábrica.	4
Figura 5 – Descasque dos toros de madeira.	4
Figura 6 – Aparas obtidas após passagem pela destroçadora.	5
Figura 7 – Aparas obtidas após serem afinadas.	5
Figura 8 – Prensagem do grampo com várias placas de CBPB.	6
Figura 9 – Placas de CBPB em maturação.	6
Figura 10 – Evolução das tensões de rotura do betão tratado a diferentes temperaturas [ 11 ].	10
Figura 11 – Influência do teor de massa, do tipo de fibras (kraft e TMP) e do método de cura (autoclave e ao ar) na resistência à flexão, adaptado de [ 18 ].	12
Figura 12 – Diagrama compressão - deformação. Efeito do traço madeira:cimento das placas de partículas de madeira com cimento na rigidez e na resistência de tijolos compósitos [ 20 ].	12
Figura 13 – Influência do tipo de cimento na variação da resistência do betão com a idade [ 23 ]. I – Portland normal; II – Portland modificado; III – Portland de elevada resistência inicial; IV – Portland de baixo calor de hidratação; V – Portland resistente aos sulfatos	13
Figura 14 – Gráfico Força – deformação, para compósitos de madeira colada com cimento (CWBC) e cimento à flexão, adaptado de [ 5 ].	14
Figura 15 – Efeito da época de corte/uso da madeira na resistência média à compressão axial de compósito à base de cimento Portland. Legenda: VD (corte/uso Verão/Dezembro: corpos-de-prova 01 a 36); VJ (corte/uso Verão Julho: corpos-de-prova 37 a 42); IJ (corte/uso Inverno/Julho: corpos-de-prova 73 a 108) [ 7 ].	15
Figura 16 – Efeito do tipo de cimento (CP II e CP V) na resistência média à compressão axial de compósitos à base de cimento e Portland. Legenda: VD (corte/uso Verão/Dezembro: corpos-de-prova 01 a 18 – CP II; 19-36 – CP V); VJ (corte/uso Verão Julho: corpos-de-prova 37 a 54 – CP II; 55 a 72 – CP V); IJ (corte/uso Inverno/Julho: corpos-de-prova 73 a 90 – CP II; 91 a 108 – CP V) [ 7 ].	15
Figura 17 – Variação da tensão de rotura à tracção por flexão com a densidade de diferentes amostras de CBWC, adaptado de [ 6 ].	16
Figura 18 – Variação do módulo de elasticidade com a densidade de diferentes amostras de CBWC, adaptado de [ 6 ].	17
Figura 19 – Pilares espaçados. Adaptado de [ 3 ].	19
Figura 20 – Pilares treliçados. a) – treliça em V; b) treliça em N. Adaptado de [ 3 ].	19
Figura 21 – Pilar porticado.	20
Figura 22 – Modos de rotura. (1) – Corte simples; (2) – Corte duplo. Adaptado de [ 3 ].	21
Figura 23 – Parafuso roscado recomendado para aplicação em CBPB [ 28 ].	21
Figura 24 – Parafuso de porca M12 e M16 da classe 8.8.	22
Figura 25 – Ensaio à compressão.	23
Figura 26 – Provetes do tipo P.	24
Figura 27 – Provetes do tipo C.	24

Figura 28 – Provete do tipo <i>P1</i> solicitado na face rugosa. ....	25
Figura 29 – Solicitação na face lisa. ....	25
Figura 30 – Solicitação na face rugosa. ....	25
Figura 31 – Provete do tipo <i>P2</i> . ....	26
Figura 32 – Os diversos tipos de secções dos provetes do tipo <i>C</i> , em mm. ....	26
Figura 33 – Panorâmica geral dos provetes do tipo <i>C1</i> , <i>C3</i> , <i>C4</i> e <i>C5</i> . ....	27
Figura 34 – Provete do tipo <i>A</i> , em mm. ....	28
Figura 35 – Provete do tipo <i>A</i> . ....	28
Figura 36 – Provete do tipo <i>E</i> . ....	29
Figura 37 – Esquema de ensaio dos provetes ao esmagamento em ligações aparafusadas. ....	30
Figura 38 – Diagrama tensão - extensão, à compressão, dos provetes do tipo <i>P1</i> solicitados na face lisa. ....	31
Figura 39 – Diagrama tensão - extensão, à compressão, dos provetes do tipo <i>P1</i> e <i>P2</i> solicitados na face rugosa. ....	32
Figura 40 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo <i>C1-A</i> (h=100 mm) e <i>C1-B</i> (h=200 mm). ....	33
Figura 41 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo <i>C1-C</i> (h=300 mm) e <i>C1-D</i> (h=400 mm). ....	33
Figura 42 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo <i>C1-E</i> (h=500 mm) e <i>C1-F</i> (h=600 mm). ....	34
Figura 43 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo <i>C1</i> . ....	34
Figura 44 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo <i>C2-C</i> (h=300 mm). ....	35
Figura 45 - Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo <i>C1-C</i> e <i>C2-C</i> . ....	35
Figura 46 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo <i>C3-A</i> (h=100 mm). ....	36
Figura 47 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo <i>C3-B</i> (h=200 mm) e <i>C3-C</i> (h=300 mm). ....	37
Figura 48 – Diagrama tensão – extensão dos provetes do tipo <i>C4-A</i> (h=100 mm). ....	37
Figura 49 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo <i>C4-B</i> (h=200 mm) e <i>C4-C</i> (h=300 mm). ....	38
Figura 50 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo <i>C4-D</i> (h=400 mm) e <i>C4-F</i> (h=500 mm). ....	38
Figura 51 – Diagrama tensão - extensão, dos provetes do tipo <i>C5-A</i> (h=100 mm). ....	39
Figura 52 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo <i>C5-B</i> (h=200 mm) e <i>C5-C</i> (h=300 mm). ....	39
Figura 53 – Ângulos de rotura dos provetes <i>C1-A</i> . ....	40
Figura 54 – Ângulos de rotura dos provetes <i>C1-B</i> . ....	40
Figura 55 – Ângulos de rotura dos provetes <i>C1-C</i> . ....	41
Figura 56 - Ângulos de rotura dos provetes <i>C1-E</i> . ....	41
Figura 57 – Ângulos de rotura dos provetes <i>C1-D</i> . ....	41
Figura 58 – Ângulos de rotura dos provetes <i>C1-F</i> . ....	41
Figura 59 – Diagrama força - deslocamento dos ensaios ao corte dos provetes do tipo <i>A</i> . ....	43
Figura 60 – Modo de rotura do provete <i>A</i> . ....	43
Figura 61 – Diagrama força - deslocamento dos ensaios ao esmagamento ( <i>E24-16</i> e <i>E40-16</i> ) com uma distância ao centro do parafuso ( <i>M16</i> ) ao bordo carregado de 24 mm e 40 mm. ....	44
Figura 62 – Modo de rotura do provete <i>E24-16-2</i> . ....	44
Figura 63 – Diagrama força - deslocamento do ensaio ao esmagamento ( <i>E56-16</i> e <i>E72-16</i> ) com uma distância ao centro do parafuso ( <i>M16</i> ) ao bordo carregado de 56 mm e 72 mm. ....	45

Figura 64 – Modo de rotura do provete <i>E56-16-3</i> .....	45
Figura 65 – Diagrama força - deslocamento dos ensaios ao esmagamento ( <i>E40-12</i> ) com uma distância ao centro do parafuso ( <i>M12</i> ) ao bordo carregado de 40 mm.....	46
Figura 66 – Modo de rotura do provete <i>E40-12-1</i> .....	46
Figura 67 – Diagrama força - deslocamento dos ensaios ao esmagamento ( <i>E56-12</i> e <i>E72-12</i> ) com uma distância ao centro do parafuso ( <i>M12</i> ) ao bordo carregado de 56 mm e 72 mm.....	47
Figura 68 – Modo de rotura do provete <i>E72-12-1</i> .....	47
Figura 69 – Influência da altura dos provetes na tensão máxima resistente. ....	49
Figura 70 – Influência da esbelteza dos provetes na tensão máxima resistente .....	49
Figura 71 – Influência da altura dos provetes no módulo de elasticidade.....	50
Figura 72 – Influência da esbelteza no módulo de elasticidade.....	50
Figura 73 – Comparação entre provetes do tipo P1 e P2 com solicitação na mesma face. ....	52
Figura 74 – Influência da forma dos provetes na tensão máxima através da esbelteza. ....	53
Figura 75 – Efeito das alturas dos provetes no módulo de elasticidade em função da esbelteza. ....	53
Figura 76 – Influência dos tipos de provetes na tensão máxima em função da esbelteza. ....	54
Figura 77 – Influência dos tipos de provetes no módulo de elasticidade em função da esbelteza. ....	55
Figura 78 – Provede <i>C3-A</i> (h=100 mm) ensaiado à compressão .....	55
Figura 79 – Provede <i>C1-D</i> (h=400 mm) ensaiado à compressão. ....	55
Figura 80 – Provede <i>C1-F</i> (h=600 mm) ensaiado à compressão. ....	56
Figura 81 – Provede <i>C2-C</i> após ensaio à compressão.....	56
Figura 82 – Distribuição Normal da resistência à compressão.....	57
Figura 83 – Distribuição Normal do módulo de elasticidade à compressão. ....	58
Figura 84 – Diagrama das tensões segundo z. Modelo numérico do ensaio ao esmagamento <i>E24-16</i> (tensões em kN/m <sup>2</sup> ). ....	59
Figura 85 – Diagrama das tensões segundo z. Modelo numérico do ensaio ao esmagamento <i>E72-16</i> (tensões em kN/m <sup>2</sup> ). ....	60
Figura 86 – Diagrama das tensões segundo z. Modelo numérico do ensaio ao esmagamento <i>E56-16</i> (tensões em kN/m <sup>2</sup> ). ....	61
Figura 87 – Diagrama das tensões segundo z. Modelo numérico do ensaio ao esmagamento <i>E40-16</i> (tensões em kN/m <sup>2</sup> ). ....	61
Figura 88 – Diagrama das tensões principais. Modelo numérico do ensaio ao esmagamento <i>E24-16</i> .....	62
Figura 89 – Diagrama das tensões principais. Modelo numérico do ensaio ao esmagamento <i>E72-16</i> .....	62
Figura 90 – Modelos de escoras e tirante em torno de um furo com uma distância ao bordo de 24 mm e de 72 mm. ....	63
Figura 91 – Influência da distância ao bordo carregado ( <i>D</i> ) na resistência ao esmagamento.....	65
Figura 92 – Diagrama tensão de esmagamento – diâmetro do parafuso das três soluções obtidas.....	66



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da compatibilidade entre o cimento e a madeira através do índice de inibição [ 8 ] e [ 10 ].....	9
Tabela 2 – Efeito de diferentes tratamentos das partículas de madeira no índice de inibição.....	11
Tabela 3 – Propriedades mecânicas e físicas de placas com partículas de <i>Carpinus betulus</i> coladas com cimento, adaptado de [ 9 ].....	14
Tabela 4 – Vários exemplos de ensaios à flexão [ 5 ], [ 9 ] e [ 10 ].....	16
Tabela 5 – Perda de peso ( <i>WL</i> ) das placas de partículas de <i>Carpinus betulus</i> coladas com cimento, adaptado de [ 9 ].....	17
Tabela 6 – A eficiência do número de demãos de revestimento no comportamento do CBPB (máxima variação média em %), adaptado de [ 27 ].....	18
Tabela 7 – Dimensões dos provetes para os ensaios à compressão.....	24
Tabela 8 – Distâncias <i>D</i> entre o centro do parafuso e o bordo carregado.....	29
Tabela 9 – Valores médios da tensão de rotura, respectiva extensão e do módulo de elasticidade, à compressão.....	40
Tabela 10 – Ângulos de rotura, com a horizontal, em graus.....	42
Tabela 11 – Valores das forças e das tensões máximas dos ensaios ao corte.....	43
Tabela 12 – Resultados dos ensaios à compressão dos provetes do tipo <i>P1</i> .....	48
Tabela 13 – Resultados dos ensaios dos provetes do tipo <i>P2</i> (face rugosa).....	51
Tabela 14 - Valores médios da esbelteza, da tensão de rotura e do módulo de elasticidade.....	52
Tabela 15 – Valor característico e médio da tensão máxima à compressão.....	57
Tabela 16 – Valor característico e médio do módulo de elasticidade à compressão.....	57
Tabela 17 – Resultados dos ensaios ao esmagamento.....	64
Tabela 18 – Valores dos factores <i>C</i> e <i>a</i> da expressão (3).....	65



## ÍNDICE DE SÍMBOLOS

### Latim Maiúsculas

$C, a, b$	Constantes da fórmula empírica da resistência ao esmagamento
$D$	Distância do bordo carregado ao centro do parafuso
$E$	Módulo de elasticidade obtido pelo ensaio à compressão
$E_m$	Módulo de elasticidade médio obtido pelo ensaio à compressão
$E_k$	Módulo de elasticidade característico à compressão
$F_{máx}$	Força máxima de compressão ou de corte
$H_r$	Humidade relativa
$I$	Índice de inibição
$TS$	Variação dimensional
$WL$	Perda de peso
$T_{CIM}$	Temperatura máxima da mistura cimento/água (°C);
$T_M$	Temperatura máxima da mistura madeira/cimento/água (°C);
$H_{CIM}$	Tempo para atingir a temperatura máxima de hidratação do cimento na mistura cimento/água (h);
$H_M$	Tempo para atingir a temperatura máxima da mistura de hidratação do cimento na mistura madeira/cimento/água (h);
$S_{CIM}$	Máximo incremento de temperatura da curva na mistura cimento/água (°C/h);
$S_M$	Máximo incremento de temperatura da curva na mistura madeira/cimento/água (°C/h).

### Latim Minúsculas

$f_h$	Tensão de esmagamento localizado
$f_{h, med}$	Valor médio da tensão de esmagamento localizado
$f_k$	Tensão característica de rotura
$f_m$	Tensão média de rotura
$f_{máx}$	Tensão de rotura à compressão
$h$	Altura do provete, em mm
$l$	Largura do provete, em mm

$t$  Espessura da placa de CBPB, em mm

**Grego**

$\varepsilon_{f_{m\acute{a}x}}$  Extensão correspondente ao valor  $f_{m\acute{a}x}$ .

$\phi$  Diâmetro do parafuso, em mm

$\lambda$  Esbelteza

$\tau_{total}$  Tensão de corte determinada com base na área teórica de colagem e na força  $F_{m\acute{a}x}$

$\angle$  Ângulo de rotura com a horizontal (perpendicular ao plano do painel de CBPB)

# 1. INTRODUÇÃO

Nos tempos que correm, a engenharia para além de desenvolver os correntes materiais utilizados nas construções também procura novas soluções tanto a nível técnico como material. Deste modo, está em desenvolvimento um projecto de investigação para a utilização de CBPB (Cement-Bonded ParticleBoards) como material estrutural.

A presente dissertação integra-se neste projecto e tem como objectivo explorar a possibilidade de utilização de CBPB em elementos estruturais predominantemente sujeitos a forças de compressão – pilares. Serão abordados aspectos relacionados com a resistência à compressão do CBPB, comportamento de alguns tipos de ligações e a pormenorização de pilares

O CBPB (Cement-Bonded ParticleBoards) é uma “placa de materiais fabricados sob pressão, com base em partículas de madeira, ou de outras partículas vegetais, misturadas com cimento hidráulico e possivelmente contendo aditivos” [ 1 ]. Correntemente, este material compósito de madeira e cimento é utilizado em revestimentos (Figura 1), sendo produzido em placas.



**Figura 1 – Edifício do centro de coordenação e controlo de tráfego do porto de Lisboa com a fachada revestida com CBPB [ 2 ].**

A junção da madeira ao cimento tem por objectivo a obtenção de um material cujo comportamento em termos de resistência à compressão e de durabilidade é dado pelo cimento, sendo a flexibilidade e a resistência à tracção dadas pelas partículas de madeira.

Segundo o EC5 [ 3 ], as características mecânicas de elementos constituídos por madeira são afectados por:

- diferentes propriedades dos materiais (por exemplo resistência e rigidez);
- fluência;
- diferentes condições climáticas (temperatura, variação da humidade); e
- diferentes situações de concepção (fases de construção, alterar as condições de apoio).

O material CBPB estudado é referente a placas comercializadas em Portugal pela VIROC. Este é constituído basicamente por partículas de madeira (20.7%) e cimento *Portland* (66.7%), o que dá um traço madeira: cimento aproximadamente de 1:3 [ 4 ]. O tipo de madeira utilizado é o *Pinus pinaster* ou o *Pinus pinea* e o cimento *Portland* é do tipo II (CEM II / A-L 42,5 R).

As partículas de madeira são aplicadas em forma de aparas finas e grossas, em que as primeiras garantem a consistência e, as restantes, a resistência do CBPB. Para acelerar a presa e desfibrar as aparas é utilizado o silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) e o sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), respectivamente.

Para além dos materiais constituintes referidos anteriormente, o CBPB contém água (10,7%), para hidratar os componentes do cimento e os compostos químicos constituem 1,9% [ 4 ], ver Figura 2.

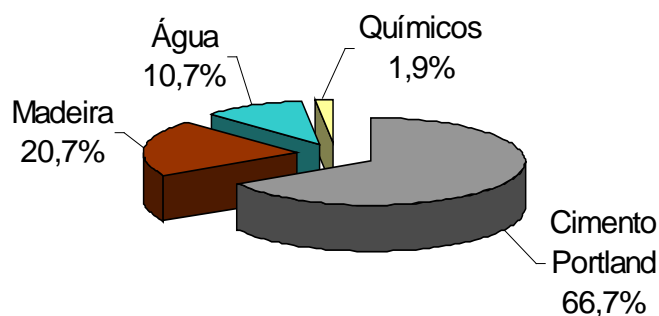


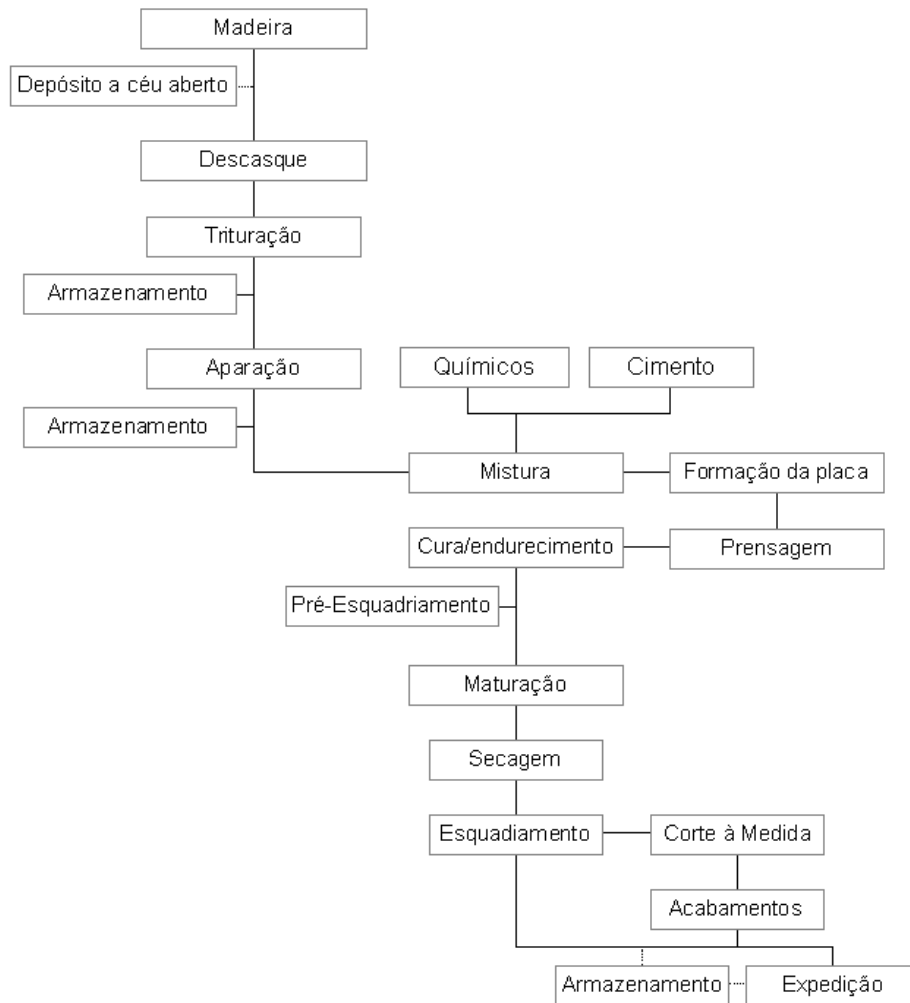
Figura 2 – Composição do CBPB (percentagem dos constituintes em peso).

Em relação a outras propriedades, não mecânicas, pode-se referir que o CBPB é um bom isolante acústico e incombustível, pois o cimento protege a madeira que está no seu interior. Em termos de saúde é de salientar que o CBPB não contém compostos cancerígenos, nomeadamente a sílica, amianto e formaldeído [ 4 ].

As placas produzidas poderão ter uma dimensão máxima de 3,0 m por 1,235 m. Relativamente à espessura, as placas podem apresentar várias espessuras (8, 10 12 16, 19, 22, 25, 28, 32, 36 e 40 mm). Para além da cor cinzenta do cimento apresentada pelas placas de CBPB, estas podem ter uma tonalidade preta ou branca consoante a cor do pigmento aplicado.

### 1.1. Processo de Fabrico

Como referido anteriormente, o CBPB é constituído por madeira, cimento, água e químicos, nomeadamente o silicato de sódio e o sulfato de alumínio. Para se obter um material CBPB de boa qualidade é necessário passar pelas várias etapas indicadas no organograma da Figura 3.



**Figura 3 – Fases do processo de produção.**

A madeira utilizada para o fabrico de CBPB é proveniente do abate de árvores, ficando exposta às condições ambientais (Figura 4). O tempo de exposição é variável consoante a necessidade de fabrico, podendo nem chegar a ficar no depósito da fábrica (Figura 4), entrando directamente para o descasque (Figura 5).

Como se poderá ver mais à frente, não é recomendada a utilização de madeira que contenha taninos. No caso dos *Pinus pinaster* e dos *Pinus pinea*, a presença de taninos é mais acentuada na casca destes. Assim, a madeira é descascada para que não contenha este extractivo. Os extractivos são componentes não estruturais da parede celular da madeira (compostos químicos).



**Figura 4 – Depósito de madeira a céu aberto na fábrica.**



**Figura 5 – Descasque dos toros de madeira.**

Após o descasque dos toros de madeira, estes são triturados através de uma destrojadora para se obter as aparas e, posteriormente serem armazenadas (Figura 6). Por sua vez, estas serão afinadas por duas afinadoras para se obterem diferentes espessuras (finas e grossas), ficando armazenadas em silos (Figura 7). O controlo da espessura e da humidade das aparas é feito após a passagem pela destrojadora e pela afinadora. Um dos requisitos das aparas é a de que estas têm de passar no peneiro de malha de 4 mm.



**Figura 6 – Aparas obtidas após passagem pela destroçadora.**



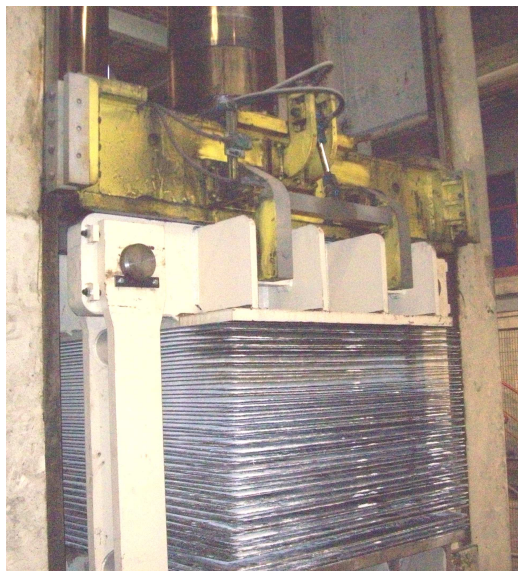
**Figura 7 – Aparas obtidas após serem afinadas.**

A mistura dos vários compostos do CBPB é realizada pela seguinte ordem:

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

Posteriormente à mistura dos vários compostos do CBPB, o material é depositado por camadas sobre uma chapa de aço em 3 fases para dispor as aparas finas nas partes exteriores e as aparas grossas no interior. As placas assim produzidas são sobrepostas, separadas entre si pelas chapas de aço, para futura prensagem (Figura 8). A prensagem é realizada numa prensa que mantém um conjunto de placas de CBPB comprimido a uma pressão de 25 a 30 MPa até ao fim do processo de cura/endurecimento.

O processo de cura/endurecimento é feito numa estufa a cerca de 50 °C e de humidade relativa controlada durante cerca de 10 horas. As placas são sujeitas à maturação durante 7 dias, em ambiente de armazém, para depois passarem à fase de secagem a +/- 10% de humidade relativa ( $H_r$ ). A duração e as condições de secagem (temperatura e humidade relativa) dependem da espessura das placas de CBPB.



**Figura 8 – Prensagem do grampo com várias placas de CBPB.**



**Figura 9 – Placas de CBPB em maturação.**

É de salientar que na prática, a pressão a que são sujeitas as placas de CBPB não é uniforme. No entanto, como se pode observar na Figura 8, a diferença de pressão não deverá ser significativa.

## **1.2. Objectivos**

O presente estudo integra-se num projecto de investigação para utilização de CBPB (Cement-Bonded ParticleBoards) como material estrutural, estudando-se nesta dissertação o comportamento dos pilares de CBPB como elementos estruturais. Em termos experimentais, analisou-se o material CBPB à compressão uniaxial, em faces distintas, com diversas alturas e tipos de secções para caracterizar o material e o seu comportamento em função da esbelteza. Para a obtenção de determinadas secções foi necessário recorrer à colagem de várias placas com poliuretano ou resina epóxidica. Outro dos aspectos estudados foram as ligações e, neste sentido, analisou-se a ligação CBPB-poliuretano e o esmagamento originado por uma ligação com um conector metálico, tendo-se analisado os modos de rotura e os factores que influenciam a sua resistência. Além disso, com base no Eurocódigo 5 [ 3 ], definiram-se vários tipos de pilares executáveis com CBPB.

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

## **1.3. Organização da Dissertação**

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, incluindo a introdução e as conclusões.

No primeiro capítulo é apresentado o novo material CBPB, nomeadamente, como é que as normas o definem, os factores que o afectam, a sua constituição e o processo de fabrico.

No segundo capítulo é feita a abordagem da problemática da produção do CBPB, ou de materiais similares, referindo-se a compatibilidade entre a madeira e o cimento, as técnicas para melhorar esta compatibilidade e a metodologia de classificação do CBPB. Também são apresentadas as características mecânicas, tanto à flexão como à compressão e os factores que poderão influenciar estas características.

No terceiro capítulo apresentam-se os métodos de ensaio e os tipos de provetes testados no âmbito desta dissertação, nomeadamente, para a compressão, corte e esmagamento.

No quarto capítulo são apresentados e no quinto são analisados os resultados obtidos dos ensaios referidos no capítulo anterior.

Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as principais conclusões deste estudo, algumas recomendações e possíveis desenvolvimentos futuros.

## 2. OS COMPÓSITOS DE CIMENTO E MADEIRA

Os materiais compósitos de madeira e cimento começaram a ser utilizados nos Estados Unidos há mais de 70 anos, tendo a sua utilização aumentado com as preocupações devido aos problemas de saúde causados pelo amianto contido no fibrocimento [ 5 ] e [ 6 ]. Mais recentemente, este material tem sido desenvolvido para aplicações com fins estruturais, pois até então era aplicado com fins de revestimento, isolamento acústico, resistência ao fogo e estética [ 5 ].

Por vezes, há autores que denominam compósitos similares ao CBPB de Excelsior (Cement-Bonded Wood Excelsior Boards) devido à forma das fibras – filamentos [ 5 ], de CBWC (Cement-Bonded Wood Composites) ou de CWPB (Cement Wood ParticleBoard) [ 6 ], baseado na origem das partículas de madeira – desbaste florestal e de CBVC (compósitos biomassa vegetal-cimento), à base de biomassa vegetal [ 7 ].

Wolfe et al [ 5 ], classifica os compósitos de cimento e madeira em duas categorias:

1. Compósito de partículas de madeira e cimento (wood particle-cement composites) – em que não é necessário ter elementos com grande resistência tais como revestimentos, isolamento acústico, tectos falsos, etc...;
2. Compósito de cimento reforçado com fibras de madeira (wood fiber-reinforced cement) – para elementos estruturais secundários tais como os revestimentos de coberturas, em substituição do fibrocimento.

### 2.1. Compatibilidade entre os diferentes materiais

#### 2.1.1. Índice de inibição

As propriedades físicas e mecânicas do CBPB dependem de diversos factores. A característica mais importante para o fabrico deste material é o índice de inibição que indica a compatibilidade entre o cimento e a madeira, sendo definido por [ 8 ]:

$$I = \left[ \frac{T_{CIM} - T_M}{T_{CIM}} \right] \left[ \frac{H_M - H_{CIM}}{H_{CIM}} \right] \left[ \frac{S_{CIM} - S_M}{S_{CIM}} \right] \times 100 \quad (1)$$

onde:

**I** é o índice de inibição (%);

**T<sub>CIM</sub>** é a temperatura máxima da mistura cimento/água (°C);

**T<sub>M</sub>** é a temperatura máxima da mistura madeira/cimento/água (°C);

**H<sub>CIM</sub>** é a tempo para atingir a temperatura máxima de hidratação do cimento na mistura cimento/água (h);

- $H_M$  é a tempo para atingir a temperatura máxima da mistura de hidratação do cimento na mistura madeira/cimento/água (h);
- $S_{CIM}$  é o máximo incremento de temperatura da curva na mistura cimento/água ( $^{\circ}C/h$ );
- $S_M$  é o máximo incremento de temperatura da curva na mistura madeira/cimento/água ( $^{\circ}C/h$ ).

O índice de inibição foi formulado por diversos autores, nomeadamente, Waetherwax, Tarkow e Hofstrand, sendo classificado como indicado na Tabela 1, em que quanto menor for o índice de inibição maior será a compatibilidade entre a madeira e o cimento [ 8 ], [ 9 ] e [ 10 ]:

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

**Tabela 1 – Classificação da compatibilidade entre o cimento e a madeira através do índice de inibição [ 8 ] e [ 10 ].**

Se um compósito tiver um índice de inibição desfavorável, as suas propriedades físicas e mecânicas estarão comprometidas. Assim, alguns autores classificam a compatibilidade entre a madeira e o cimento através da resistência do material, definindo uma resistência mínima consoante a função a que este se destina [ 7 ].

Esta forma de classificar a compatibilidade entre os materiais é pouco precisa sendo apenas qualitativo. A qualificação da compatibilidade entre os componentes do CBPB está dependente da função que este irá desempenhar. Assim, um CBPB classificado como moderada inibição poderá ser eficaz a desempenhar a função, por exemplo, de um revestimento mas ineficaz para um elemento estrutural. Um elemento estrutural, devido à sua grande importância e, conseqüentemente, elevada exigência mecânica e de durabilidade, necessitará do melhor índice de inibição ( $I < 10$ ).

A madeira é uma matéria-prima que contém açúcares, extractivos e resinas que dificultam ou até mesmo impedem a presa do cimento. Assim, para anular o efeito destas substâncias e para acelerar a presa do cimento, vários autores recorrem ao uso de adjuvantes (aceleradores de presa) como o cloreto de cálcio ( $CaCl_2$ ). A aplicação de adjuvante permite ter uma maior resistência inicial mas, como se sabe do betão, a longo prazo, não terá tanta resistência em relação a um isento de adjuvante, ver Figura 10 [ 7 ] e [ 11 ].

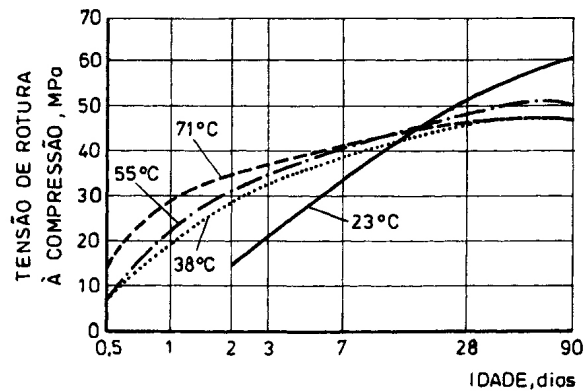


Figura 10 – Evolução das tensões de rotura do betão tratado a diferentes temperaturas [ 11 ].

Tal desvantagem, é um mal necessário não só pela presença de extractivos na madeira mas também porque, como acontece nos elementos de betão pré-fabricado, é necessário uma rápida descofragem a fim de ter o molde desocupado para uma nova produção.

Segundo Hachmi e Moslemi (1989) [ 12 ], é preciso ter em conta não só a quantidade mas também o tipo de extractivos, sendo mais gravoso no caso em que estes são solúveis em água, como é o caso de alguns taninos.

Em relação à presença de resinas, Miller e Moslemi (1991) mostraram que a existência destas tornam a superfície das partículas de madeira hidrófoba, impossibilitando a ligação destas com o cimento [ 13 ].

### 2.1.2. Pré-tratamento das partículas de madeira

Uma outra forma de contornar a problemática das substâncias contidas nas partículas de madeira será efectuar um pré-tratamento destas. O pré-tratamento das partículas utilizado por vários investigadores baseia-se na lavagem das partículas de madeira com água quente ou fria, sendo por vezes ineficaz, pois as melhorias são poucas ou inexistentes, ver Tabela 2.

Em 2004, Beraldo [ 7 ] estudou, entre outros factores, a influência da idade e da época de corte das árvores no fabrico de CBPB. Basicamente, estes factores podem ser simplificados num só, que é a presença de açúcares ou extractivos na madeira. Ao longo do ano, a quantidade de açúcares no interior das árvores, nomeadamente de *Eucalyptus grandis*, varia, sendo na primavera a época em que contêm maior teor de açúcares. Para além disto, o teor de açúcares está presente em diferentes quantidades no interior do tronco, sendo maior no borne, em que este tem uma maior representação num tronco de uma árvore juvenil [ 7 ].

Investigador	Espécie de madeira	Tratamento			Índice de inibição
		Água quente	Químicos	Microsílica	
			CaCl <sub>2</sub>		
Okino et al. [ 8 ]	<i>Havea brasiliensis</i>	Não	Não	Não	Extrema
		Sim	Não	Não	Moderada a alta
		Sim/Não	Sim	Não	Baixa
		Não	Não	Sim	Baixa a moderada
Okino et al. [ 10 ]	<i>Cupressus spp.</i>	Não	Não	Não	Moderada
		Sim/Não	Sim	Não	Baixa
		Não	Não	Sim	Baixa
Papadopoulos [ 9 ]	<i>Carpinus betulus L.</i>	Não	Não	Não	Moderada
		Não	Sim	Não	Baixa

**Tabela 2 – Efeito de diferentes tratamentos das partículas de madeira no índice de inibição.**

Segundo Schwarz e Simatupang (1984) [ 14 ], para algumas espécies de madeira, que é o caso dos *Fagus silvatica*, o armazenamento da madeira após o corte pode melhorar a compatibilidade entre a madeira e o cimento, reduzindo o teor de açúcar devido às ações enzimáticas. Este efeito benéfico não se verifica no teor de taninos. Segundo Lignum (1960) [ 15 ], as madeiras ricas em taninos não devem ser usadas para o fabrico de CBPB.

Weber [ 16 ] e Bever [ 17 ] recomendam que o teor de açúcares não deve exceder 0,6% do peso da madeira para a obtenção de placas de boa qualidade.

## 2.2. Traço da mistura

O índice de inibição está directamente relacionado com o traço da mistura. O traço desejável para este compósito será aquele que tem uma maior quantidade de madeira, para que o seu fabrico seja mais amigo do ambiente. Se a madeira tiver uma grande proporção em relação ao cimento, este não conseguirá realizar a ligação de todas as partículas (ligante insuficiente), acabando por ficar expostas ao exterior. Como se pode observar na Figura 11, Coutts [ 18 ] obteve a máxima resistência à flexão (30 MPa) quando utilizou 8% de teor de pasta de kraft tendo perdido as qualidades do revestimento de cimento devido à formação de bolas de pasta de fibra de madeira. Por outro lado, um traço rico em madeira poderá significar a existência de uma maior quantidade de açúcares. Assim, é preciso determinar o traço que garanta as melhores propriedades físicas e mecânicas.

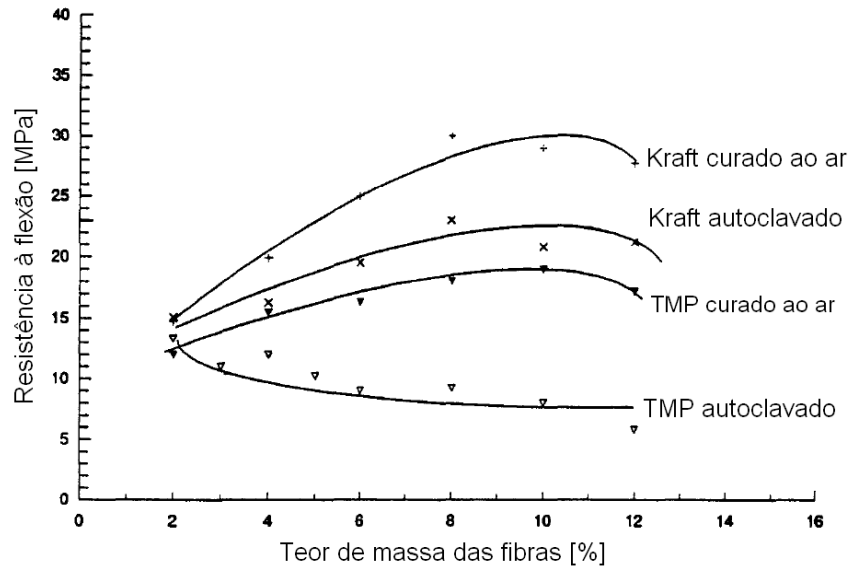


Figura 11 – Influência do teor de massa, do tipo de fibras (kraft e TMP) e do método de cura (autoclave e ao ar) na resistência à flexão, adaptado de [ 18 ].

Os autores Moslemi e Pfister (1987) [ 19 ], ao estudarem o compósito constituído por flocos de madeira *Pinus contorta* (espessura média de 0,6mm) e cimento *Portland* tipo I, o traço madeira:cimento entre 1,3 e 2,3 teve pouca influência na resistência à flexão.

Sorfa [ 20 ] verificou que a resistência à compressão de tijolos com aparas de Pinho para suporte de paredes de minas depende do traço madeira:cimento (Figura 12).

Em relação à quantidade de água a utilizar na mistura, Weatherwax e Tarkow [ 21 ] e [ 22 ] recomendam 2,7 ml de água por grama de madeira seca e mais 0,25 ml de água por grama de cimento.

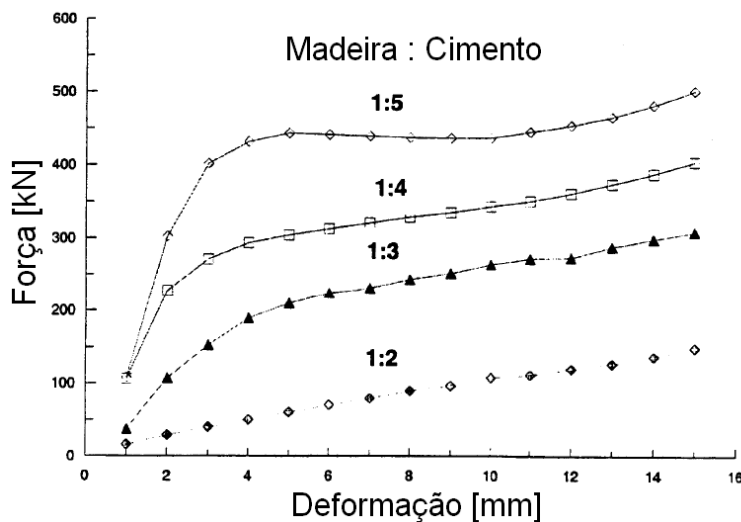
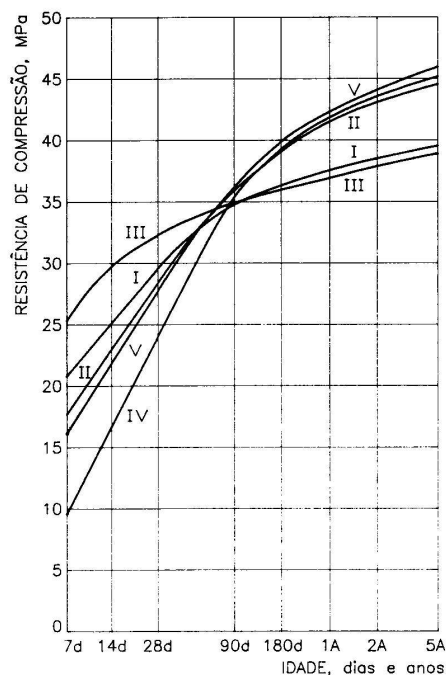


Figura 12 – Diagrama compressão - deformação. Efeito do traço madeira:cimento das placas de partículas de madeira com cimento na rigidez e na resistência de tijolos compósitos [ 20 ].

O tipo de cimento utilizado nestes compósitos também influenciará o comportamento deste. Por um lado, cada tipo de cimento tem diferentes resistências (Figura 13), mas a sua composição poderá influenciar a compatibilidade com a madeira [ 7 ] e [ 23 ].



**Figura 13 – Influência do tipo de cimento na variação da resistência do betão com a idade [ 23 ].**  
**I – Portland normal; II – Portland modificado; III – Portland de elevada resistência inicial;**  
**IV – Portland de baixo calor de hidratação; V – Portland resistente aos sulfatos**

Beraldo et al [ 7 ], mostraram que o compósito com partículas de madeira *Eucalyptus grandis* tem maior resistência à compressão axial com um cimento *Portland* do tipo V (CP V-ARI) do que do tipo II (CP II-E-32).

### 2.3. Características Mecânicas do CBPB

Como já foi referido anteriormente, a resistência do CBPB depende, de entre outros factores, do traço madeira:cimento (ver Figura 12), do índice de inibição, do tipo de material (da madeira e do cimento) e da utilização de químicos.

Na Figura 11 é feita a comparação entre a utilização do kraft, “pasta produzida pelo cozimento de estilhas de madeira num recipiente pressurizado (digestor) na presença de um licor de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfureto de sódio (Na<sub>2</sub>S)” [ 24 ], e a pasta termo-mecânica (TMP), “pasta obtida por um processo termo-mecânico, no qual as aparas de madeira são “amolecidas” por vapor antes de passarem para um refinador pressurizado” [ 24 ], onde se pode verificar que o tipo e a quantidade de partículas influenciam a resistência pois são estas que realizam as distribuições de tensões, retardando

a rotura e tornando-se num material mais dúctil, ver Figura 11 [ 5 ]. Coutts [ 18 ], provou que se obtém melhores resistências com uma cura ao ar livre do que com uma cura em autoclave.

Segundo Papadopoulos [ 9 ], a distribuição de tensões é tanto melhor quanto maior for a quantidade de partículas de madeira. Como se pode ver na Tabela 3, o aumento da proporção de madeira nas placas faz com que estas tenham maior variação dimensional (TS). Tal facto pode não implicar uma maior absorção de água, como foi demonstrado por Okino et al [ 8 ].

Visto que o cimento é um material frágil (com um módulo de elasticidade superior ao da madeira), quanto maior for a proporção do cimento neste tipo de compósitos, maior será a rigidez deste Tabela 3.

Madeira:cimento	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Tensão de rotura à flexão [N/mm <sup>2</sup> ]	Módulo de Elasticidade [N/mm <sup>2</sup> ]	TS [%]
1:3	1270	12,68	6009.6	1,75
1:4	1280	10,56	7056.4	0,67

Tabela 3 – Propriedades mecânicas e físicas de placas com partículas de *Carpinus betulus* coladas com cimento, adaptado de [ 9 ].

### 2.3.1. Resistência à compressão

Sorfa [ 20 ] obteve uma resistência com o comportamento indicado na Figura 12. Após uma suposta resistência máxima, o material manteve-a e posteriormente veio a aumentar, sendo bem visível para o traço madeira:cimento de 1:5. Tal comportamento contraria o observado nos ensaios à compressão de compósitos de partículas de madeira e cimento realizados no Forest Products Laboratory (FPL), com um traço madeira:cimento de 1:2. Obtiveram gráficos com o mesmo comportamento ao indicado na Figura 14, com excepção da inclinação inicial, tendo a resistência caído 30% a 50% após atingir a carga máxima [ 5 ].

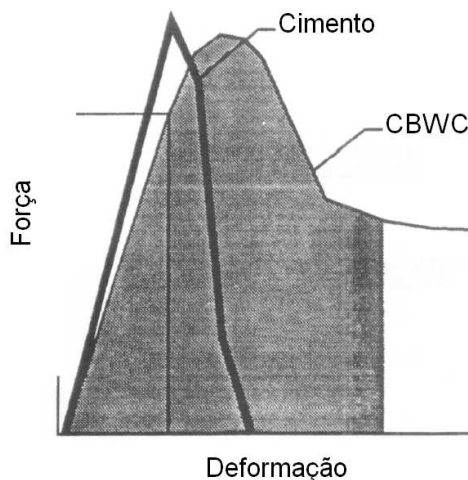


Figura 14 – Gráfico Força – deformação, para compósitos de madeira colada com cimento (CWBC) e cimento à flexão, adaptado de [ 5 ].

Beraldo et al [ 7 ] verificaram o efeito da época de corte/uso de *Eucalyptus grandis* e do tipo de cimento utilizado no fabrico de compósitos à base de cimento *Portland*. Na Figura 15 e Figura 16, são apresentados os resultados, onde a resistência máxima obtida foi, aproximadamente, de 14 MPa.

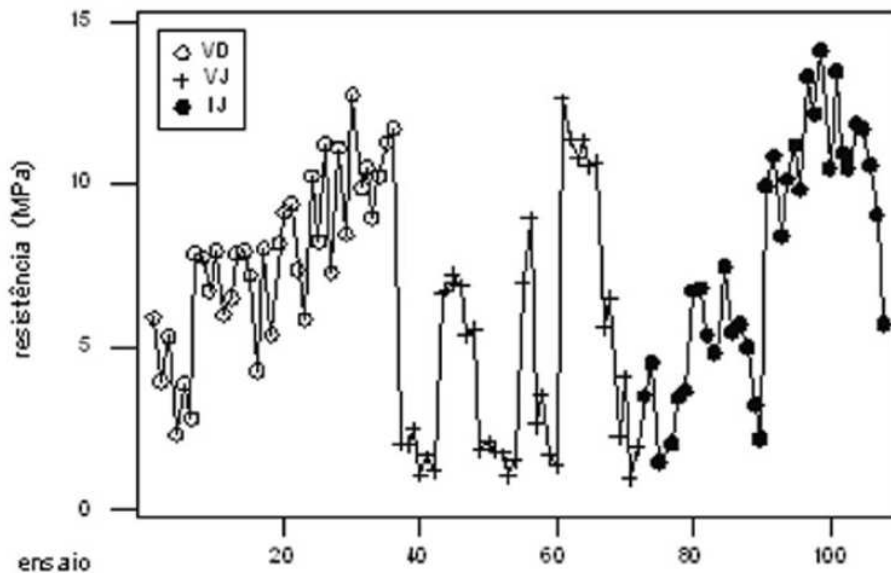


Figura 15 – Efeito da época de corte/uso da madeira na resistência média à compressão axial de compósito à base de cimento Portland. Legenda: VD (corte/uso Verão/Dezembro: corpos-de-prova 01 a 36); VJ (corte/uso Verão/Julho: corpos-de-prova 37 a 42); IJ (corte/uso Inverno/Julho: corpos-de-prova 73 a 108) [ 7 ].

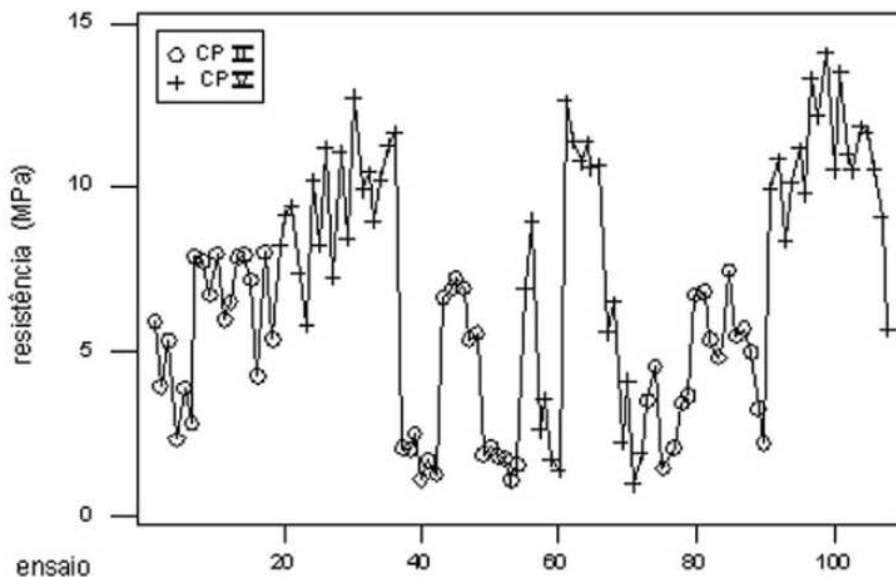


Figura 16 – Efeito do tipo de cimento (CP II e CP V) na resistência média à compressão axial de compósitos à base de cimento e Portland. Legenda: VD (corte/uso Verão/Dezembro: corpos-de-prova 01 a 18 – CP II; 19-36 – CP V); VJ (corte/uso Verão/Julho: corpos-de-prova 37 a 54 – CP II; 55 a 72 – CP V); IJ (corte/uso Inverno/Julho: corpos-de-prova 73 a 90 – CP II; 91 a 108 – CP V) [ 7 ].

### 2.3.2. Resistência à flexão

Segundo Coutts [ 18 ] e Soroushian [ 25 ], os materiais de cimento reforçado com fibra de madeira resistem entre 7 MPa a 30 MPa à tracção por flexão (Figura 11) e, a humidade tende a diminuir a resistência fazendo com que as partículas de madeira sejam mais flexíveis e incapazes de evitar a fissuração da matriz de cimento.

Na Tabela 4 são apresentados vários resultados obtidos por diversos autores [ 5 ], [ 9 ] e [ 10 ]

Autor	Espécie de madeira	Traço madeira:cimento	Tensão de rotura à tracção [MPa]	Módulo de elasticidade [MPa]
Papadopoulos [ 9 ]	<i>Carpinus betulus</i>	1:3	13	6010
		1:4	11	7056
Wolfe e Geimer (FPL) [ 5 ]	<i>Southern pine</i>	1:2 a 1:2,5	2 a 4	-
Lee [ 10 ]	Excelsior de <i>Taxodium distichum</i>	-	3	924
Dinwoodie e Paxton [ 5 ]	-	-	10 a 13	-

Tabela 4 – Vários exemplos de ensaios à flexão [ 5 ], [ 9 ] e [ 10 ].

Wolfe e Gjinolli [ 6 ], com vários tipos de compósitos à base de cimento e madeira mostraram que tanto a resistência à flexão como a sua rigidez aumenta com a densidade do material (Figura 17 e Figura 18). Tal facto é contrariado pelos resultados de Papadopoulos [ 9 ], com uma densidade de 1280 kg/m<sup>3</sup> obteve uma resistência à tracção por flexão de 10,56 MPa, menos, aproximadamente, 2 MPa relativamente a uma densidade de 1270 kg/m<sup>3</sup> (Tabela 3).

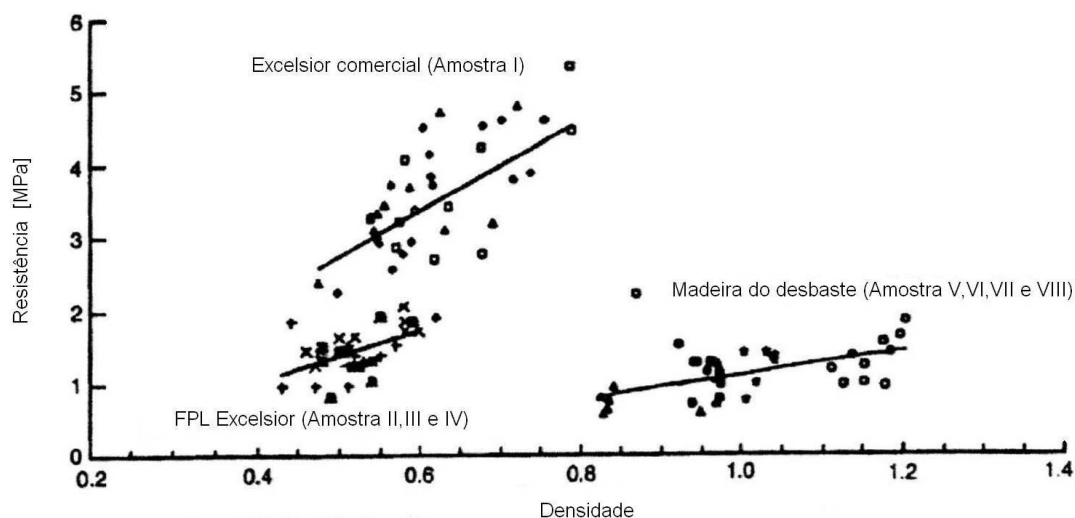


Figura 17 – Variação da tensão de rotura à tracção por flexão com a densidade de diferentes amostras de CBWC, adaptado de [ 6 ].

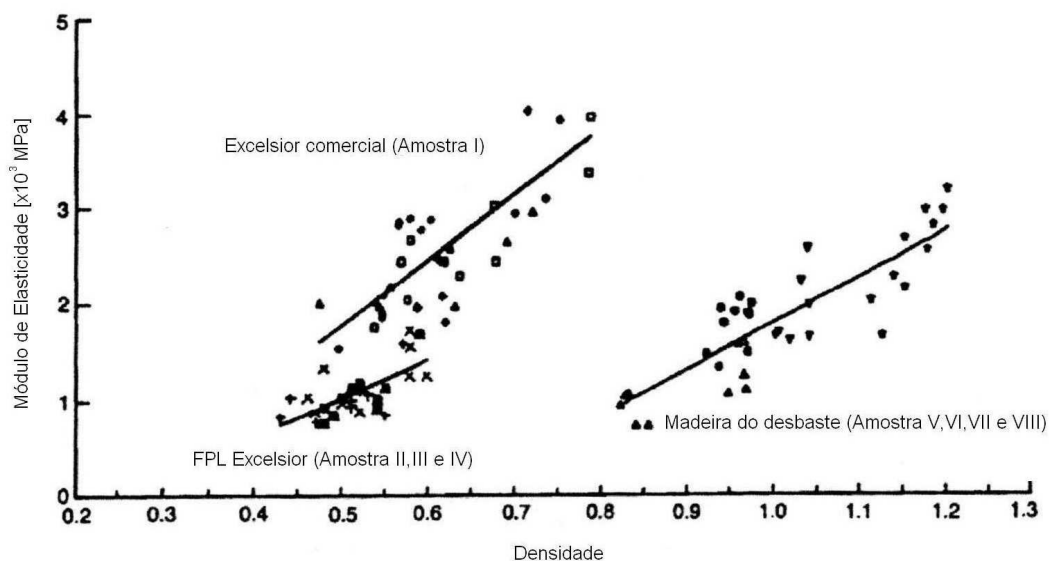


Figura 18 – Variação do módulo de elasticidade com a densidade de diferentes amostras de CBWC, adaptado de [ 6 ].

## 2.4. Outras características dos compósitos de cimento e madeira

### 2.4.1. Resistência ao ataque de fungos e de térmitas

Vários investigadores testaram a resistência de compósitos de madeira e cimento ao ataque de fungos, nomeadamente o fungo de podridão castanha e branca, *Coniophora puteana* e *Trametes versicolor*, respectivamente. Todos eles concluíram que este material compósito não é atacado pelos fungos (Tabela 5) [ 9 ].

Madeira:cimento	Fungo de podridão castanha WL [%]	Fungo de podridão branca WL [%]
1:3	0,85	-1,88
1:4	-2,92	-1,45

Tabela 5 – Perda de peso (WL) das placas de partículas de *Carpinus betulus* coladas com cimento, adaptado de [ 9 ].

A Building Research Establishment também concluiu que o CBPB é muito resistente ao fungo de podridão branca *Pleurotus ostreatus* e castanha *Coniophora puteana* [ 10 ].

Visto que a madeira está presente neste compósito, é importante ter em conta os possíveis ataques biológicos (térmitas) que poderá sofrer, ainda para mais quando se tratam de elementos estruturais. A Universidade do Hawaí, em Manoa, testou o comportamento do CBPB face às térmitas mais destrutiva de três continentes. Uma amostra foi exposta a 400 térmitas durante 28 dias não tendo sido registado nenhum ataque significativo, verificando-se apenas um ataque superficial nas extremidades cortadas [ 26 ].

## 2.5. Estabilidade dimensional

O CBPB, sendo um material compósito que contém madeira, poderá ser instável dimensionalmente. As razões para esta instabilidade podem ser devidas à alcalinidade (ambiente agressivo para as aparas), à carbonatação, à variação de humidade e às tensões internas resultante do fabrico do CBPB [ 27 ].

A instabilidade devida à variação de humidade pode ser minimizada através da modificação das aparas, da pasta de cimento e/ou da aplicação de revestimentos de superfície [ 27 ].

Os revestimentos de superfície a aplicar no CBPB têm de ter em conta que a superfície é altamente alcalina, que contém micro poros e apresenta uma baixa resistência à tracção que resultará em fendilhação. Assim, o revestimento a aplicar terá de ser, após curado, extensível, resistente à elevada alcalinidade, resistente ao vapor de água e ao dióxido de carbono [ 27 ].

Fan et al (2003) [ 27 ], ao testarem três soluções para revestimento (acrílico, estireno-butadieno e solvente para CBPB – CPB) concluíram que, no geral, o CPB é o mais eficaz. Como se pode observar na Tabela 6, a sua eficácia aumenta com o número de demãos.

Número de vedantes	CBPB sem revestimento		Acrílico		CPB -Solvente para CBPB			
	0	0	1 demão	2 demão	1 demão	2 demão	2 demão	3 demão
Espessura do CBPB	12	18	12	12	12	12	18	18
Hr (%)	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média
Variação Massa								
90-65	-0,78	-1,42	-0,93	-1,33	-0,25	-0,11	-0,14	-0,10
65-35	-1,27	-1,68	-1,47	-1,56	-0,37	-0,18	-0,40	-0,30
35-65	1,23	1,14	1,05	1,02	0,10	0,04	0,03	0,01
65-90	1,94	1,87	2,28	2,32	1,20	0,48	0,24	0,17
90-65	-0,85	-0,91	-1,40	-1,44	-0,45	-0,09	-0,07	-0,04
65-35	-1,40	-1,46	-1,72	-1,72	-0,57	-0,23	-0,35	-0,31
Variação do comprimento								
90-65	-0,05	-0,07	-0,04	-0,04	-0,01	0,00	-0,01	-0,01
65-35	-0,08	-0,11	-0,06	-0,07	-0,02	-0,01	-0,03	-0,02
35-65	0,08	0,08	0,07	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00
65-90	0,04	0,06	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01
90-65	-0,04	-0,05	-0,04	-0,04	-0,02	0,00	-0,01	0,00
65-35	-0,08	-0,10	-0,08	-0,07	-0,03	-0,01	-0,03	-0,02
Variação da espessura								
90-65	-0,15	-0,23	-0,07	-0,08	-0,04	-0,03	-0,03	-0,01
65-35	-0,16	-0,26	-0,12	-0,16	-0,04	-0,02	-0,07	-0,03
35-65	0,14	0,18	0,10	0,11	0,02	0,01	0,00	0,00
65-90	0,12	0,17	0,12	0,14	0,05	0,03	0,02	0,01
90-65	-0,11	-0,12	-0,10	-0,12	-0,03	0,00	-0,01	-0,01
65-35	-0,16	-0,27	-0,14	-0,13	-0,03	-0,02	-0,07	-0,06

**Tabela 6 – A eficiência do número de demãos de revestimento no comportamento do CBPB (máxima variação média em %), adaptado de [ 27 ].**

## 2.6. Pilares

Numa estrutura tradicional porticada constituída por vigas, pilares, lajes e fundações, os pilares assumem uma relevância especial em termos do seu comportamento quer a acções verticais quer a acções horizontais. Nas estruturas em madeira, por vezes, as vigas e os pavimentos descarregam directamente nos painéis de parede não existindo, neste caso, pilares com geometria idêntica aos utilizados em construções de betão armado.

No anexo C do EC5 [ 3 ], são definidos dois tipos de colunas que se podem utilizar em estruturas de madeira, nomeadamente pilares espaçados com espaçadores ou gussets e pilares treliçados com ligações coladas ou pregadas (Figura 19 e Figura 20). Ambas as soluções são constituídas essencialmente por placas, sendo uma escolha possível para a execução de pilares em CBBP.

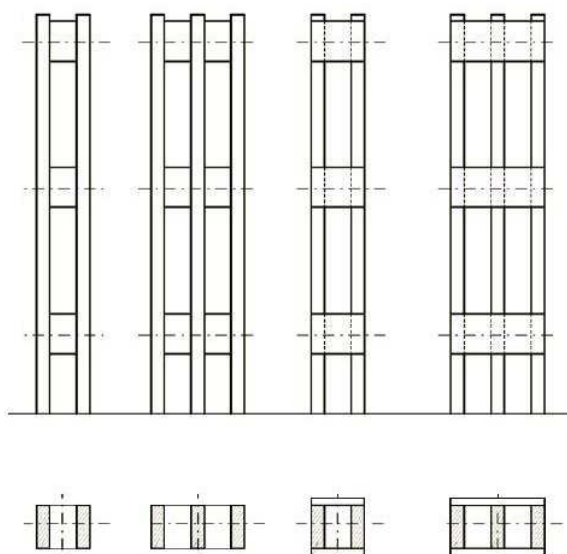


Figura 19 – Pilares espaçados. Adaptado de [ 3 ].

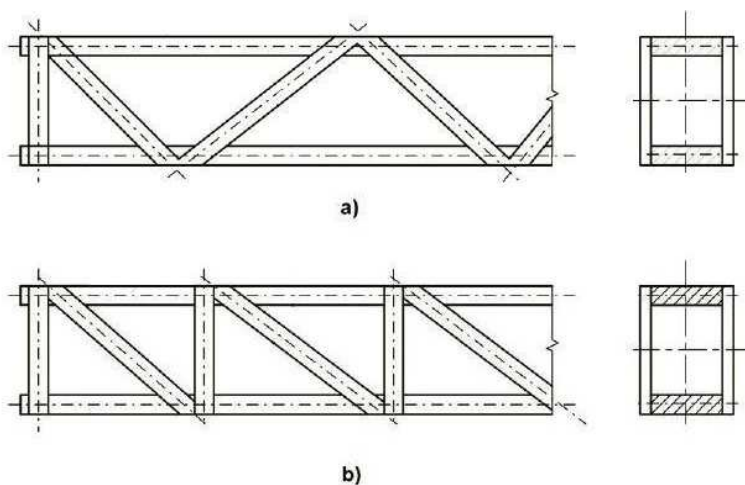


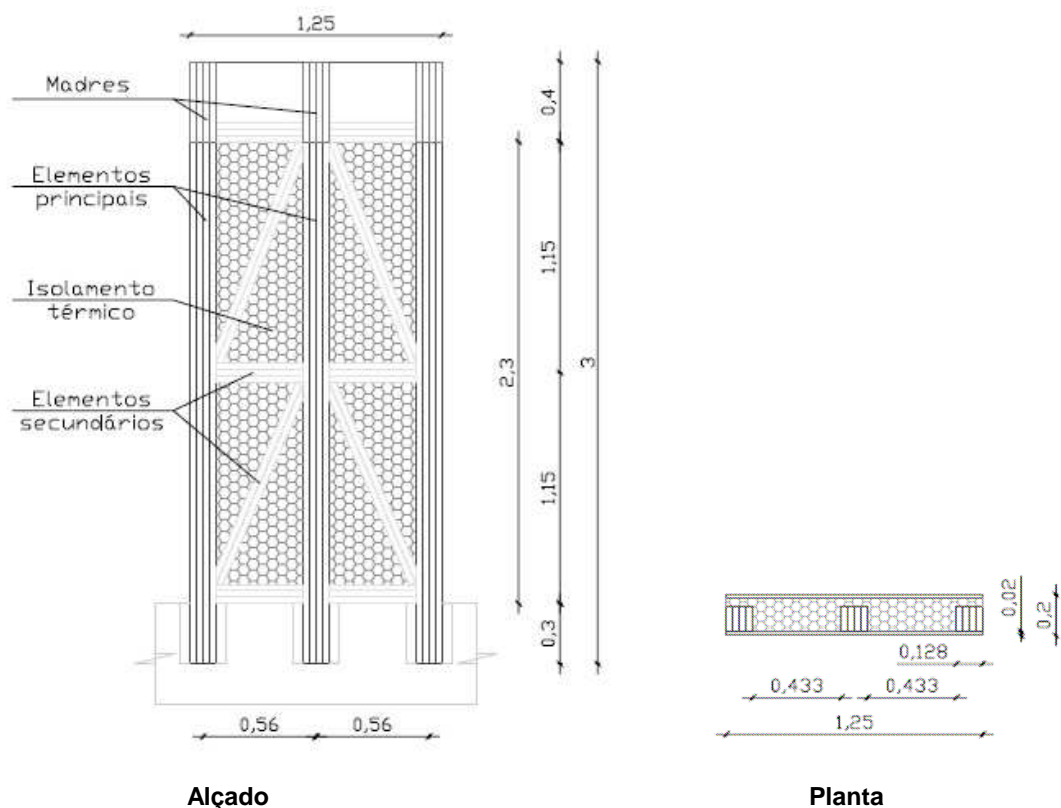
Figura 20 – Pilares treliçados. a) – treliça em V; b) treliça em N. Adaptado de [ 3 ].

Uma estrutura com este tipo de elementos verticais tem a vantagem de se adaptar à planta de arquitectura, não necessitando de pilares localizados e permitindo uma ligação e uma distribuição simples dos elementos horizontais.

As estruturas com este tipo de solução permitem, em termos gerais, garantir uma caixa-de-ar, a aplicação de isolamento no seu interior e a passagem de cabelagens.

Para complementar uma estrutura deste tipo em madeira, por vezes é necessário recorrer a elementos metálicos para aumentar a rigidez ou para tornar a estrutura mais leve (por exemplo, no último piso). Neste tipo de estruturas as fundações são contínuas e em betão armado.

Um outro tipo de pilar possível de utilizar em estruturas de CBPB encontra-se indicado na Figura 21. Neste caso, há uma estrutura principal (constituída por pilares), com elementos secundários horizontais a contraventar os pilares e os elementos diagonais a contraventar e a distribuir as cargas para os pilares adjacentes.



Nota: as cotagens são exemplificativas.

**Figura 21 – Pilar porticado.**

## 2.7. Ligações

As construções ditas “secas”, são construções que necessitam de um maior número de ligações, recorrendo-se neste caso a elementos metálicos que executem as ligações entre os diversos elementos. Uma ligação deste tipo pode ser de corte simples ou duplo (Figura 22), consoante o número de elementos a ligar. Os elementos que efectuem a ligação das várias peças (conectores) são, em geral, metálicos e podem ser: pregos, grampos, cavilhas, parafusos (de porca ou de rosca) ou placas metálicas denteadas.

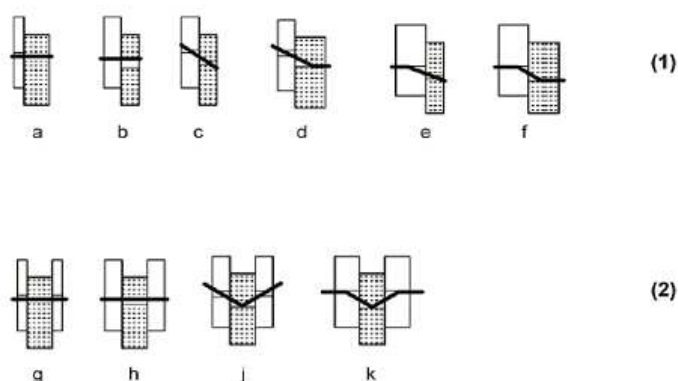


Figura 22 – Modos de rotura. (1) – Corte simples; (2) – Corte duplo. Adaptado de [ 3 ].

No caso particular do CBPB, devido às suas características, não é muito eficiente a utilização de pregos, grampos ou de placas metálicas denteadas, atendendo ao provável destacamento da superfície envolvente das placas e, conseqüente diminuição da secção. Em relação aos parafusos de rosca, estes não poderão ser de qualquer tipo, devendo possuir uma cabeça que consiga ultrapassar a superfície com maior densidade de cimento e que não origine danos na sua envolvente. Na Figura 23 mostra-se um tipo de parafuso roscado recomendado para fixação de placas de CBPB.



Figura 23 – Parafuso roscado recomendado para aplicação em CBPB [ 28 ].

A resistência de uma ligação para além de depender dos conectores metálicos também depende dos próprios elementos estruturais a serem ligados.

O factor mais importante que influencia a resistência da ligação é a resistência ao esmagamento,  $f_n$ , dos vários elementos. Na Figura 22 são apresentados os vários modos de rotura de uma ligação

madeira-madeira ou madeira-painel. Sempre que o conector metálico flecte, a resistência da ligação, para além de depender da resistência ao esmagamento, também depende do momento de cedência do conector metálico, como é o caso dos modos de rotura *d*, *e*, *f*, *j* e *k* (Figura 22).

Quando as extremidades do conector têm tendência a ter um movimento relativo à superfície da placa adjacente, pode-se ainda considerar o chamado “efeito de corda” que depende da resistência ao arranque.

No presente trabalho estudaram-se alguns destes tipos de ligações (Figura 22) utilizando parafusos de porca *M12* e *M16* da classe 8.8 (Figura 24).



**Figura 24 – Parafuso de porca *M12* e *M16* da classe 8.8.**

### 3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Foram realizados ensaios de provetes à compressão uniaxial (111), bem como de ligações coladas ao corte (6) ou aparafusadas ao esmagamento (21) no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Nestes ensaios foi utilizada uma prensa servocontrolada da marca Seidner modelo 3000D (actualizada pela *walter+bay*) com capacidade de carga até 3000 kN (Figura 25). Os ensaios foram realizados por controlo de deslocamento a uma velocidade de 0,02 mm/s.

A força foi medida directamente através da célula de pressão da prensa. Os deslocamentos foram medidos através de 4 transdutores de deslocamentos CDP 100 da TML, colocados entres os pratos da prensa. A aquisição dos dados da força e dos deslocamentos ao longo dos ensaios foi realizada através de um Datalogger Spider 8 da HBM com capacidade para 8 canais e de um computador portátil. O software de aquisição de dados utilizado foi o Catman 4.0 da HBM.



Figura 25 – Ensaio à compressão.

#### 3.1. Provetes para ensaios à compressão uniaxial

No que diz respeito aos ensaios à compressão uniaxial, foram testados 111 provetes com diversas dimensões, como apresentado na Tabela 7.

Os provetes designados por *P* são de dois tipos, *P1* e *P2*. O provete do tipo *P1* tem uma forma cúbica ( $32 \times 32 \times 32 \text{ mm}^3$ ) e os do tipo *P2* uma forma paralelepípedica ( $100 \times 64 \times 32 \text{ mm}^3$ ), ver Figura 26.

Os provetes designados por *C* têm diversas secções e alturas, sendo os provetes *C1*, *C2* e *C3* constituídos, respectivamente, por uma, duas e três placas de CBPB; os provetes *C4* em forma de cantoneira e os provetes *C5* de secção tubular quadrada (Figura 32).

É de salientar que os provetes testados foram retirados, aleatoriamente, de diferentes zonas da chapa de CBPB.

Provete	Nº de provetes ensaiados	h [mm]	l [mm]	t [mm]
P1	6	32	32	32
P2	6	100	64	32
C1-A	6	100		
C1-B	6	200		
C1-C	3	300		
C1-D	8	400	100	32
C1-E	9	500		
C1-F	5	600		
C2-C	5	300	100	64
C3-A	3	100		
C3-B	6	200	100	96
C3-C	6	300		
C4-A	6	100		
C4-B	6	200		
C4-C	6	300	100	32
C4-D	3	400		
C4-F	3	600		
C5-A	6	100		
C5-B	6	200	100	100
C5-C	6	300		

Tabela 7 – Dimensões dos provetes para os ensaios à compressão.

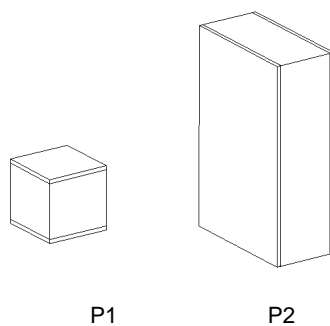


Figura 26 – Provetes do tipo P.

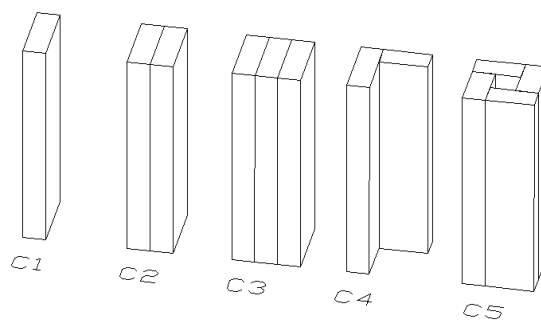


Figura 27 – Provetes do tipo C.

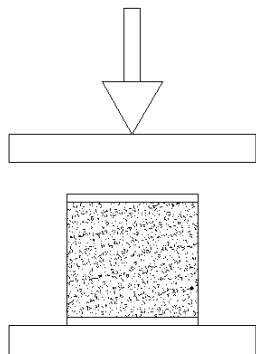
### 3.1.1. Provetes do tipo P

Os provetes do tipo *P* serviram para fazer uma primeira abordagem ao material compósito CBPB, nomeadamente quanto ao seu comportamento quando solicitados segundo direcções distintas. No caso particular do provete *P1*, este tem a geometria de um cubo para que os resultados não sejam influenciados pela geometria mas sim pela direcção das fibras de madeira.

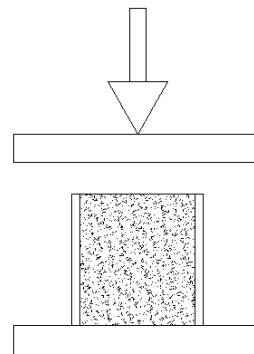
Os ensaios com os provetes do tipo *P1* (Figura 28) têm como objectivo determinar as características mecânicas do material em compressão uniaxial na direcção do plano do painel e na direcção perpendicular ao plano do painel. Tendo em conta que este compósito é constituído por partículas de madeira orientadas preferencialmente segundo o plano do painel de CBPB, com estes ensaios pretende-se analisar o comportamento do CBPB consoante a face solicitada. Os três primeiros ensaios (*P1-1* a *P1-3*) referem-se à solicitação na face lisa (compressão normal ao plano do painel), Figura 29, sendo os restantes (*P1-4* a *P1-6*) na face rugosa (compressão paralela ao plano do painel), Figura 30.



**Figura 28 – Provede do tipo *P1* solicitado na face rugosa.**



**Figura 29 – Solicitação na face lisa.**



**Figura 30 – Solicitação na face rugosa.**

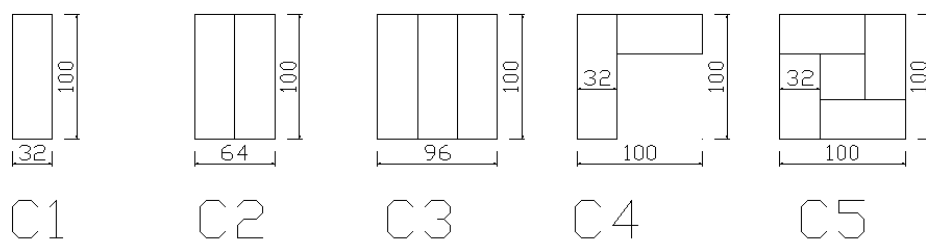
Os provetes do tipo *P2* (Figura 31) foram solicitados apenas na face rugosa (Figura 30), sendo mais esbeltos comparativamente com os provetes *P1*.



**Figura 31 – Provede do tipo *P2*.**

### 3.1.2. *Provetes do tipo C*

Os ensaios com os provetes do tipo *C* tiveram como objectivo analisar a influência da esbelteza na resistência e na rigidez do material compósito CBPB, para além de permitir uma maior amostragem de tensões de rotura e módulos de elasticidade do material. As várias geometrias das secções transversais testadas são apresentadas na Figura 32. Os provetes do tipo *C2*, *C3*, *C4* e *C5* foram colados com poliuretano, excepto os provetes do tipo *C4-D* e *C4-F* em que se utilizou resina epóxida.



**Figura 32 – Os diversos tipos de secções dos provetes do tipo *C*, em mm.**

Todos os provetes do tipo *C* foram solicitados na face rugosa com o intuito de determinar a influência do tipo de secção transversal e da esbelteza na resistência dos provetes de CBPB.

Para analisar a influência da esbelteza no comportamento resistente do CBPB, para além dos diferentes tipos de secções, variou-se a altura dos provetes entre os 100 mm e os 600 mm, como se pode observar na Tabela 7 e na Figura 33.

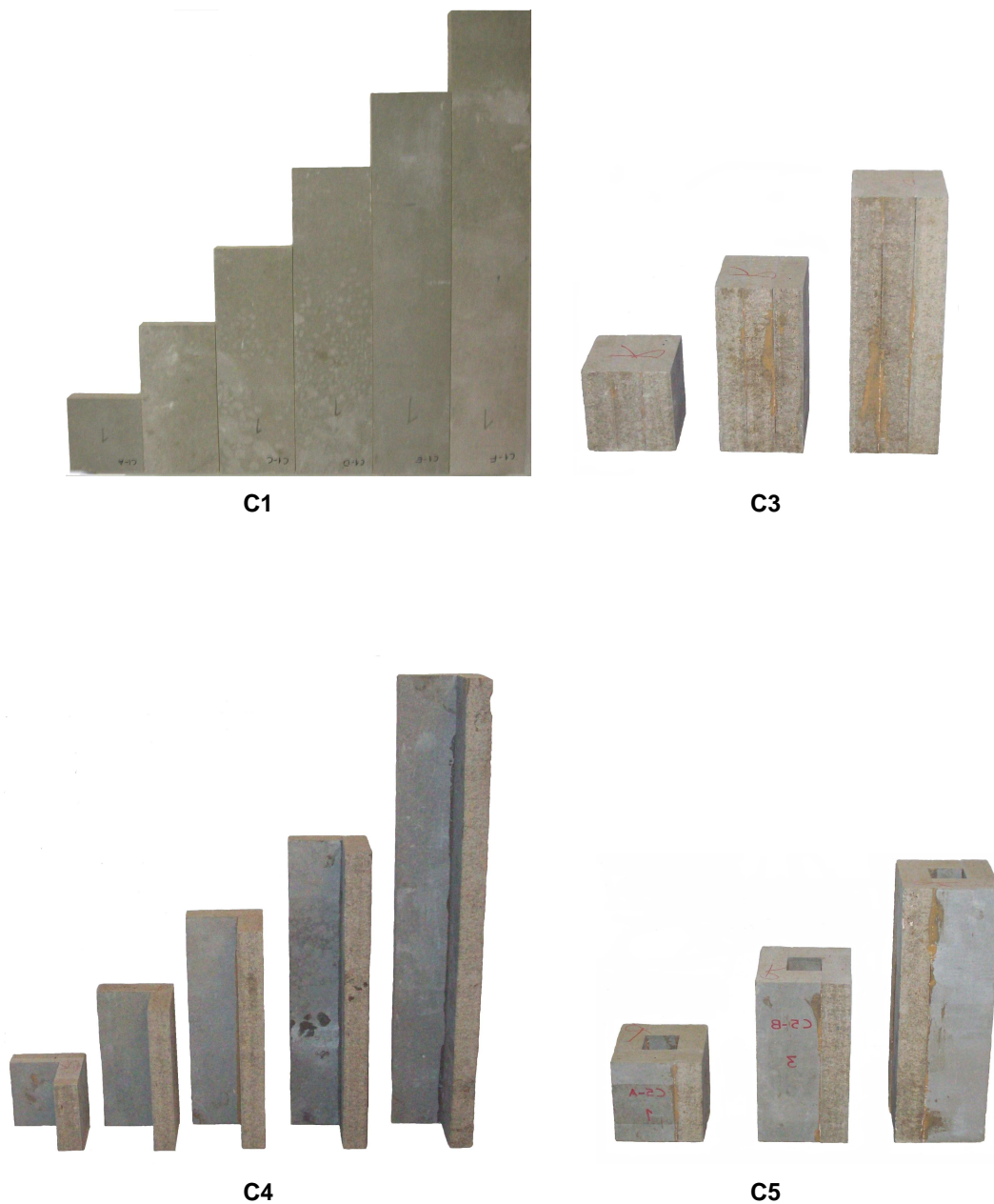


Figura 33 – Panorâmica geral dos provetes do tipo C1, C3, C4 e C5.

### 3.2. Provetes para ensaios ao corte em ligações coladas

Para avaliar o comportamento ao corte das ligações coladas foram executados 6 provetes do tipo A, constituídos por três placas com as dimensões dos provetes do tipo C1-A coladas com poliuretano, tendo a placa intermédia um desnível de, aproximadamente, 1 cm, como se pode observar na Figura 35.

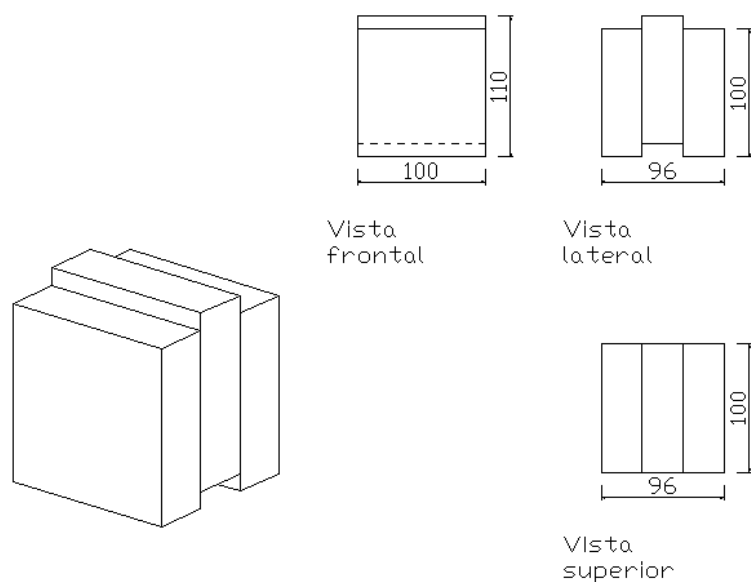


Figura 34 – Provede do tipo A, em mm.

Nos ensaios ao corte das ligações coladas (provetes do tipo A), analisou-se a aderência da colagem de placas de CBPB com poliuretano. Este tipo de ensaio foi realizado aplicando uma força de compressão no topo superior da placa central e nos topos inferiores das placas de extremidade, utilizando para o efeito a prensa Seidner 3000D. Salienta-se que os deslocamentos registados são relativos às extremidades opostas dos provetes em contacto com os pratos da prensa.

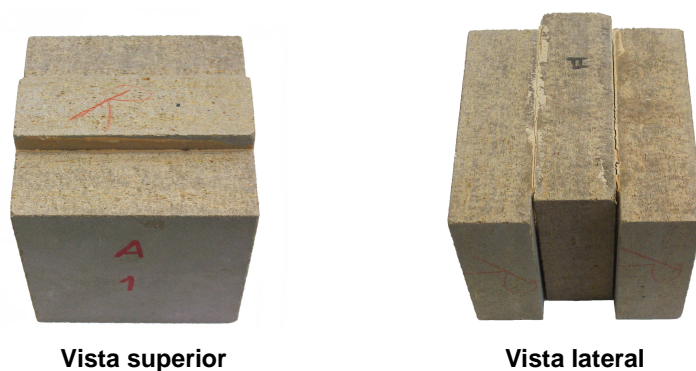


Figura 35 – Provede do tipo A.

### 3.3. Provetes para o ensaio ao esmagamento em ligações aparafusadas

A ligação entre duas ou mais placas de CBPB através um parafuso pode ter uma rotura devido ao esmagamento do CBPB quando a ligação é sujeita ao corte. Segundo o EC5, a resistência ao esmagamento da madeira depende do diâmetro do parafuso e da espessura do elemento a ligar, sendo necessário garantir um espaçamento mínimo do furo aos bordos do elemento a ligar.

Neste sentido, foram efectuados 21 ensaios (provetes do tipo *E*) para determinar a resistência ao esmagamento do CBPB e verificar a dependência desta com o diâmetro do parafuso e com a distância ao bordo carregado.

Os provetes designados por *E* (*ED-φ*) são constituídos por um provete com as dimensões do provete do tipo *C1*, furado com o diâmetro  $\phi$  e com a distância *D* pretendida, ver Figura 36.

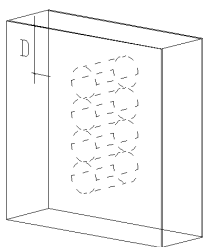
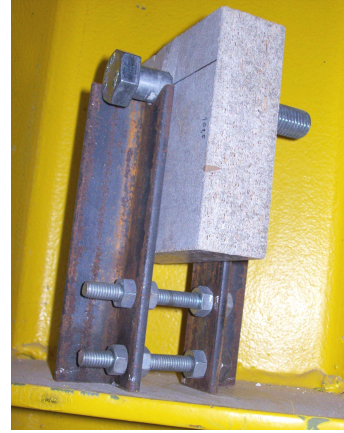
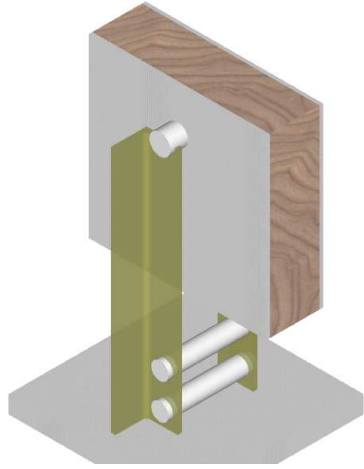


Figura 36 – Provette do tipo *E*.

Optou-se por usar parafusos da classe 8.8 com diâmetros 12 mm e 16 mm, com as várias distâncias (*D*), entre o centro do parafuso e o bordo carregado, ver Tabela 8. O esquema de ensaio dos provetes encontra-se indicado na Figura 37. O ensaio foi efectuado com controlo de deslocamento tal como os anteriores.

Parafuso	D [mm]			
<b>M12</b>	-	40	56	72
<b>M16</b>	24	40	56	72

Tabela 8 – Distâncias *D* entre o centro do parafuso e o bordo carregado.



**Figura 37 – Esquema de ensaio dos provetes ao esmagamento em ligações aparafusadas.**

## 4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

### 4.1. Ensaio à compressão uniaxial dos provetes do tipo *P*

Os provetes do tipo *P1*, quando solicitados na face lisa (compressão na direcção perpendicular ao plano do painel de CBPB) têm um comportamento dúctil, como se mostra na Figura 38. É como se existissem três materiais em série (as duas superfícies lisas do painel, com maior densidade de cimento, e o núcleo, com maior densidade de partículas de madeira). No pós rotura os provetes apresentam vários destacamentos (Figura 38).

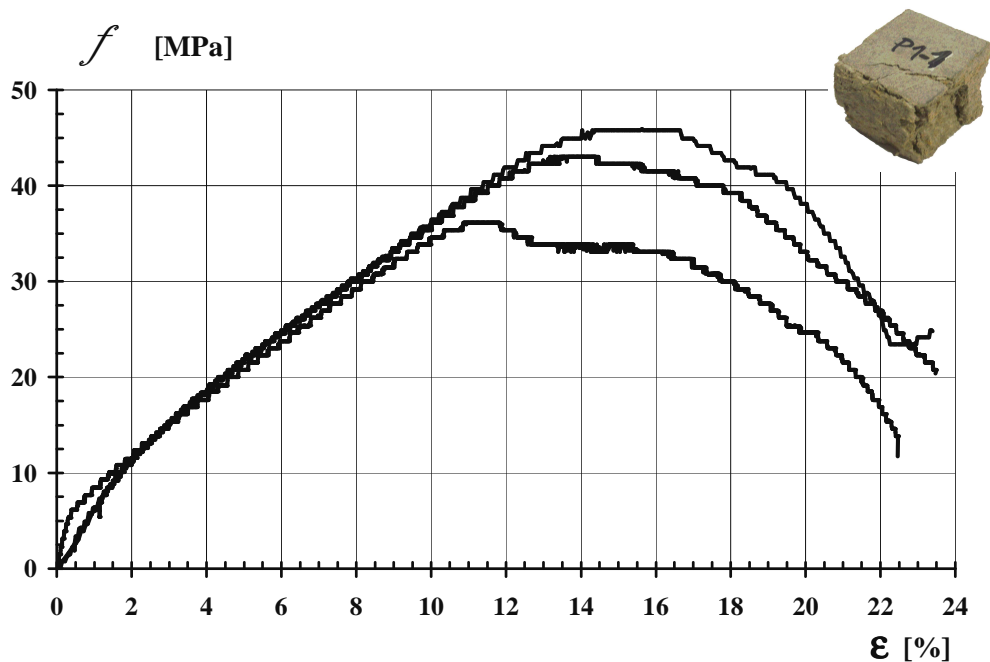
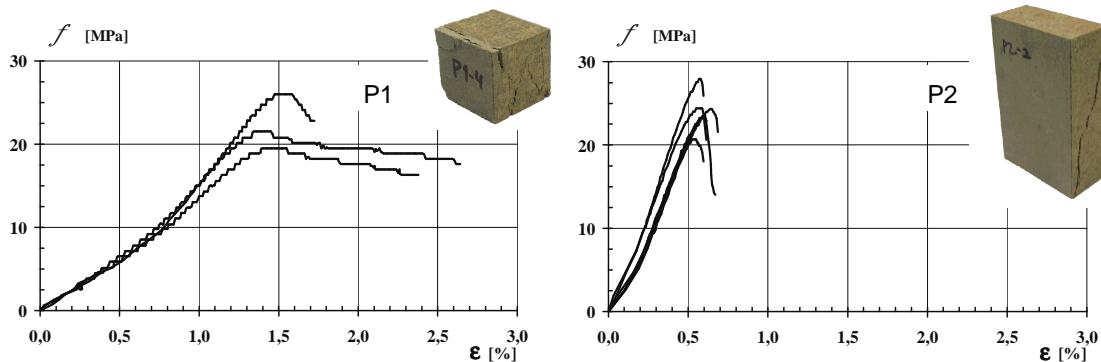


Figura 38 – Diagrama tensão - extensão, à compressão, dos provetes do tipo *P1* solicitados na face lisa.

Quando os provetes *P1* e *P2* são solicitados na face rugosa (compressão paralela ao plano do painel), o CBPB é mais rígido comparativamente à situação anterior (compressão na direcção perpendicular ao plano do painel de CBPB), ver Figura 38 e Figura 39. Neste caso, contrariamente à situação anterior, os três materiais estão em paralelo sendo a resposta dada pelo conjunto destes. A explicação para o facto da resistência ser maior quando o provete é solicitado na face lisa, do que na face rugosa, é devida a que, na primeira situação, as aparas de madeira estão predominantemente direccionadas no plano perpendicular à carga (plano do painel de CBPB). Assim, as aparas resistem às tracções originadas pela compressão.

Os provetes solicitados na face rugosa apresentam fendas sem delaminação do material e um comportamento menos dúctil que quando solicitados na face lisa, ver Figura 39.



**Figura 39 – Diagrama tensão - extensão, à compressão, dos provetes do tipo *P1* e *P2* solicitados na face rugosa.**

Comparando os diagramas tensão-extensão dos provetes tipo *P1* e *P2* constata-se que os módulos de elasticidade dos provetes *P2* com uma relação altura/espessura ( $h/t$ ) = 3,125 são superiores aos dos provetes *P1* com uma relação altura/espessura ( $h/t$ ) = 1. Tal situação está em parte relacionada com o modo de rotura observado (Figura 39). Enquanto nos provetes *P1* a rotura que ocorre é uma rotura típica de um cubo, em que, apesar de existirem três materiais distintos a trabalharem em paralelo, a rotura acaba por ser condicionada pelo núcleo. No caso dos provetes *P2* a fissura que se forma é na diagonal e vai de face a face dos provetes, indiciando que o comportamento dos provetes está condicionado pelo comportamento do material das suas faces, o qual é mais rígido e menos deformável que o material do núcleo, o que origina a que os provetes *P2* apresentem um módulo de elasticidade mais elevado.

#### **4.2. Ensaios à compressão uniaxial dos provetes do tipo C**

Todos os provetes do tipo C foram solicitados na face rugosa. À medida que a esbelteza aumenta a rotura apresenta-se com delaminação, que por vezes chega a dividir o provete em dois elementos distintos.

Da Figura 40 à Figura 52 são apresentados os diagramas tensão-extensão dos ensaios à compressão dos provetes do tipo C e na Tabela 9 indicam-se os valores médios da tensão de rotura à compressão ( $f_{máx}$ ), respectiva extensão ( $\epsilon_{f_{máx}}$ ) e o módulo de elasticidade ( $E$ ) de cada tipo de provete.

#### 4.2.1. Provete do tipo C1

Da Figura 40 à Figura 42 são apresentados os diagramas tensão–extensão dos ensaios à compressão dos provetes de secção rectangular do tipo C1 ( $h \times 100 \times 32 \text{ mm}^3$ ). Em geral, os resultados das tensões máximas encontram-se entre os 20 MPa e os 30 MPa.

No entanto, no caso particular dos provetes C1-A, estes tiveram um comportamento ligeiramente diferente dos restantes provetes do tipo C1 após rotura, não apresentando uma rotura tão frágil quanto os outros (Figura 40). Também é de salientar os resultados obtidos com os provetes do tipo C1-E e C1-F, onde, com o aumento da esbelteza, a tensão máxima mantém-se no intervalo 20 – 30 MPa.

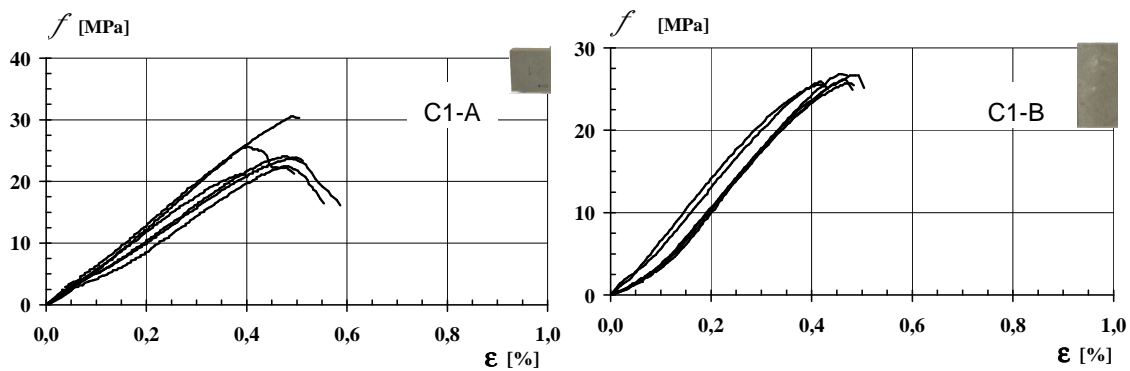


Figura 40 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo C1-A ( $h=100 \text{ mm}$ ) e C1-B ( $h=200 \text{ mm}$ ).

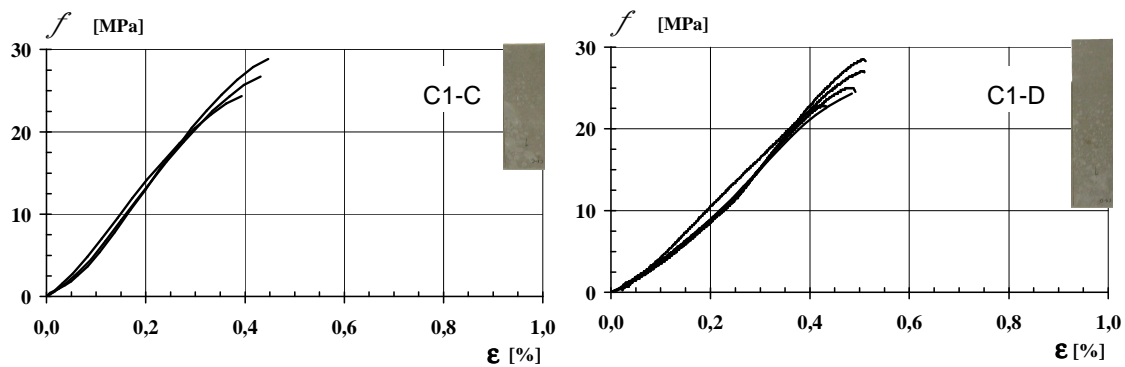


Figura 41 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo C1-C ( $h=300 \text{ mm}$ ) e C1-D ( $h=400 \text{ mm}$ ).

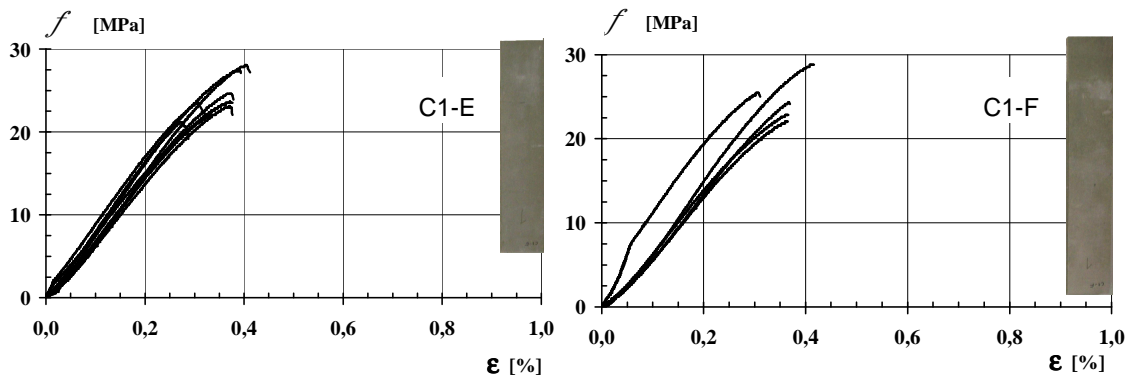


Figura 42 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo C1-E (h=500 mm) e C1-F (h=600 mm).

Em suma, os resultados dos ensaios à compressão uniaxial dos provetes do tipo C1 apresentados na Figura 43 oscilaram, relativamente ao módulo de elasticidade, entre os 5,67 GPa e os 8,71 GPa e a tensão máxima resistente entre os 20 MPa e os 30 MPa.

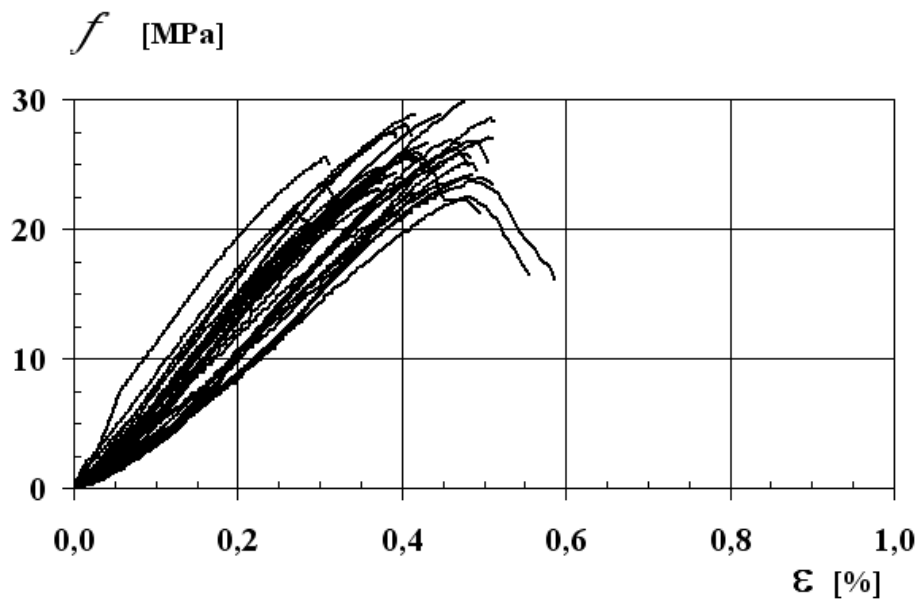


Figura 43 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo C1.

#### 4.2.2. Provete do tipo C2

Na Figura 44 apresentam-se os diagramas tensão-extensão dos ensaios à compressão dos provetes de secção rectangular tipo C2 ( $300 \times 100 \times (2 \times 32) \text{ mm}^3$ ).

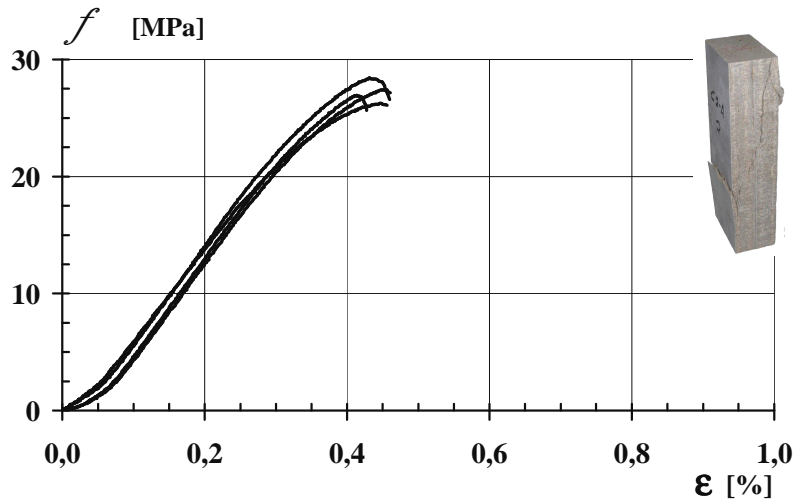


Figura 44 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo C2-C ( $h=300 \text{ mm}$ ).

Relativamente ao provete C1-C, o provete C2-C contém mais uma placa acoplada. Comparando os resultados dos provetes C2-C com os dos provetes C1-C, não se nota nenhuma alteração, tanto da resistência como da rigidez. Por outro lado, tal resultado indicia que o facto de se ter duas placas acopladas com poliuretano não influencia as características mecânicas do CBPB quando solicitado à compressão uniaxial.

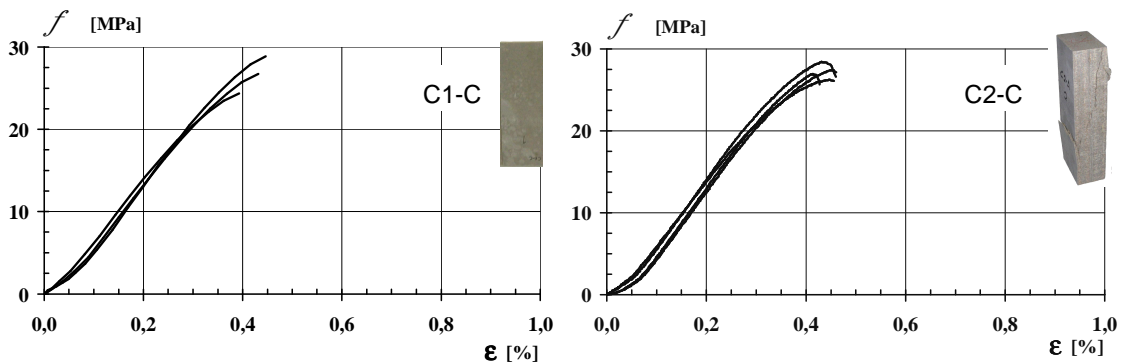


Figura 45 - Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo C1-C e C2-C.

#### 4.2.3. Provete do tipo C3

Na Figura 46 apresentam-se os diagramas tensão-extensão dos ensaios de compressão dos provetes de secção rectangular tipo C3-A ( $100 \times 100 \times (3 \times 32) \text{ mm}^3$ ).

Os resultados das tensões máximas dos provetes do tipo C3 encontram-se entre os 20 MPa e os 30 MPa, conforme se pode observar na Figura 46 e na Figura 47.

Os provetes do tipo C3 mantêm o mesmo comportamento obtido com os provetes do tipo C1-A, C1-B e C1-C. O provete do tipo C3-A (Figura 46), tal como no provete C1-A, apresenta um comportamento mais dúctil após atingir a tensão máxima. Após a tensão máxima, a resistência do CBPB tende para valores da ordem dos 15 MPa.

Nos provetes C3-A, possivelmente devido às suas dimensões, o modo de rotura observado é ligeiramente diferente dos restantes uma vez que as fissuras acabam por se concentra em cada placa ao contrário dos provetes C3-B e C3-C em que as fissuras que se observam na rotura atravessam na diagonal as três placas de CBPB.

Este tipo de provete também indica que as placas de CBPB ligadas com poliuretano não influenciam significativamente as características mecânicas do CBPB.

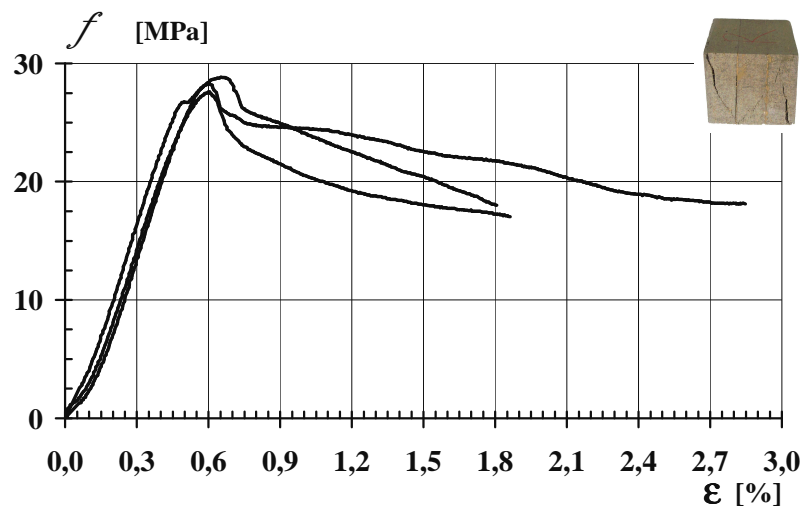


Figura 46 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo C3-A ( $h=100 \text{ mm}$ ).

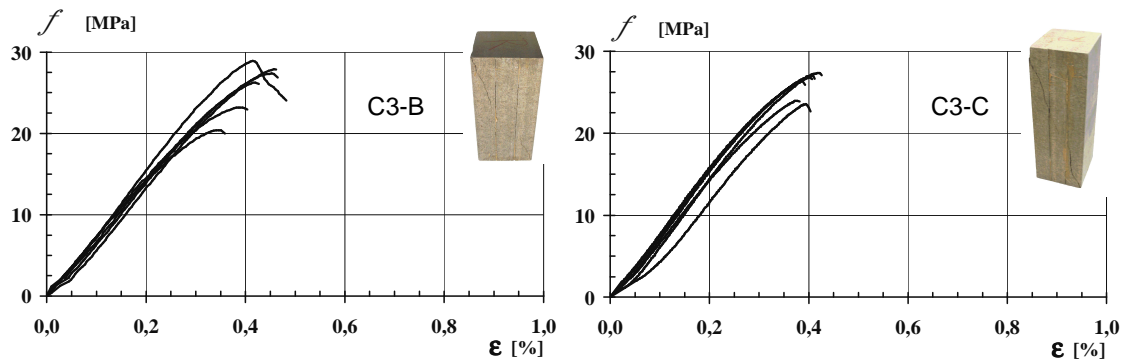


Figura 47 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo C3-B (h=200 mm) e C3-C (h=300 mm).

#### 4.2.4. Provete do tipo C4

Na Figura 48 apresentam-se os diagramas tensão-extensão dos ensaios de compressão dos provetes de secção em L do tipo C4-A (100x100x32 mm<sup>3</sup>).

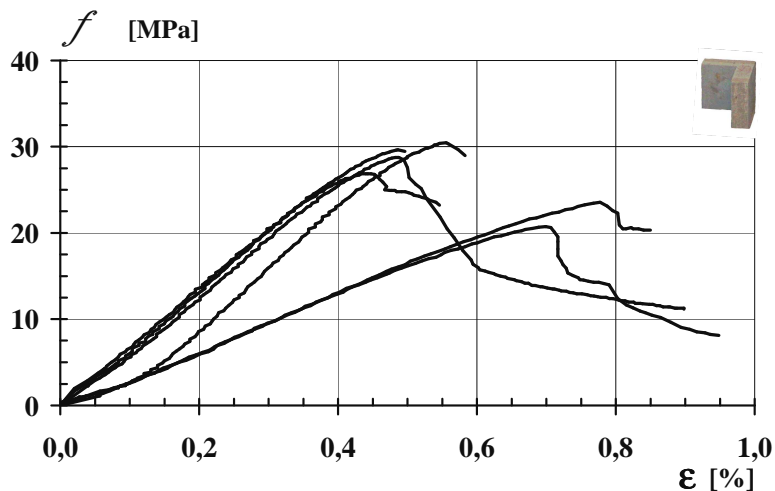


Figura 48 – Diagrama tensão – extensão dos provetes do tipo C4-A (h=100 mm).

No geral, nos provetes do tipo C4 (Figura 48 a Figura 50) a tensão máxima oscila em torno dos 20 MPa. Em comparação com os resultados relatados anteriormente, este tipo de secção resiste menos.

Tal como no caso dos provetes C1-A e C3-A, o provete C4-A tem, relativamente aos provetes do mesmo tipo (C4), um comportamento diferente após rotura. Para além disso, os resultados obtidos com os provetes C4-A têm alguma discrepância em termos de comportamento, ver Figura 48.

No caso dos provetes colados com resina epóxida (C4-D e C4-F), no geral, a rotura destes implicou o desacoplamento das placas que os constituem.

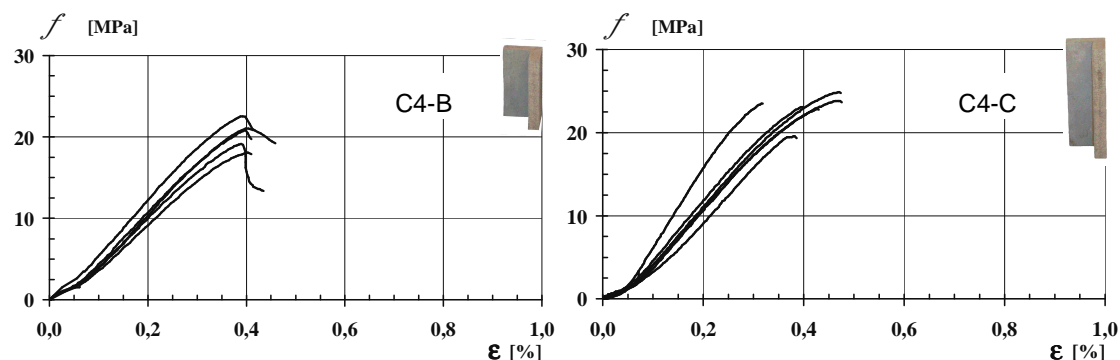


Figura 49 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo C4-B (h=200 mm) e C4-C (h=300 mm).

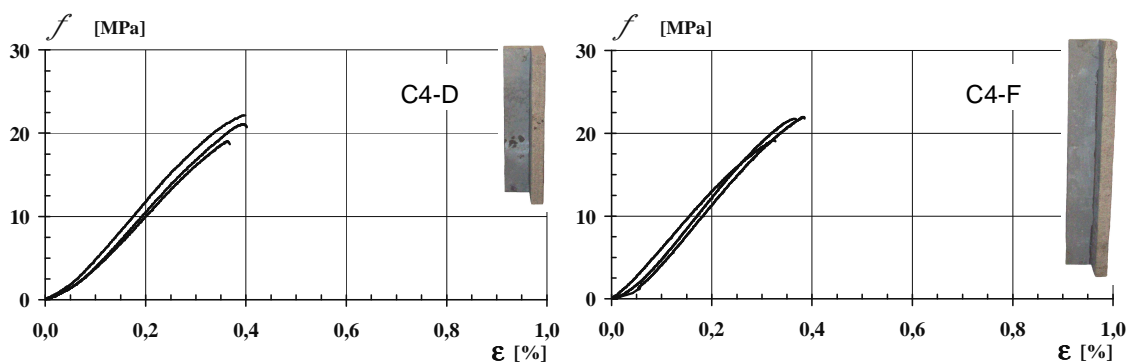


Figura 50 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo C4-D (h=400 mm) e C4-F (h=500 mm).

#### 4.2.5. Provede do tipo C5

Na Figura 51 apresentam-se os diagramas tensão-extensão dos ensaios à compressão dos provetes de secção quadrangular do tipo C5-A (100x100x100 mm<sup>3</sup>).

Os resultados dos provetes do tipo C5, tal como foi referido anteriormente para os provetes do tipo C1, C2 e C3, relativamente à resistência, obtiveram uma resistência a rondar os 20 MPa – 30 MPa, ver Figura 51 e Figura 52.

Os provetes do tipo C5-A apresentam um comportamento mais dúctil que os restantes provetes desta série um pouco à semelhança do que aconteceu com os provetes das outras séries com 100 mm de altura. Após a rotura a tensão resistente dos provetes C5-A tendem para um valor a rondar os 10 MPa, ver Figura 51.

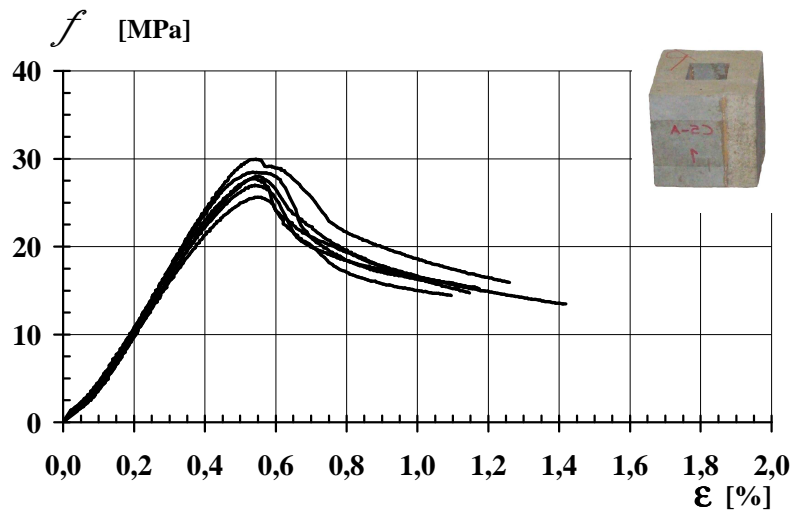


Figura 51 – Diagrama tensão - extensão, dos provetes do tipo C5-A (h=100 mm).

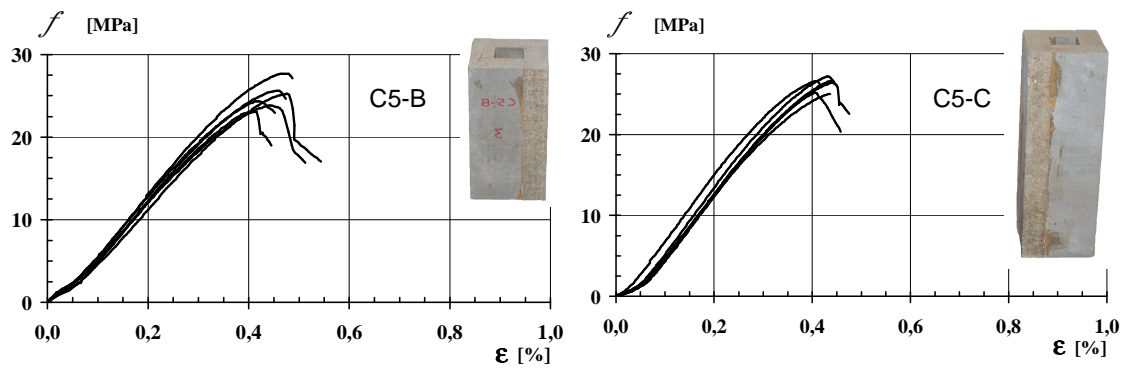


Figura 52 – Diagrama tensão - extensão dos provetes do tipo C5-B (h=200 mm) e C5-C (h=300 mm).

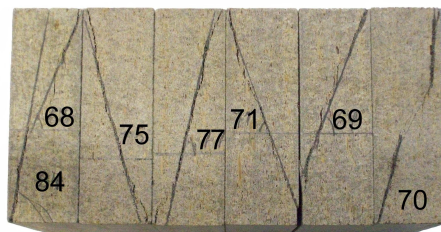
Na Tabela 9 apresentam-se os valores médios da tensão de rotura à compressão ( $f_{m\acute{a}x.}$ ), a respectiva extensão média na rotura ( $\epsilon_{f_{m\acute{a}x.}}$ ), bem como o módulo de elasticidade médio ( $E_m$ ) para cada tipo de provete.

Provete	$f_{\text{máx.}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{fmáx}}$	$E_m$ [GPa]
C1 - A	24,6	0,45	6,24
C1 - B	26,1	0,46	7,33
C1 - C	26,7	0,42	7,75
C1 - D	25,1	0,48	6,50
C1 - E	24,1	0,35	8,00
C1 - F	24,7	0,36	8,01
C2 - C	24,8	0,49	7,29
C3 - A	28,2	0,63	6,39
C3 - B	25,7	0,42	7,35
C3 - C	25,9	0,40	7,89
C4 - A	26,7	0,58	5,91
C4 - B	20,5	0,40	6,31
C4 - C	23,0	0,41	7,28
C4 - D	20,7	0,39	6,72
C4 - F	20,9	0,36	7,19
C5 - A	27,8	0,55	6,56
C5 - B	25,0	0,45	7,06
C5 - C	26,2	0,43	7,85
Média	24,8	0,45	7,09

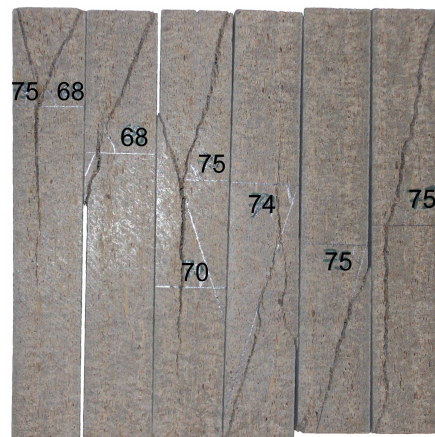
**Tabela 9 – Valores médios da tensão de rotura, respectiva extensão e do módulo de elasticidade, à compressão.**

À medida que a esbelteza dos provetes aumenta a rotura passa a ser localizada e menos dúctil, com o plano de corte (Figura 53 a Figura 58) a não variar muito de inclinação. Neste sentido, fez-se o levantamento dos ângulos de rotura dos provetes do tipo C1, os quais são apresentados na Tabela 10.

O plano de rotura é sempre aquele que apresenta um menor ângulo com o plano do painel de CBPB (Figura 53 a Figura 58).



**Figura 53 – Ângulos de rotura dos provetes C1-A.**



**Figura 54 – Ângulos de rotura dos provetes C1-B.**

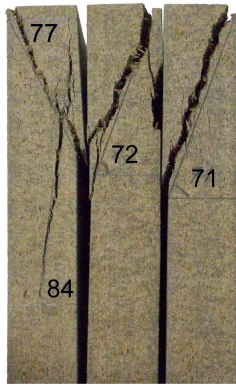


Figura 55 – Ângulos de rotura dos provetes C1-C.

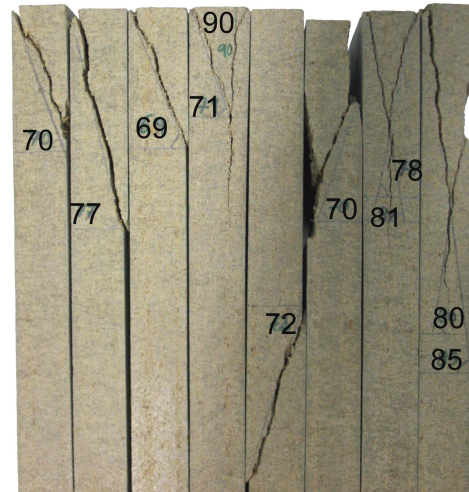


Figura 57 – Ângulos de rotura dos provetes C1-D.



Figura 56 - Ângulos de rotura dos provetes C1-E.

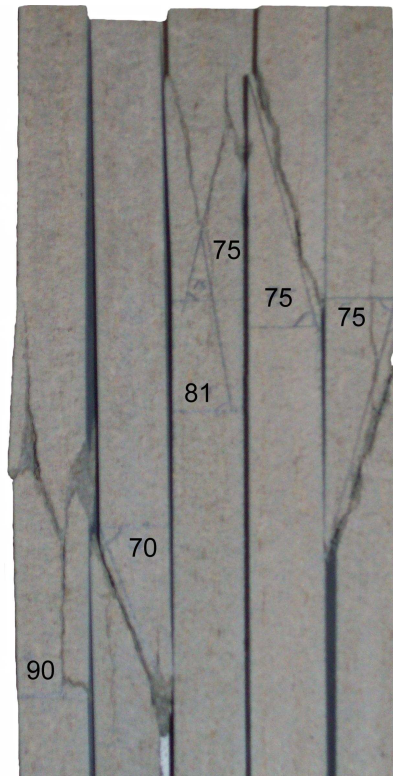


Figura 58 – Ângulos de rotura dos provetes C1-F.

Provete		$\angle$ [°]			
C1-A	1	65	83	68	84
	2		75		72
	3		77		76
	4		71		69
	5	70	75		69
	6		71		70
C1-B	1	68	75	70	71
	2		68		75
	3	75	70		73
	4		74	67	73
	5		75		64
	6		75		69
C1-C	1		71		63
	2		72		73
	3	84	77	70	85
C1-D	1		63		70
	2		71		77
	3		Indefinido		69
	4	73	80	71	90
	5		68		72
	6		83		70
	7	74	86	78	81
	8		74	80	85
C1-E	1	78	84		66
	2		73		77
	3		Indefinido		73
	4	65	82		77
	5	68	78	70	83
	6		79	68	80
	7		70		Indefinido
	8		80		80
	9		70		76
C1-F	1		82		90
	2		77		70
	3	76	78	75	81
	4		75		85
	5		75		75

Tabela 10 – Ângulos de rotura, com o plano perpendicular ao plano do painel, em graus.

### 4.3. Ensaio ao corte de ligações coladas

Os resultados dos ensaios ao corte são apresentados na Tabela 11. A rotura dos provetes deu-se pela zona de colagem e o andamento do diagrama força-deslocamento (Figura 59) foi condicionado por esta. Aparentemente, após a rotura da ligação, os elementos de CBPB não apresentaram quaisquer danos e mantiveram-se acoplados, Figura 60.

Proвете	$F_{\text{máx.}}$ [kN]	$\tau$ [MPa]
A-1	28,46	5,16
A-2	20,09	4,26
A-3	27,75	5,15
A-4	29,90	5,18
A-5	21,89	3,89
A-6	26,31	4,75

Nota: a tensão de corte,  $\tau$ , foi determinada com base na área de colagem teórica das placas de CBPB, o que não corresponde necessariamente à área efectiva de colagem por haver zonas com vazios, isto é, a colagem não preenche toda a área ficando algumas zonas com vazios. Considera-se que este facto é uma condicionante deste tipo de ligação.

Tabela 11 – Valores das forças e das tensões máximas dos ensaios ao corte.

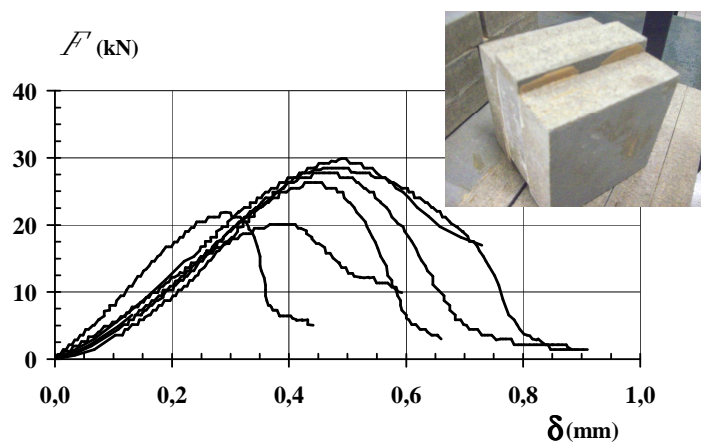


Figura 59 – Diagrama força - deslocamento dos ensaios ao corte dos provetes do tipo A.



Figura 60 – Modo de rotura do provete A.

#### 4.4. Ensaio ao esmagamento em ligações aparafusadas

Os resultados dos ensaios ao esmagamento das ligações aparafusadas são apresentados de seguida. Os parafusos utilizados foram do tipo *M12* e *M16* e da classe 8.8, e as diferentes distâncias ao bordo carregado, encontram-se indicadas na Tabela 8.

A parte inicial dos diagramas força-deslocamento, da Figura 61 à Figura 67, traduzem a adaptação do parafuso ao furo do provete. Após se atingir a carga máxima, a força decresceu gradualmente à medida que o deslocamento continuou a aumentar. Tanto com o parafuso *M16* como com o *M12*, o modo de rotura variou em função da distância ao bordo carregado (*D*).

- Ensaio com parafuso *M16*

Na Figura 61 são apresentados os diagramas força-deslocamento dos ensaios com uma distância *D* de 24 mm e 40 mm. Nestes dois casos, os provetes apresentaram fendas na face carregada (apoio), perpendicular ao plano do painel de CBPB (Figura 62), sendo maiores para a distância *D* de 24 mm.

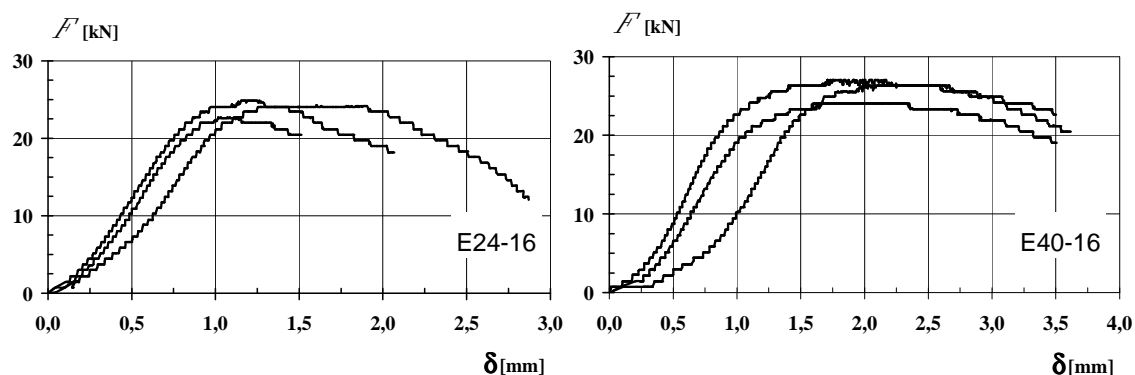


Figura 61 – Diagrama força - deslocamento dos ensaios ao esmagamento (*E24-16* e *E40-16*) com uma distância ao centro do parafuso (*M16*) ao bordo carregado de 24 mm e 40 mm.



Vista lateral



Vista superior

Figura 62 – Modo de rotura do provete *E24-16-2*.

Nos restantes casos, para a distância  $D$  de 56 mm e 72 mm (Figura 63), não se observaram fendas na face carregada havendo um maior destacamento da superfície com maior densidade de cimento, conforme se pode observar na Figura 64.

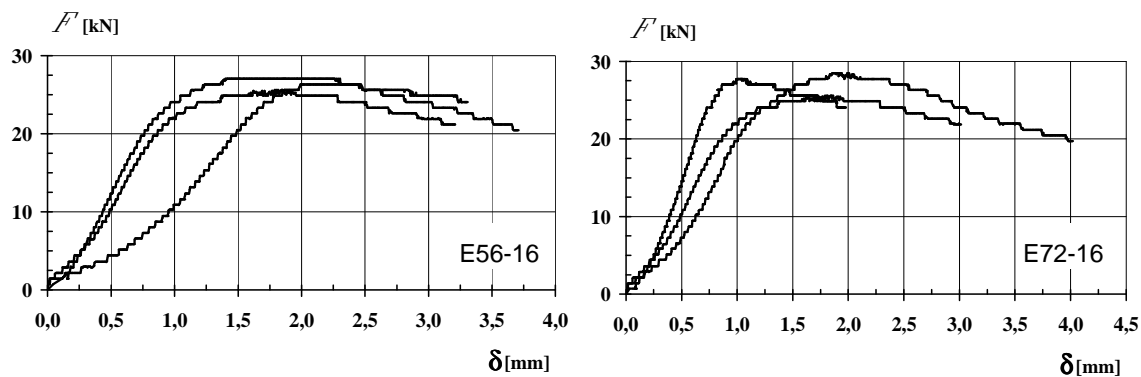


Figura 63 – Diagrama força - deslocamento do ensaio ao esmagamento ( $E56-16$  e  $E72-16$ ) com uma distância ao centro do parafuso ( $M16$ ) ao bordo carregado de 56 mm e 72 mm.



Vista lateral



Vista superior

Figura 64 – Modo de rotura do provete  $E56-16-3$ .

- Ensaio com parafuso *M12*

À semelhança dos ensaios com o parafuso *M16*, para a distância *D* de 40 mm (Figura 65), a rotura apresentou fendas na face carregada (apoio), conforme se pode observar na Figura 66.

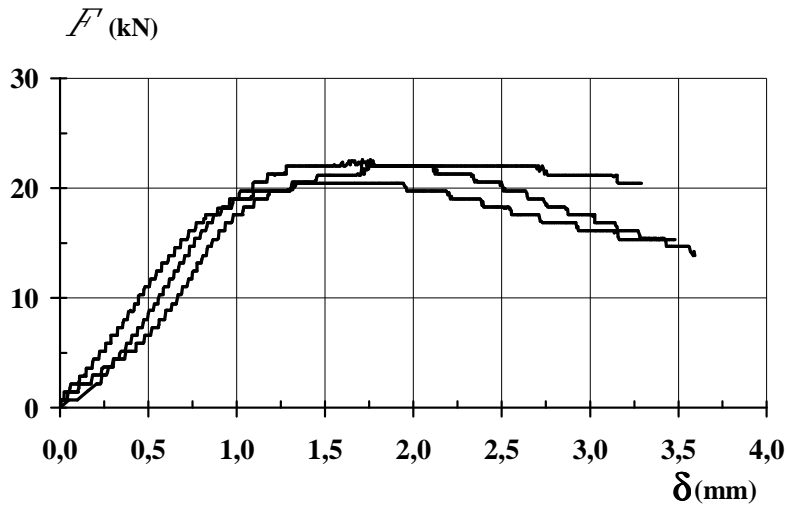


Figura 65 – Diagrama força - deslocamento dos ensaios ao esmagamento (*E40-12*) com uma distância ao centro do parafuso (*M12*) ao bordo carregado de 40 mm.



Vista lateral



Vista superior

Figura 66 – Modo de rotura do provete *E40-12-1*.

Os ensaios com uma distância *D* de 56 mm e 72 mm (Figura 67) mantiveram a regra, relativamente aos ensaios com o parafuso *M16*. Apresentando destacamentos da superfície com maior densidade de cimento, conforme se pode verificar na Figura 68.

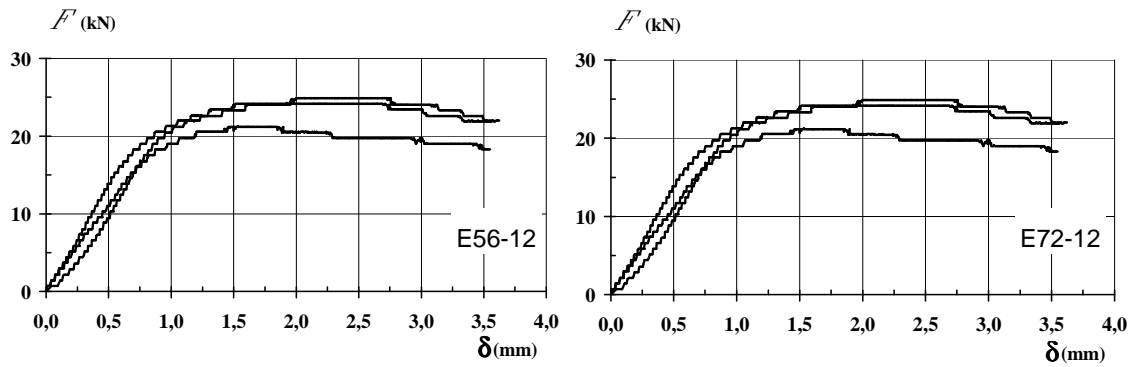


Figura 67 – Diagrama força - deslocamento dos ensaios ao esmagamento (E56-12 e E72-12) com uma distância ao centro do parafuso (M12) ao bordo carregado de 56 mm e 72 mm.



Vista lateral



Vista superior

Figura 68 – Modo de rotura do provete E72-12-1.

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1. Ensaio à compressão uniaxial

No capítulo anterior descreveu-se o comportamento observado durante a realização dos ensaios e apresentou-se o andamento dos diagramas tensão – extensão dos provetes, tipo *P* e *C*, ensaiados.

Neste capítulo pretende-se fazer uma análise global dos resultados anteriormente descritos tendo em atenção as variáveis definidas no início deste estudo: a face de solicitação dos provetes, a altura, a largura e a esbelteza dos provetes, o número de placas de CBPB, a forma do provete e o tipo de colagem entre chapas de CBPB.

#### 5.1.1. Efeito da face de solicitação dos provetes

Numa primeira abordagem, e com base nos resultados obtidos com os provetes do tipo *P1*, era de esperar que a rigidez à compressão do CBPB fosse mais baixa quando o provete fosse solicitado na face lisa (face perpendicular ao plano do painel de CBPB), o que de facto se veio a verificar. Sendo, nesta direcção, módulo de elasticidade médio de 0,28 GPa, valor que corresponde apenas a 14% do valor médio do módulo de elasticidade na outra direcção (1,99 GPa). Ao contrário da rigidez, a tensão de rotura foi 86% superior quando solicitado na face lisa, relativamente à outra face, tendo o valor médio de 41,7 MPa (Tabela 12). Como referido na secção 4.1, o facto de a resistência ser maior quando o provete se encontra solicitado na face lisa é devido ao posicionamento das partículas de madeira que são, predominantemente, perpendiculares à direcção da carga.

Face solicitada	Provete	E [GPa]	$f_{máx.}$ [MPa]
Face lisa	P1-1	0,29	45,8
	P1-2	0,28	43,0
	P1-3	0,28	36,1
	Média	0,28	41,7
Face rugosa	P1-4	2,55	26,0
	P1-5	1,87	21,5
	P1-6	1,55	19,5
	Média	1,99	22,4

Tabela 12 – Resultados dos ensaios à compressão dos provetes do tipo *P1*.

### 5.1.2. Efeito da altura dos provetes

Quanto à altura dos provetes do tipo C, como se pode observar na Figura 69, a tensão máxima resistente à compressão tende a diminuir com o aumento da altura dos provetes de igual secção. No entanto, este efeito é menor no caso dos provetes do tipo C1 e maior no caso dos provetes do tipo C4.

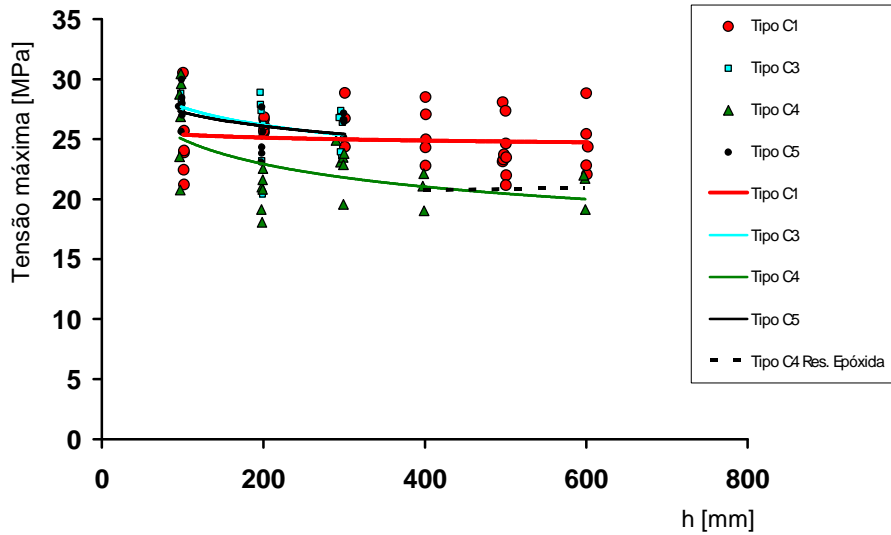


Figura 69 – Influência da altura dos provetes na tensão máxima resistente.

De outro ponto de vista, a altura de um provete influencia a sua esbelteza. Assim, para se verificar o efeito da esbelteza (através da variação da altura) nas características do CBPB, na Figura 70 definiu-se curvas de tendência dos provetes do mesmo tipo (com a mesma inércia/área). Pode-se constatar que a tensão máxima resistente à compressão, entre provetes do mesmo tipo, tende a diminuir com a esbelteza, nomeadamente os provetes do tipo C4.

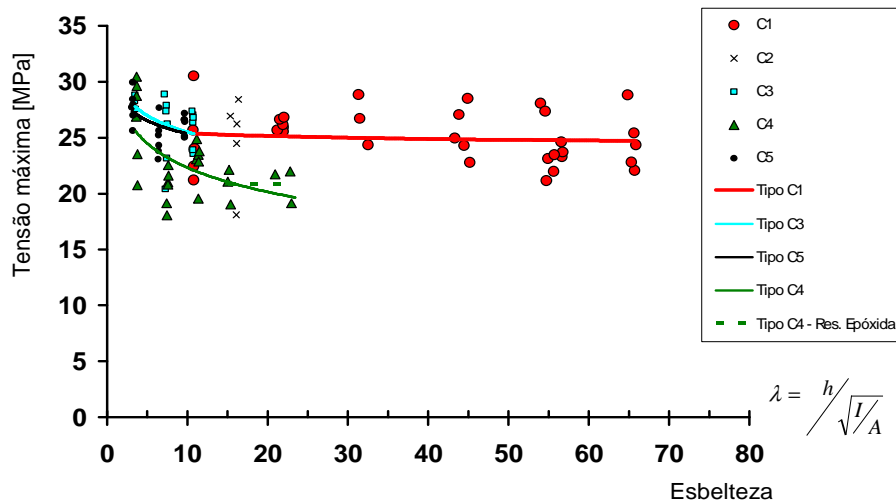


Figura 70 – Influência da esbelteza dos provetes na tensão máxima resistente

Ao contrário do que acontece relativamente à tensão máxima resistente à compressão, o módulo de elasticidade tende a aumentar com a altura  $h$ . Pode-se dizer que esta tendência é idêntica para qualquer tipo de provete e de colagem.

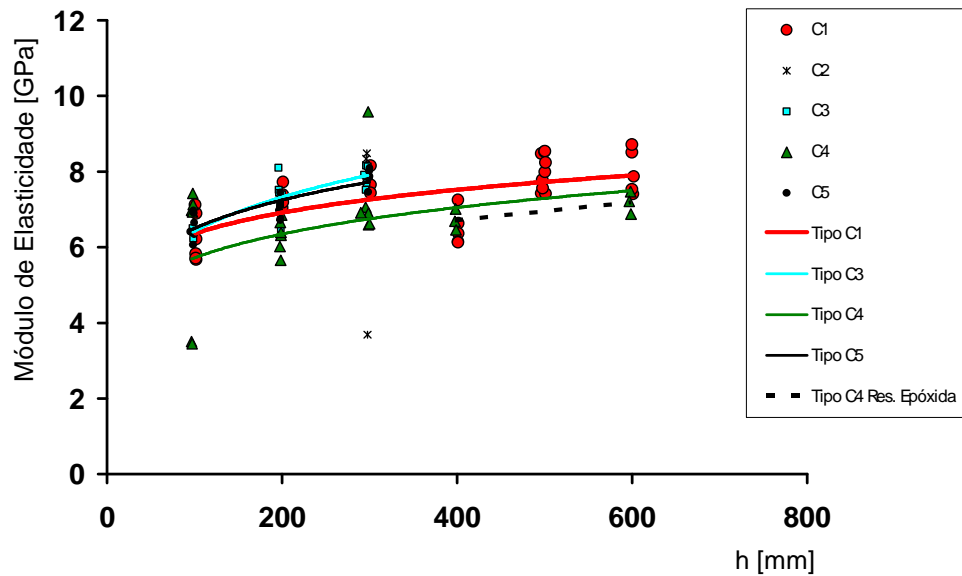


Figura 71 – Influência da altura dos provetes no módulo de elasticidade.

Relativamente ao módulo de elasticidade, o efeito é o oposto ao indicado na Figura 70, o módulo de elasticidade aumenta com a esbelteza independentemente do tipo de provete (Figura 72).

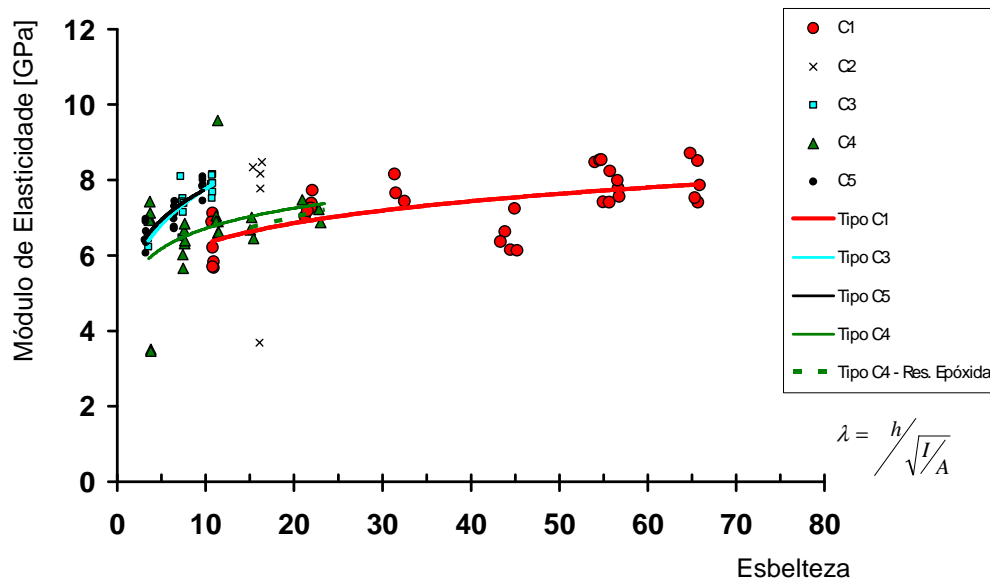


Figura 72 – Influência da esbelteza no módulo de elasticidade.

Em função dos diversos parâmetros analisados e independentemente da forma do provete (excluindo o provete do tipo C4) constata-se que a tensão de compressão diminui inicialmente de

28 MPa para 25 MPa para esbelteza entre 3 e 9, e torna-se aproximadamente constante (25 MPa) para valores da esbelteza até 65 (ver Figura 69 e Figura 70). Pelo contrário, o módulo de elasticidade varia em função da forma do provete, apresentando uma evolução ligeiramente crescente com o aumento da altura dos provetes (ver Figura 71 e Figura 72).

Os provetes do tipo *P2* (Tabela 13) com uma relação altura/espessura ( $h/t$ ) = 3,125 apresentam módulos de elasticidade 162% superiores aos do tipo *P1* (Tabela 12) com uma relação altura/espessura ( $h/t$ ) = 1. Já em relação à tensão de rotura, os valores têm a mesma ordem de grandeza, como se pode observar na Tabela 12 e na Tabela 13.

Tal situação está em parte relacionada com o modo de rotura observado (Figura 73). Enquanto nos provetes *P1* a rotura que ocorre é uma rotura típica de um cubo, em que, apesar de existirem três materiais distintos a trabalharem em paralelo, a rotura acaba por ser condicionada pelo núcleo. No caso dos provetes *P2* a fissura que se forma é na diagonal e vai de face a face dos provetes, indiciando que o comportamento dos provetes está condicionado pelo comportamento do material das suas faces o qual é mais rígido e menos deformável que o material do núcleo, o que origina a que os provetes *P2* apresentem um módulo de elasticidade mais elevado.

Assim sendo, se se pretender determinar o valor da tensão de rotura e o correspondente módulo de elasticidade devido a um fenómeno local de esmagamento, os provetes do tipo *P1* são os mais indicados para esta caracterização. No caso geral, em que as pormenorizações construtivas evitam este tipo de fenómeno local, a caracterização do CBPB com a solicitação na face rugosa, é melhor efectuada através dos provetes do tipo *P2*, relativamente aos provete do tipo *P1* (Figura 73), conforme se pode confirmar através da maior amostragem de resultados dos provetes do tipo *C*, ver Tabela 9. No entanto, os provetes do tipo *P2* não caracterizam suficientemente o CBPB, devido a alguma discrepância de resultados no que diz respeito ao módulo de elasticidade entre estes e os provetes do tipo *C* (Tabela 14).

Face solicitada	Provete	E [GPa]	$f_{m\acute{a}x.}$ [MPa]
Face rugosa	P2-1	5,05	24,3
	P2-2	5,26	24,4
	P2-3	5,06	23,5
	P2-4	5,19	23,3
	P2-5	4,86	20,7
	P2-6	5,91	28,0
	Média	5,22	24,0

**Tabela 13 – Resultados dos ensaios dos provetes do tipo *P2* (face rugosa).**

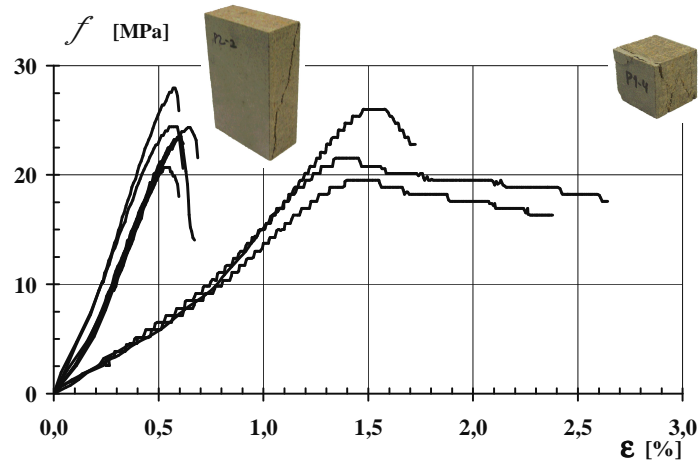


Figura 73 – Comparação entre provetes do tipo P1 e P2 com solicitação na mesma face.

### 5.1.3. Efeito da esbelteza dos provetes

Os provetes do tipo C apresentaram vários modos de rotura em função da sua esbelteza em que, aparentemente, a tensão máxima mantém-se, tal como o módulo de elasticidade do CBPB, ver Tabela 14 e ANEXO A. Como já foi referido, o efeito da esbelteza está relacionado com o efeito da altura, assim como o da forma.

Provete	$\lambda$	$f_{\text{máx.}}$ [MPa]	$E_m$ [GPa]
C1-A	10,8	24,6	6,24
C1-B	21,8	26,1	7,33
C1-C	31,8	26,7	7,75
C1-D	44,4	25,1	6,50
C1-E	55,5	24,1	8,00
C1-F	65,5	24,7	8,01
C2-C	16,1	24,8	7,29
C3-A	3,5	28,2	6,39
C3-B	7,3	25,7	7,35
C3-C	10,7	25,9	7,89
C4-A	3,7	26,7	5,91
C4-B	7,6	20,5	6,31
C4-C	11,3	23,0	7,28
C4-D	15,2	20,7	6,72
C4-F	22,7	20,9	7,19
C5-A	3,2	27,8	6,56
C5-B	6,4	25,0	7,06
C5-C	9,6	26,2	7,85

Tabela 14 - Valores médios da esbelteza, da tensão de rotura e do módulo de elasticidade.

#### 5.1.4. Efeito da forma do provete

A modificação da forma de um provete implica a alteração da inércia/área. Para observar o efeito da forma, definiu-se rectas de tendência de provetes com a mesma altura, como se pode ver na Figura 74. No fundo é demonstrado a influência da esbelteza na tensão máxima resistente à compressão onde, ao contrário da situação anterior, a esbelteza varia em função da inércia/área. Para os provetes com uma altura  $h$  de 500 mm não é possível tirar conclusões pois este é o único provete que tem a referida altura.

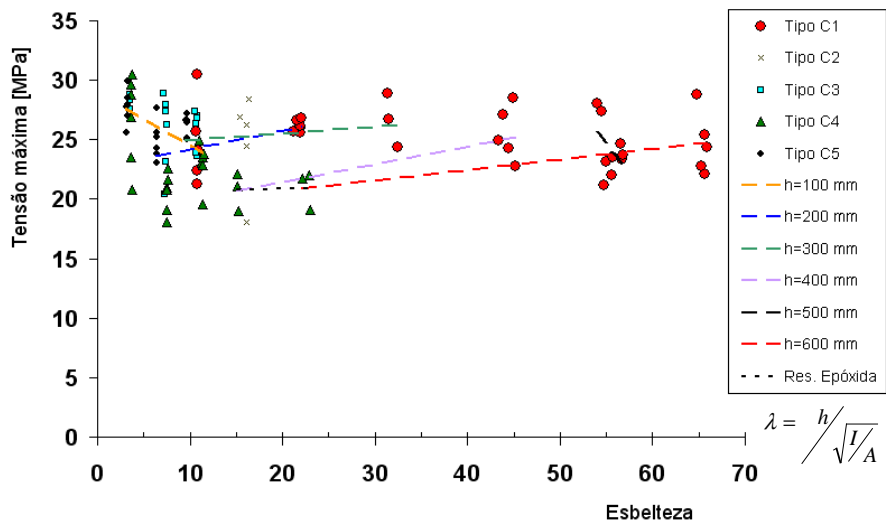


Figura 74 – Influência da forma dos provetes na tensão máxima através da esbelteza.

Relativamente ao módulo de elasticidade não há grandes variações em função da esbelteza (Figura 75).

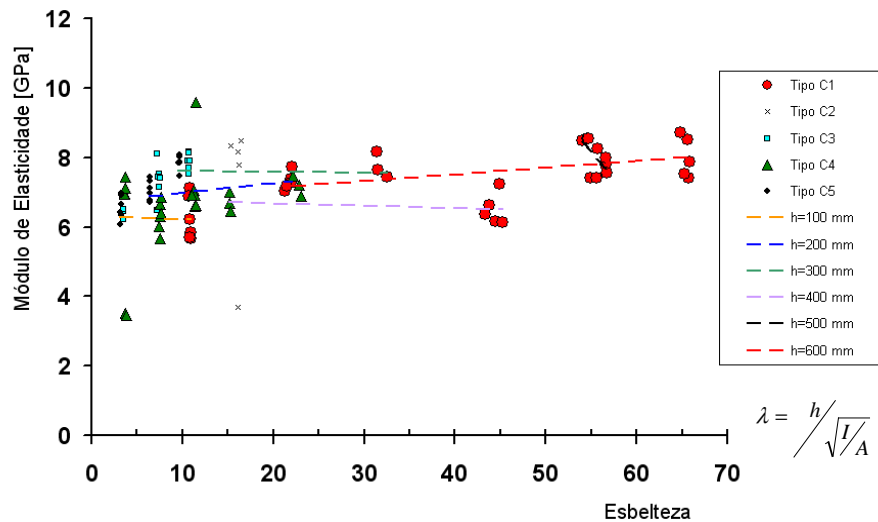


Figura 75 – Efeito das alturas dos provetes no módulo de elasticidade em função da esbelteza.

Exceptuando os provetes de altura igual a 100 mm ( $h=100$  mm) constata-se que o valor da tensão máxima, independentemente da altura dos provetes, tende para os 25 MPa. Já o módulo de elasticidade não apresenta uma convergência predominante para um valor. Em geral, o módulo de elasticidade tende a ser constante entre 6 GPa e 8 GPa.

Na Figura 76 é mostrado outro ponto de vista do efeito de forma, definindo-se a tendência das tensões resistentes em função do tipo de provete. Quanto à forma dos provetes do tipo C, os do tipo C1 apresentam um ligeiro decréscimo com o aumento da esbelteza. Os provetes tipo C3 e C5 também apresentam a mesma tendência mas de uma forma mais acentuada Figura 76.

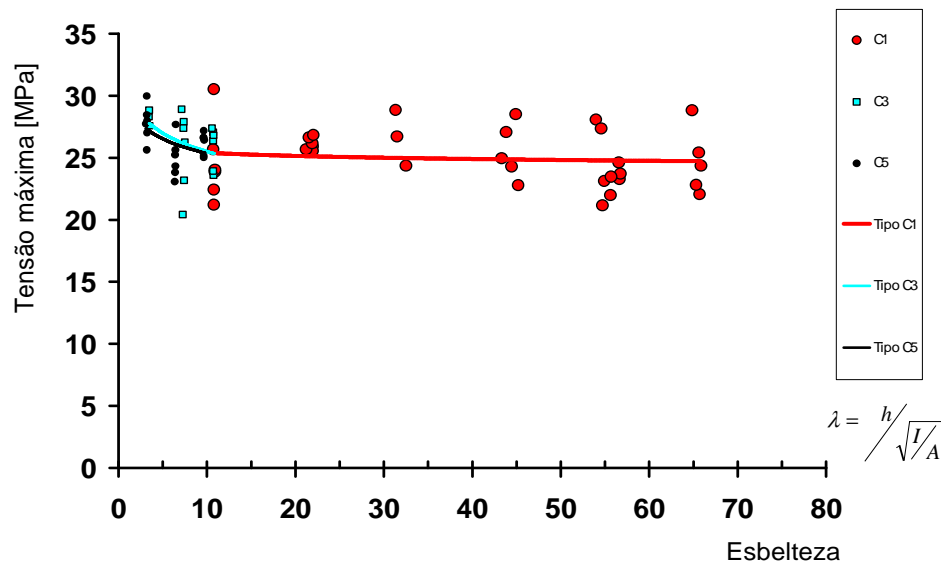


Figura 76 – Influência dos tipos de provetes na tensão máxima em função da esbelteza.

Relativamente ao módulo de elasticidade, na Figura 77 pode-se constatar que há uma tendência crescente com o aumento da esbelteza. Independentemente do tipo de provetes, os valores dos módulos de elasticidade encontram-se, no geral, entre 6 GPa e 8 GPa. Os provetes do tipo C3 e C5 apresentam a mesma tendência de uma forma mais acentuada, em função da esbelteza.

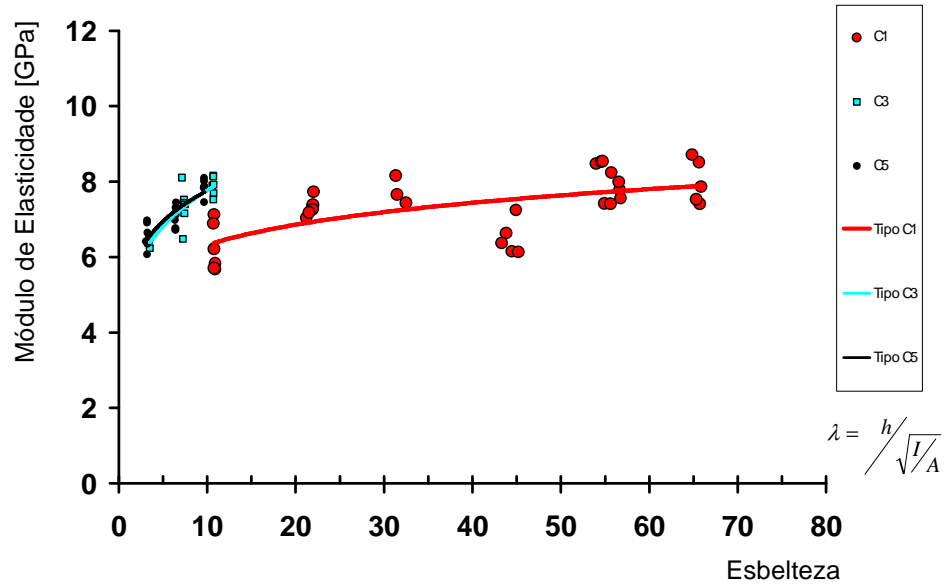


Figura 77 – Influência dos tipos de provetes no módulo de elasticidade em função da esbelteza.

#### 5.1.5. Modos de rotura observados nos provetes

Os modos de rotura observados nos ensaios dos provetes foram de 3 tipos:

- Rotura dúctil com resistência pós colapso;



Figura 78 – Provede C3-A (h=100 mm) ensaiado à compressão

- Rotura frágil nos topos;



Figura 79 – Provede C1-D (h=400 mm) ensaiado à compressão.

- Rotura local frágil devido aos efeitos de segunda ordem.



**Figura 80 – Provete C1-F (h=600 mm) ensaiado à compressão.**

Os ângulos de rotura que o CBPB apresenta permitem definir o tipo de rotura (frágil ou dúctil), isto é, para um determinado ângulo da superfície de rotura, se o plano de corte não intersectar a superfície com maior densidade de cimento a rotura será dúctil.

Em geral, todos os provetes com uma altura de 100 mm apresentaram uma rotura dúctil com alguma resistência pós rotura, ver Figura 40, Figura 46, Figura 48 e Figura 51. O andamento destes diagramas é semelhante aos obtidos pela Forest Products Laboratory (FPL) relativamente ao comportamento após rotura, como se pode constatar na Figura 14.

Os provetes tipo C3-C têm a mesma relação altura/espessura dos provetes tipo C1-A ( $h/t=3,125$ ) e, como tal, na generalidade dos ensaios, este deveria ter o mesmo comportamento após rotura, já para não falar do provete tipo C3-B que tem uma relação altura/espessura menor ( $h/t=2,083$ ).

Os provetes tipo C2-C ( $h/t=4,686$ ), tem uma rotura frágil pois tem o dobro da espessura e o triplo da altura do provete C1-A, logo o plano de rotura intersecta a face de cimento, ver Figura 81.

O provete C3-A, constituído por 3 provetes C1-A, permite que o ângulo de rotura não chegue à extremidade oposta do provete e assim poderá ter mais do que um plano de rotura, ver Figura 78.



**Figura 81 – Provete C2-C após ensaio à compressão.**

### 5.1.6. Características mecânicas do CBPB ensaiado

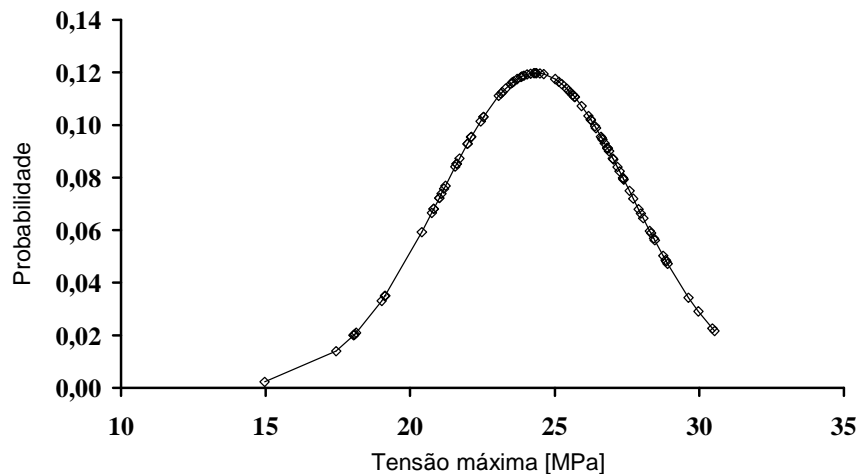
Com os vários ensaios realizados com os provetes do tipo C foi possível determinar a distribuição Normal das tensões máximas e respectivos módulos de elasticidade que são apresentados de seguida, ver Figura 82 e Figura 83. O módulo de elasticidade foi determinado entre os 30% e os 70% da tensão máxima, zona onde os diagramas apresentam uma razão entre a tensão e a extensão constante. Assim, determinaram-se os valores característicos ( $f_k=18,09$  MPa;  $E_k=5,70$  GPa), correspondentes ao quantilho de 5%, e médios da tensão rotura e módulo de elasticidade ( $f_m=24,36$  MPa;  $E_m=7,11$  GPa).

$f_k$ [MPa]	$f_m$ [MPa]
18,1	24,4

Tabela 15 – Valor característico e médio da tensão máxima à compressão.

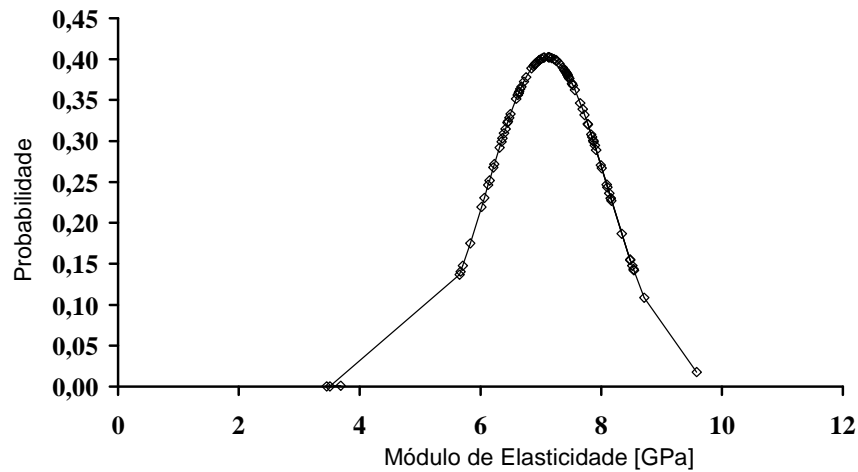
$E_k$ [GPa]	$E_m$ [GPa]
5,70	7,11

Tabela 16 – Valor característico e médio do módulo de elasticidade à compressão.



Nota: Com base nos vários provetes do tipo C (C1, C2, C3, C4 e C5)

Figura 82 – Distribuição Normal da resistência à compressão.



Nota: Com base nos vários provetes do tipo C (C1, C2, C3, C4 e C5)

**Figura 83 – Distribuição Normal do módulo de elasticidade à compressão.**

Ao comparar os resultados dos ensaios dos provetes *P2* com os ensaios dos provetes do tipo *C*, apesar da quantidade de resultados não ser equilibrada entre eles, é de salientar que há uma diferença significativa no módulo de elasticidade, como se pode observar na Tabela 13 e na Tabela 9.

Assim, para determinar correctamente as características mecânicas do material, o provete de ensaio deverá ter uma geometria semelhante à dos provetes do tipo *C* (100x100x32 mm<sup>3</sup>).

## 5.2. Ensaio ao corte de ligações coladas

As ligações com recurso à colagem por poliuretano apresentam uma resistência média ao corte de 25,73 kN a que corresponde uma tensão média de aderência de 4,73 MPa. Nestes casos a rotura deu-se pelo poliuretano, de forma progressiva, não tendo danificado a superfície com maior densidade de cimento da placa de CBPB, conforme se pode constatar na Figura 60.

A colagem através do poliuretano parece ser recomendável para as placas de CBPB devido ao facto de ser uma cola espessa, que se molda à superfície, ao contrário da resina epóxida. Como mencionado no capítulo anterior, no caso dos provetes *C4-D* e *C4-F*, a resina epóxida não permitiu efectuar a ligação das placas nas zonas onde estas apresentavam imperfeições.

### 5.3. Ensaio de esmagamento em ligações aparafusadas

No sentido de ajudar a compreender o comportamento na rotura ao esmagamento em ligações aparafusadas foi efectuada uma modelação dos ensaios através de elementos finitos utilizando o programa de cálculo automático SAP2000 [ 29 ]. Esta modelação foi efectuada considerando o comportamento elástico linear do material, elementos de membrana para simular o estado plano de tensão, sendo a discretização dos provetes apresentada nas figuras seguintes.

O furo foi simulado de forma aproximada através de um hexágono e em torno do mesmo refinou-se a discretização da malha de elementos finitos, tendo-se verificado a sua convergência (ver Figura 84 a Figura 87).

Em termos de restrições dos nós, considerou-se que todas as translações dos nós que se situavam na face carregada (apoio) se encontravam restringidas. Nos nós restantes foram restringidas a translação na direcção do eixo  $x$  e as rotações em torno dos eixos do plano (eixo  $y$  e  $z$ ).

A carga total aplicada na zona do furo (na direcção  $z$ ) foi de 26,7 kN, distribuída por sete nós, 2/3 para os três nós mais próximos da face carregada (apoio) e a restante carga nos outros quatro nós.

Na análise efectuada constatou-se que a energia dissipada aumenta com a distância entre o bordo carregado e o centro do elemento metálico ( $D$ ). Tal facto pode-se verificar nas situações extremas (E24-16 e E72-16), em que o bolbo de tensões envolve uma maior área, ver Figura 84 e Figura 85. Quanto maior for a distância  $D$ , mais uniformes são as tensões existentes no bordo, distribuindo-se em toda a largura do provete.

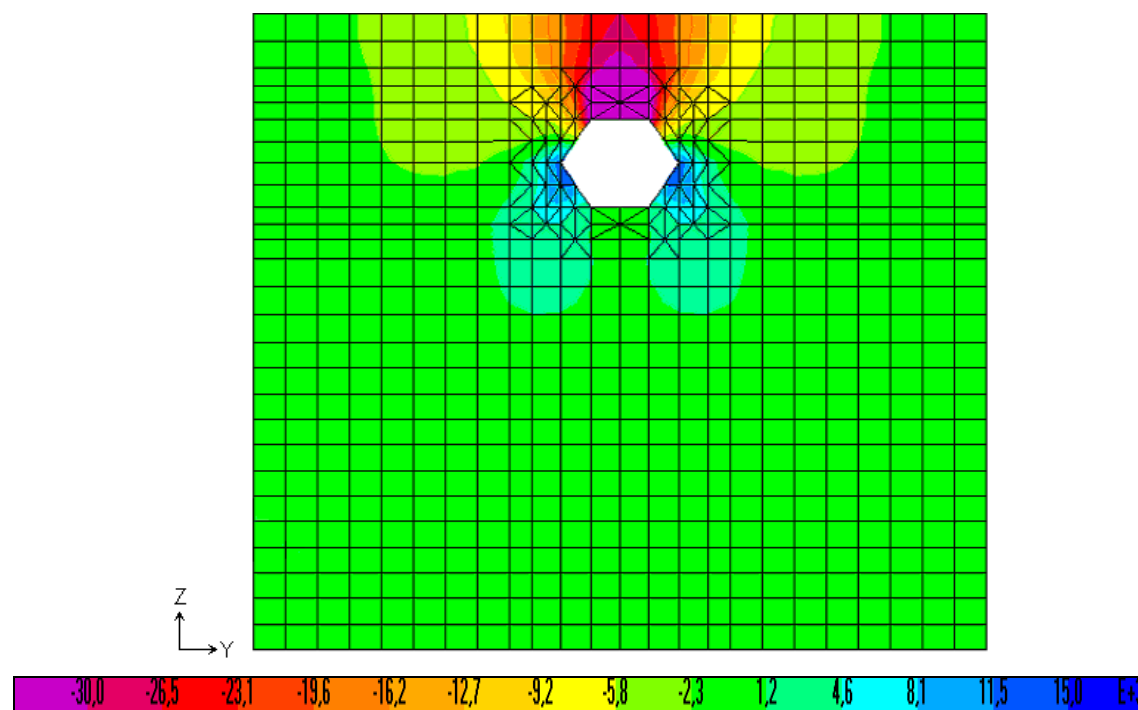
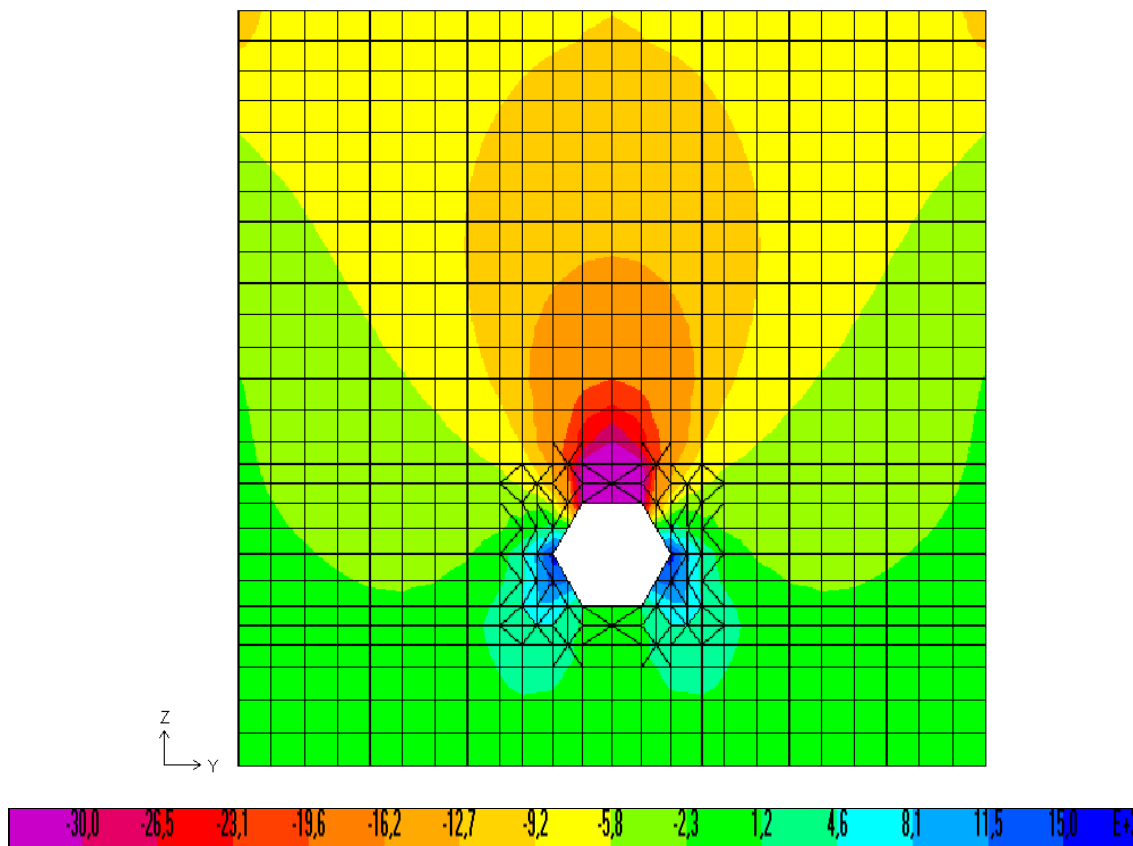


Figura 84 – Diagrama das tensões segundo  $z$ . Modelo numérico do ensaio ao esmagamento E24-16 (tensões em  $\text{kN/m}^2$ ).



**Figura 85 – Diagrama das tensões segundo z. Modelo numérico do ensaio ao esmagamento E72-16 (tensões em  $\text{kN/m}^2$ ).**

O aumento da tensão máxima de esmagamento com a distância  $D$  vai desvanecendo, convergindo para um valor determinado. No caso em que a distância  $D$  é igual a 56 mm, o bolbo de tensões já se distribui por toda a largura do provete, solicitando uma maior quantidade de material (indicação de proximidade da máxima resistência que pode ser atingida). Assim, para uma distância  $D$  de 72 mm, em termos de tensão máxima, não houve uma alteração significativa, Figura 85 e Figura 86.

Como se pode observar na Figura 87, uma distância  $D$  de 40 mm não é suficiente para que o bolbo de tensões se desenvolva em toda a largura do provete.

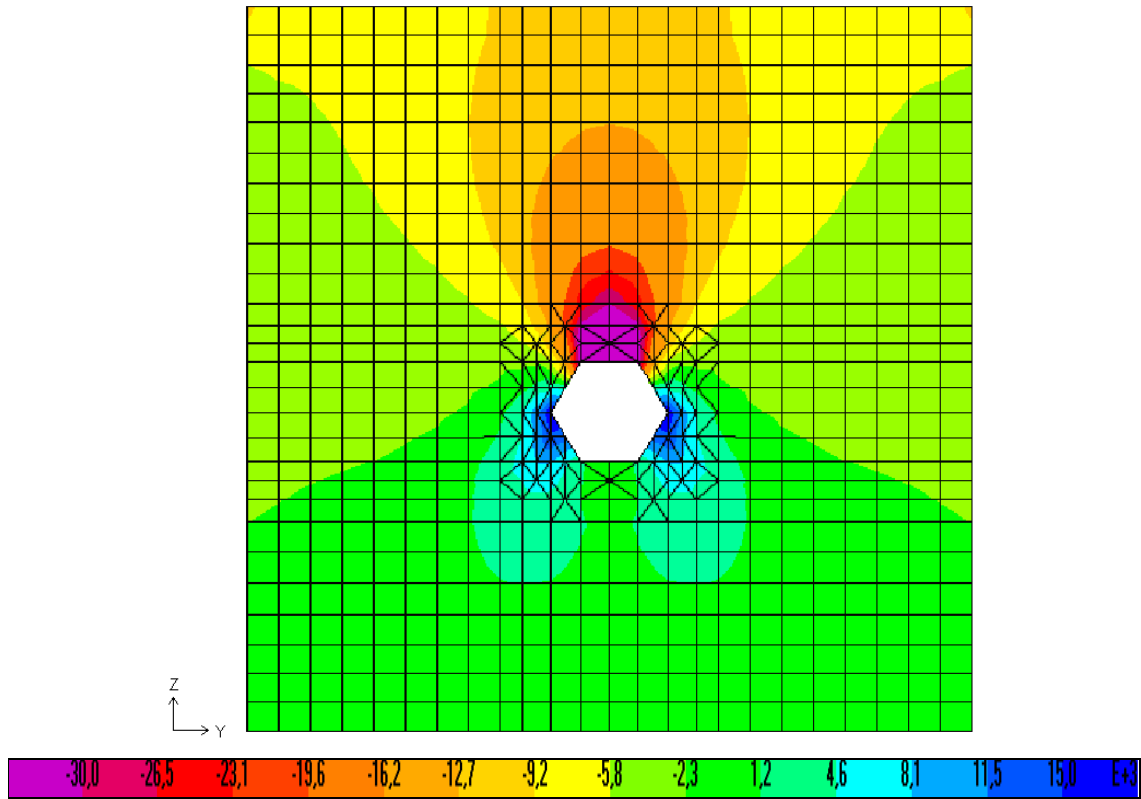


Figura 86 – Diagrama das tensões segundo z. Modelo numérico do ensaio ao esmagamento E56-16 (tensões em  $\text{kN/m}^2$ ).

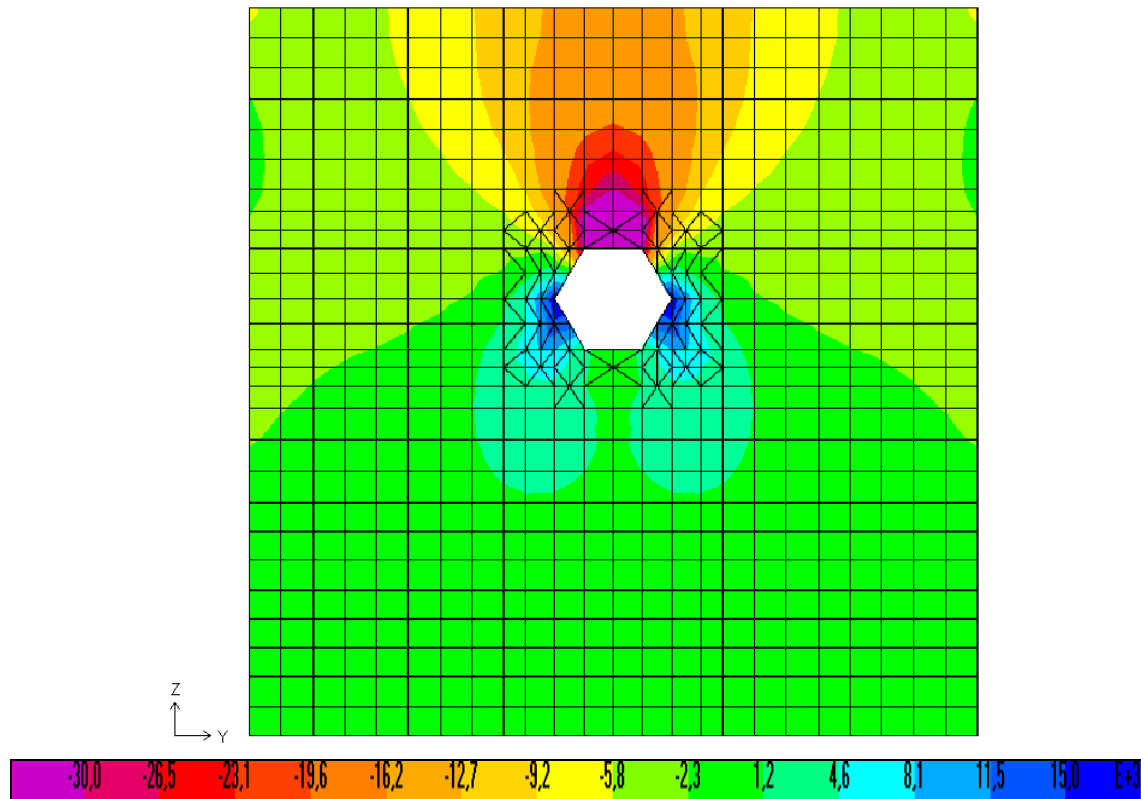


Figura 87 – Diagrama das tensões segundo z. Modelo numérico do ensaio ao esmagamento E40-16 (tensões em  $\text{kN/m}^2$ ).

Tendo por base as direcções principais das tensões apresentadas no modelo de elementos finitos, pode-se definir um modelo de escoras e tirantes cujo comportamento se aproxime do comportamento ao esmagamento do CBPB em ligações aparafusadas.

Como se pode constatar nos casos extremos apresentados na Figura 88 e na Figura 89, as tracções predominantes a azul, contornam parcialmente o furo e as compressões (roxo) direccionam-se principalmente para o bordo (apoio).

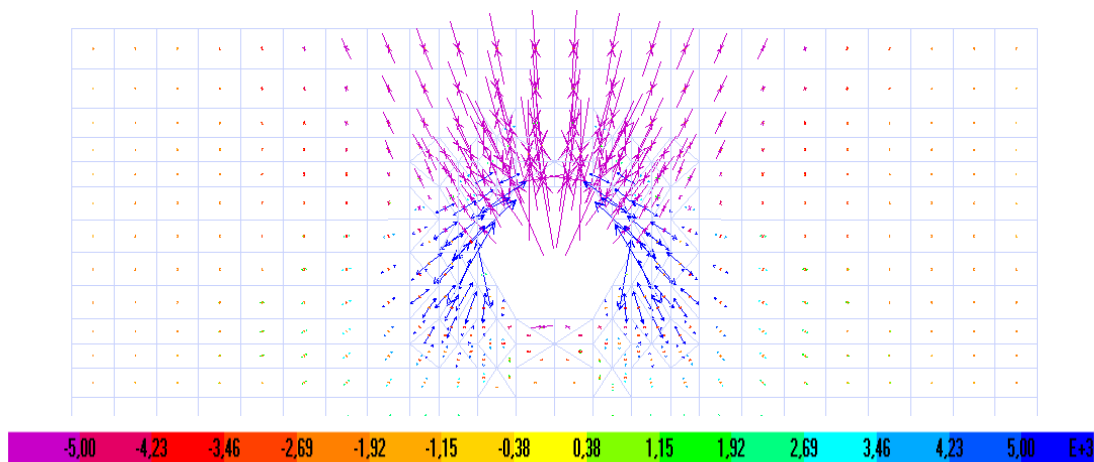


Figura 88 – Diagrama das tensões principais. Modelo numérico do ensaio ao esmagamento E24-16.

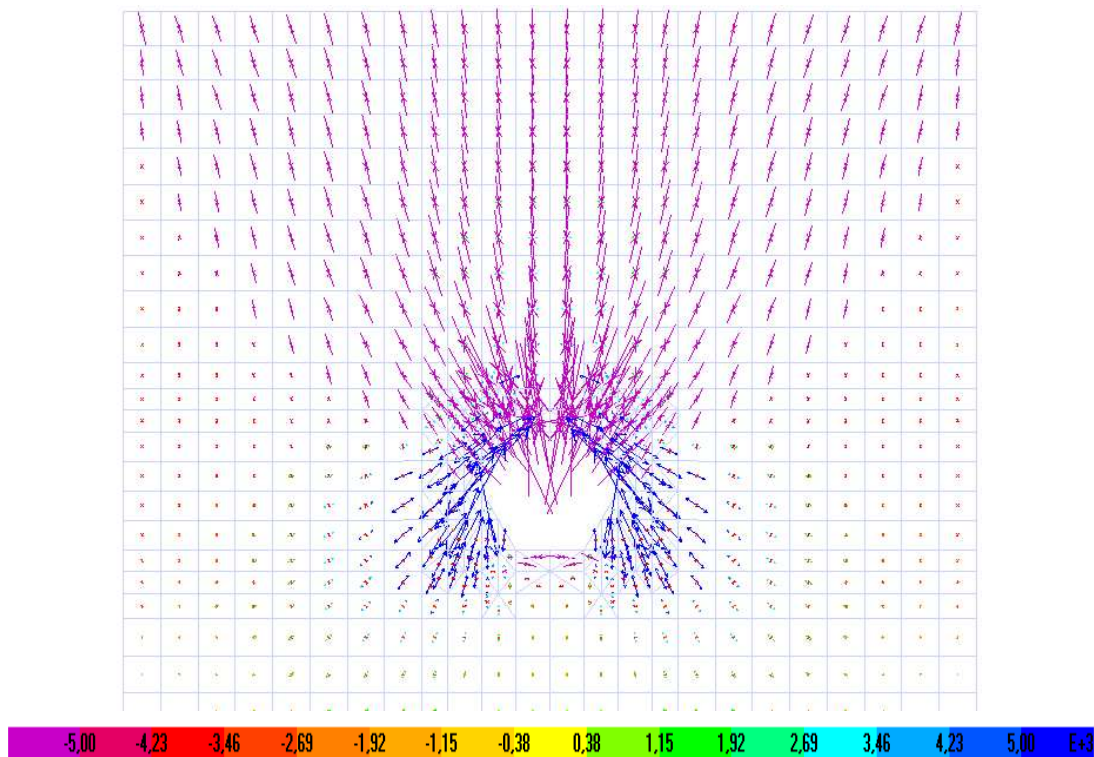
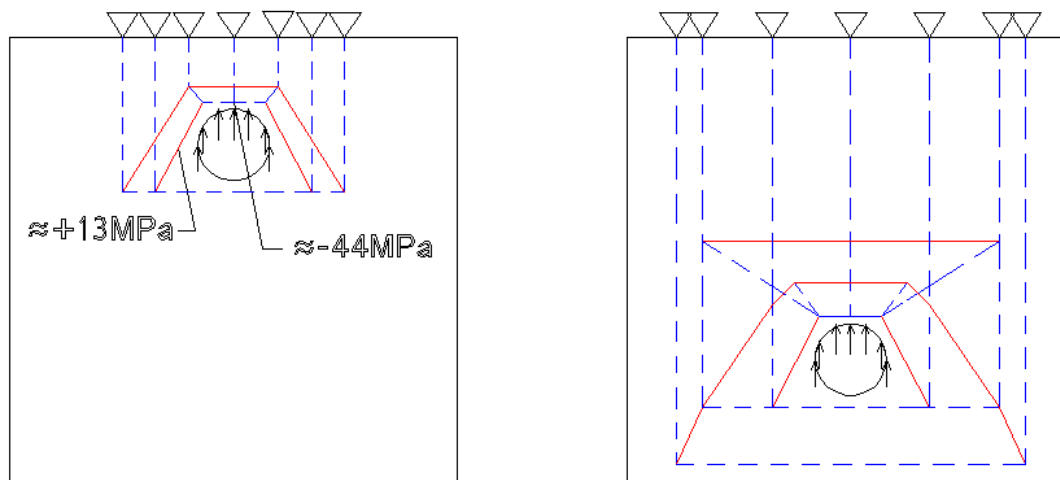


Figura 89 – Diagrama das tensões principais. Modelo numérico do ensaio ao esmagamento E72-16.

Assim, tendo por base os resultados numéricos foi possível definir os seguintes modelos de escoras e tirantes:



**Distância ao bordo de 24 mm**

**Distância ao bordo de 72 mm**

Nota: os valores apresentados indicam a ordem das tensões existentes no modelo de elementos finitos.

**Figura 90 – Modelos de escoras e tirante em torno de um furo com uma distância ao bordo de 24 mm e de 72 mm.**

Estes modelos de escoras e tirantes são apenas uma tentativa de interpretação do fenómeno. O problema perto da rotura é não linear, daí uma análise plástica do tipo escoras e tirantes poderá fazer algum sentido embora aqui não existam tirantes (armaduras) como no betão armado. Poderá considerar-se que os tirantes são, em certa medida, as fibras de madeira.

Na secção 8.5.1.2 do *EC5* [ 3 ], a resistência ao esmagamento é definida para “particleboard” (aglomerado de partículas) e para os OSB (“Oriented Strand Board” ou aglomerado de partículas de madeiras longas e orientadas) pela expressão ( 2 ), onde *C*, *a* e *b* são constantes da fórmula empírica que no caso do OSB tomam os valores 50, -0,6 e 0,2, respectivamente.

$$f_h = C \times \phi^a \times t^b \quad (2)$$

onde:

$$f_h = \frac{F_{m\acute{a}x.}}{\phi \times t};$$

*t* é a espessura do elemento a ligar;

$\phi$  é o diâmetro do elemento metálico.

Com base nesta expressão geral determinar-se-ão os coeficientes que melhor se adaptam ao CBPB. Na Tabela 17, são apresentados os resultados dos ensaios ao esmagamento, nomeadamente a força máxima de compressão ( $F_{m\acute{a}x.}$ ) e respectiva tensão de esmagamento ( $f_h$ ), em função das diversas distâncias ao bordo carregado ( $D$ ) e aos diâmetros ( $\phi$ ) testados.

Nos ensaios efectuados, a resistência ao esmagamento aumentou com a distância  $D$ , independentemente do diâmetro do parafuso. Tal como era expectável, a resistência ao esmagamento converge para um valor determinado. No entanto, conforme se pode observar na Figura 91, a convergência não é tão perceptível no caso do parafuso  $M12$ . Esta situação pode ser devido a erros relacionados com os ensaios ou a pequenas oscilações na resistência do material.

Provete	D [mm]	$\phi$ [mm]	$F_{m\acute{a}x.}$ [kN]	$F_{med}$ [kN]	$f_h$ [MPa]	$f_{h, med}$ [MPa]	
E24-16	24	16	1	23,98	23,85	46,83	46,58
			2	24,85		48,53	
			3	22,72		44,38	
E40-16	40	16	1	24,04	25,79	46,95	50,38
			2	27,03		52,79	
			3	26,31		51,39	
E56-16	56	16	1	25,59	26,31	49,99	51,39
			2	26,31		51,39	
			3	27,03		52,79	
E72-16	72	16	1	25,51	26,70	49,82	52,16
			2	27,80		54,29	
			3	26,81		52,36	
E40-12	40	12	1	22,62	21,70	58,90	56,50
			2	22,00		57,30	
			3	20,47		53,30	
E56-12	56	12	1	24,15	23,44	62,90	61,03
			2	24,88		64,80	
			3	21,27		55,40	
E72-12	72	12	1	21,66	21,17	56,40	55,13
			2	22,73		59,20	
			3	19,12		49,80	

Tabela 17 – Resultados dos ensaios ao esmagamento.

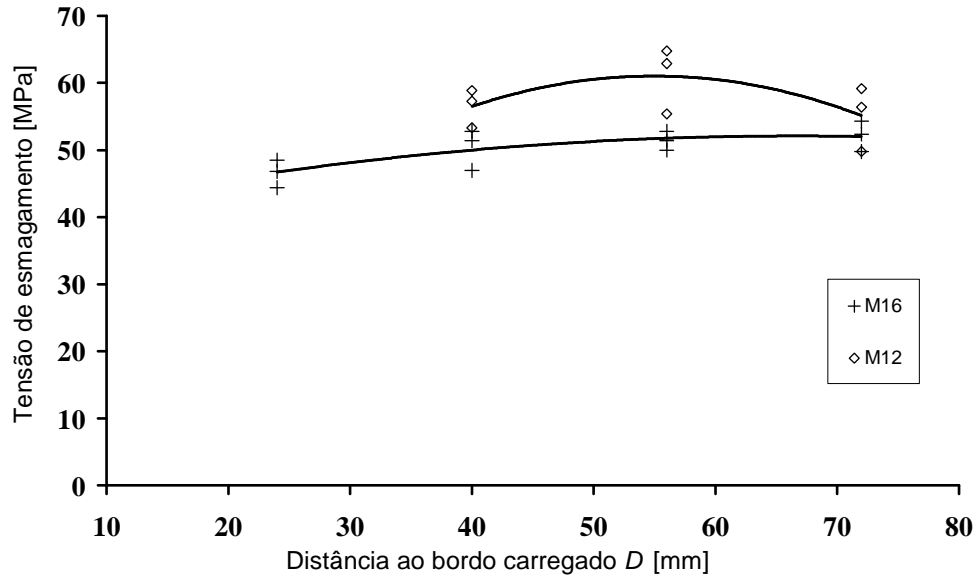


Figura 91 – Influência da distância ao bordo carregado ( $D$ ) na resistência ao esmagamento.

Atendendo a que não se testou a dependência da resistência ao esmagamento em função da espessura, considerou-se que o coeficiente  $b$  toma o valor 0,2, tal como considerado pelo EC5 [ 3 ], para o caso do OSB ou “particleboard”. Os restantes coeficientes,  $C$  e  $a$ , determinaram-se através dos valores médios obtidos pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} f_{h,med}(D=i) = C \times 12^a \times t^{0,2} \\ f_{h,med}(D=i) = C \times 16^a \times t^{0,2} \end{cases} \rightarrow i = \{40;56;72\} \quad (3)$$

Resolvendo o sistema de equações obtiveram-se os resultados expressos na Tabela 18. Substituindo cada uma das soluções obtêm-se as curvas apresentadas na Figura 92.

$D$ [mm]	$C$	$a$
40	76,05	-0,40
56	114,89	-0,54
72	44,47	-0,19

Tabela 18 – Valores dos factores  $C$  e  $a$  da expressão (3).

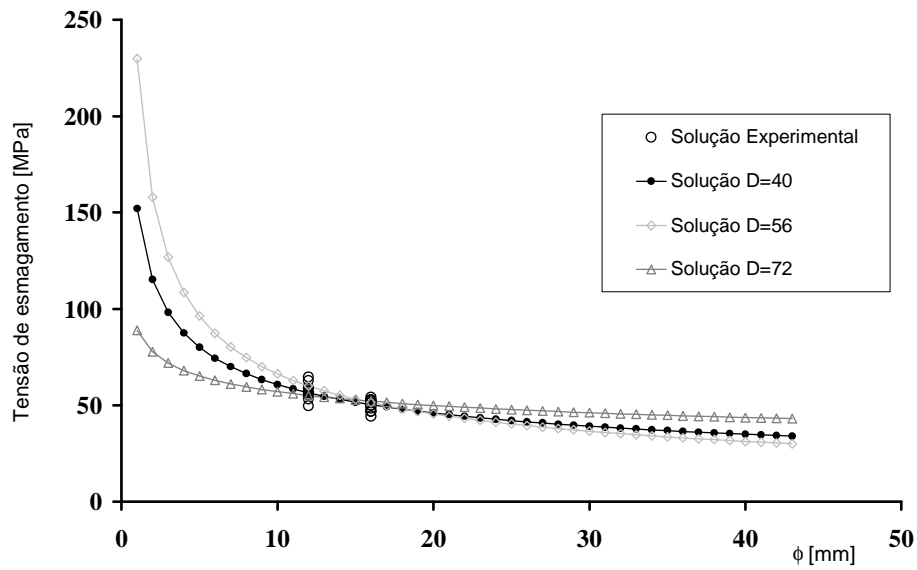


Figura 92 – Diagrama tensão de esmagamento – diâmetro do parafuso das três soluções obtidas.

Tendo em conta as três soluções, adopta-se a solução intermédia ( $D=40$  mm) para definir a resistência média ao esmagamento. Assim, obtém-se a seguinte expressão:

$$f_h = 76 \times \phi^{-0,4} \times t^{0,2} \quad (4)$$

## 6. CONCLUSÕES

A presente dissertação deu início ao desenvolvimento de um novo projecto de investigação para a utilização de CBPB (Cement-Bonded Particle Boards) como material estrutural, tendo o objectivo de explorar a possibilidade de utilização de CBPB em elementos estruturais predominantemente sujeitos a forças de compressão – pilares.

Tal como foi referido, a grande problemática no fabrico do CBPB é a compatibilidade entre o cimento e a madeira, por esta conter compostos químicos (extractivos e açúcares) que dificultam/impedem a presa do cimento, sendo necessário recorrer a aceleradores de presa. A madeira utilizada não deve conter taninos pois são muito prejudiciais à presa do cimento. A compatibilidade entre o cimento e a madeira é classificado pelo índice de inibição onde, no caso de material estrutural deve ser de baixa inibição ( $I < 10$ ).

Assim, as características mecânicas e de durabilidade, para além de dependerem do índice de inibição, também dependem, essencialmente do traço madeira:cimento, do tipo de material (da madeira e do cimento) e da utilização de químicos.

No caso particular deste estudo, foi usado CBPB constituído por cimento *Portland* do tipo II (CEM II / A-L 42,5 R), madeira *Pinus pinaster* ou *Pinus pinea* (aparas finas e grossas) e sulfato de alumínio e silicato de sódio para acelerar a presa e desfibrar as aparas de madeira, respectivamente, sendo sujeito à prensagem durante o processo de fabrico.

Os pilares de CBPB podem tomar três formas: pilares espaçados ou pilares treliçados, indicados pelo EC5 [ 3 ], ou ainda pilares porticados.

Em termo de ligações, no caso da utilização de parafusos roscados é recomendado que este não provoque danos na sua envolvente. O uso de pregos, grampos ou de placas metálicas denteadas é propício a originar destacamentos da superfície envolvente destes. A ligação de vários elementos estruturais depende da resistência ao esmagamento, do momento de cedência do conector metálico e, ainda, pode depender do “efeito de corda” que, por sua vez, depende da resistência ao arranque.

Com base nos 111 ensaios realizados neste estudo com os provetes do tipo *P* e *C* à compressão uniaxial pode-se constatar que o material compósito CBPB tem comportamentos distintos consoante a superfície solicitada. Com base nos provetes do tipo *P1*, quando o CBPB é solicitado na face perpendicular ao plano do painel de CBPB (face lisa), apresenta um comportamento dúctil, tendo uma resistência e módulo de elasticidade médio de 41,7 MPa e 0,28 GPa, respectivamente. Já com uma solicitação na outra face, paralela ao plano do painel de CBPB (face rugosa), obteve-se uma resistência e um módulo de elasticidade médio de 22,4 MPa e 1,99 GPa, respectivamente.

Com os provetes do tipo *P2*, solicitados na face rugosa, observou-se alguma discrepância nos valores do módulo de elasticidade, sendo de 5,22 GPa, comparativamente com os resultados obtidos com os provetes do tipo *C*. Assim, para definir correctamente o CBPB à compressão na face rugosa

recomenda-se que seja garantido uma dimensão mínima do provete idêntica ao provete do tipo C1-A ( $100 \times 100 \times 32 \text{ mm}^3$ ).

Devido ao elevado número de resultados obtidos com os provetes do tipo C (solicitado na face rugosa) foi possível definir uma distribuição normal para a tensão à compressão resistente e para o módulo de elasticidade. Assim, determinaram-se os valores característicos ( $f_k=18,09 \text{ MPa}$ ;  $E_k=5,70 \text{ GPa}$ ), correspondentes ao quantilho de 5%, e médios da tensão de rotura e do módulo de elasticidade ( $f_m=24,36 \text{ MPa}$ ;  $E_m=7,11 \text{ GPa}$ ).

Contudo, as características do CBPB apresentaram dependências de vários factores, nomeadamente, como já foi referido, da face solicitada e da esbelteza (altura dos provetes e forma dos provetes).

Em relação ao efeito da altura dos provetes, a tensão máxima, ao contrário do módulo de elasticidade, tende a decrescer com o aumento da esbelteza, independentemente do tipo de provete. No entanto, visto que o provete do tipo C4 apresentou um maior decréscimo da tensão máxima, é aconselhável não recorrer a pilares de secção transversal em L (secção sem dupla simetria).

No que diz respeito ao efeito da forma dos provetes, passa-se a mesma coisa em relação à altura.

Em suma, em função dos diversos parâmetros analisados e independentemente da forma do provete (excluindo o provete do tipo C4) constata-se que a tensão de compressão diminui inicialmente de 28 MPa para 25 MPa para esbelteza entre 3 e 9, e torna-se aproximadamente constante (25 MPa) para valores da esbelteza até 65. Pelo contrário, o módulo de elasticidade varia em função da forma do provete, apresentando uma evolução ligeiramente crescente com o aumento da altura dos provetes.

Dos modos de rotura obtidos, podem ser definidos 3 modos: rotura dúctil com resistência pós colapso, rotura frágil nos topos e rotura local frágil devido aos efeitos de segunda ordem, em função da sua esbelteza. Escusado será dizer que é preferível ter uma rotura com resistência pós colapso e, no geral, tal só acontece quando o plano de rotura não intersecta a superfície com maior densidade de cimento. As superfícies de rotura apresentaram uma inclinação cujo ângulo médio, com a horizontal (perpendicular ao plano do painel de CBPB), é de  $75^\circ$ .

A ligação de placas com recurso a colas é mais eficaz com colas espumosas, tal como o poliuretano, pois esta preenche os espaços vazios originados pelas imperfeições provenientes do corte das placas de CBPB onde, com base nos valores obtidos através dos provetes do tipo A, esta apresentou uma resistência média de 4,7 MPa. No caso da resina epóxida, esta não efectua a ligação das placas nas zonas da placa que contenha imperfeições, como foi mencionado em relação aos provetes do tipo C4-D e C4-F.

Relativamente à resistência ao esmagamento em ligações aparafusadas, o CBPB apresentou uma resistência na ordem dos 50 MPa, onde esta depende da distância entre o centro do parafuso e o bordo carregado e do diâmetro do parafuso. Através da modelação de elemento finitos, constatou-se que a tensão máxima de esmagamento ( $f_h$ ) aumenta com a distância entre o bordo carregado e o centro do elemento metálico ( $D$ ). Para uma distância  $D$  de 56 mm, o bolbo de tensões já se distribui

por toda a largura do provete, solicitando uma maior quantidade de material (indicação de proximidade da máxima resistência que pode ser atingida).

Para além disso, a distribuição de tensões junto ao furo depende pouco da distância do furo ao bordo, pelo que a força de rotura por esmagamento do VIROC não é significativamente influenciada por este parâmetro. Em termos de distância mínima a garantir entre o parafuso e o bordo carregado não se pode concluir nada, no entanto, visto que para uma distância  $D$  igual a 56 mm deixou de haver frendas na face carregada, parece ser a melhor opção. A resistência ao esmagamento médio pode ser definida pela seguinte expressão  $f_h = 76 \times \phi^{-0.4} \times t^{0.2}$ .

Este trabalho veio dar uma melhor compreensão sobre as características à compressão do CBPB, sendo, no entanto, necessário aprofundar o estudo do seu comportamento individual ou composto, face a outras solicitações, para que possa ser utilizado como material estrutural.

Complementarmente a este trabalho encontra-se em desenvolvimento pelo colega João Graça, um trabalho sobre o *Comportamento estrutural de vigas construídas com CBPB* que poderá trazer alguns esclarecimentos adicionais sobre o comportamento estrutural de vigas de CBPB à flexão.

Relativamente a trabalhos a desenvolver no futuro, salienta-se, no âmbito do projecto de investigação sobre a utilização de CBPB como material estrutural, o estudo do comportamento à flexão de painéis de CBPB tendo em vista a sua possível aplicação em pavimentos.

O comportamento das ligações neste tipo de material é outro dos aspectos que carece de estudos complementares, em especial, no que diz respeito aos restantes modos de rotura indicados neste trabalho, que não dependem unicamente da tensão de esmagamento do CBPB. Outro possível assunto a estudar, relacionado com as ligações, poderá ser a influência da proximidade de conectores numa ligação com mais de um conector.

Por fim, saliente-se a necessidade de estudar o comportamento do CBPB ao corte e a influência da humidade na resistência, bem como a necessidade da quantificação dos efeitos da fluência do CBPB.

## 7. REFERÊNCIAS

- [ 1 ] – CEN; EN 633:1993 E; “Cement-bonded particleboards – Definition and classification”; October 1993.
- [ 2 ] – <http://lmlisboa.blogspot.com/>. Acesso em 20/1//2010
- [ 3 ] – CEN; EN 1995-1-1; “Eurocode – 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings”; November 2004.
- [ 4 ] – Viroc Portugal - Indústria de Madeira e Cimento S.A.; Catálogo – “O Painel para a Construção”; Novembro 2004.
- [ 5 ] – Wolfe, Roland W.; Gjinolli, Agron; “Cement-Bonded Wood Composites as an Engineering Material”; Forest Products Society; September 1996.
- [ 6 ] – Wolfe, R .; Gjinolli, Agron E.; “Assessment of Cement-Bonded Wood Composites as Means of Using Low-Valued Wood for Engineered Applications”; Forest Products Laboratory; International Wood Engineering Conference; USA, 1996. p. 3-61, 3-74 – 3-80.
- [ 7 ] – Beraldo, Antonio L.; Carvalho, José V.; “Compósito Eucalyptus grandis – cimento Portland” Scientia Forestalis; n.65; Jun. 2004. p. 150 – 161.
- [ 8 ] – Okino, Esmeralda Y. A. et al.; “Chapa aglomerada de cimento-madeira de Hevea brasiliensis Müll Arg.”; Revista Árvore, Viçosa – MG; Vol. 28; n.3; 2004. p. 451 – 457.
- [ 9 ] – Papadopoulos, Antonios N.; “Mechanical Properties and Decay Resistance of Hornbeam Cement Bonded Particleboards”; Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2008 (2008), Hindawi Publishing Corporation.
- [ 10 ] – Okino, Esmeralda Y. A. et al; “Physico-mechanical properties and decay resistance of *Cupressus* ssp. Cement-bonded particlesboards”; ScienceDirect – Cement & Concrete Composites; Vol. 27; (2005) 333 – 338.
- [ 11 ] – Sousa Coutinho, A; “Fabrico e propriedades do betão”; Vol. II; 4ª edição; LNEC; Lisboa, 2006. p. 194-199
- [ 12 ] – Hachmi, M.; Moslemi A.A.; “Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives”; Forest products journal; Vol. 39; n.6; 1989. p. 55 – 58.
- [ 13 ] – Miller, D.P.; Moslemi, A.A.; “Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile-strength”; Wood and fiber science; Vol. 23; n.4; 1991. p. 472 – 482.
- [ 14 ] – Schwarz, H.G.; Simatupang, M.H.; “Einfluß der chemischen Zusammensetzung von portlandzement auf die druckfestigkeit von versuchskörpern aus zement und fichtenoder buchenspänem”; Holz als roh-und werkstoff; Vol. 41; 1984. p. 65 – 69.

- [ 15 ] – Lignum; “Bases technologiques/Matériaux dérivés du bois/Matériaux à base de particules de bois et de liant mineral”; Lignum: Zurich, 1960. 9p.
- [ 16 ] – Weber H.; Internacional construction system. In: “Handbook of element construction with cement boards and other types of board”; Bison-Werke: Springe; 1985. p. 93 - 104.
- [ 17 ] – Bever MB.; “Wood-cement boards in encyclopedia of materials science and engineering”; 1st ed.; Pergamon Press Limited; 1986. pp. 5399 - 5402.
- [ 18 ] – Coutts, R.S.P; “Wood fibre reinforced cement composites”; Concrete technology and design, Vol. 5; Natural reinforced cement and concrete; Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Sheffield England, U.K.
- [ 19 ] – Moslemi, A.A. and S.C. Pfister; “The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels“ Wood and Fiber Sci.; 1987; 19(2):165-175.
- [ 20 ] – Sorfa, P; “Properties of wood-cement composites“; J. Applied Polymer Sci.: Applied Polymer Symp; 1984; 40:109-216.
- [ 21 ] – Weatherwax RC; Tarkow H.; “Effect of wood on setting of Portland cement“; Forest Prod J 1964; 12:567-70.
- [ 22 ] – Weatherwax RC; Tarkow H.; “Decayed wood as an inhibitor“; Forest Prod J 1967; 7:30-2.
- [ 23 ] – Sousa Coutinho, A.; “Fabrico e propriedades do betão“; Vol. III; 2ª edição; LNEC, Lisboa, 1994. p.37-39.
- [ 24 ] – Gominho, Jorge; Slides da disciplina: Tecnologia dos produtos florestais; ISA, 2009
- [ 25 ] – Soroushian, P. and S. Marikunte; “High performance cellulose fiber reinforced cement composites“: In: Proc. Inter. RILEM/ACI workshop; E&FN Spon, London, England. U.K, 1992. pp. 84-99.
- [ 26 ] – Relatório 40-232 – VIROC – Best\_Defence\_Against\_Termite, 2005
- [ 27 ] – Fan, M. Z. et al; “Dimensional instability of cement-bonded particleboard: The effect of surface coating“; ScienceDirect – Cement and Concrete Research Vol. 34 (2004) 1189 – 1197.
- [ 28 ] – Relatório 40-232 – VIROC – Fasteners\_and\_Adhesives, 2005
- [ 29 ] – SAP2000; Computer & Structures, Inc. – CSI; Berkeley, USA.

## ANEXOS

### ANEXO A – Resultados detalhados dos provetes do tipo C

Provete	$\lambda$	$f_{m\acute{a}x.}$ [MPa]	E [GPa]	
C1-A	1	10,8	30,5	7,13
	2	10,8	21,2	6,22
	3	10,9	23,9	5,67
	4	10,7	25,7	6,89
	5	10,9	24,0	5,83
	6	10,8	22,4	5,71
C1-B	1	21,9	25,9	7,36
	2	22,0	25,6	7,39
	3	21,2	25,7	7,04
	4	21,9	26,2	7,26
	5	21,5	26,7	7,18
	6	22,0	26,8	7,73
C1-C	1	31,5	26,7	7,65
	2	31,4	28,9	8,16
	3	32,5	24,4	7,43
C1-D	1	43,8	27,1	6,63
	2	44,9	28,5	7,25
	3	43,3	25,0	6,37
	4	43,6	23,5	-
	5	44,6	24,2	-
	6	44,5	24,3	6,15
	7	45,2	22,8	6,13
	8	45,1	25,5	-
C1-E	1	54,0	28,1	8,48
	2	54,9	23,1	7,42
	3	56,6	23,3	7,78
	4	55,6	22,0	7,41
	5	56,6	24,6	7,99
	6	56,8	23,7	7,57
	7	54,6	27,4	8,53
	8	54,7	21,2	8,54
	9	55,7	23,5	8,24
C1-F	1	65,6	25,4	8,51
	2	65,7	22,1	7,41
	3	65,9	24,4	7,87
	4	64,8	28,8	8,71
	5	65,3	22,8	7,53

Proвете	$\lambda$	$f_{\text{máx.}}$ [MPa]	E [GPa]
C2-C	1	16,4	-
	2	16,5	28,4
	3	16,2	26,3
	4	15,4	26,9
	5	16,2	24,5
	6	16,1	18,1
C3-A	1	3,5	28,3
	2	3,5	27,6
	3	3,5	28,8
C3-B	1	7,2	28,9
	2	7,4	27,9
	3	7,4	27,4
	4	7,3	20,4
	5	7,4	23,2
	6	7,5	26,2
C3-C	1	10,7	23,6
	2	10,7	27,0
	3	10,7	23,9
	4	10,7	26,4
	5	10,6	27,4
	6	10,8	26,8
C4-A	1	3,6	28,8
	2	3,7	23,5
	3	3,8	20,8
	4	3,6	26,9
	5	3,7	29,6
	6	3,7	30,5
C4-B	1	7,6	21,0
	2	7,6	20,8
	3	7,5	19,1
	4	7,6	22,5
	5	7,6	21,6
	6	7,5	18,1
C4-C	1	11,3	23,1
	2	11,4	23,5
	3	11,3	19,6
	4	11,4	22,9
	5	11,5	23,8
	6	11,1	24,9
C4-D	1	15,2	21,1
	2	15,2	22,1
	3	15,3	19,0
C4-F	1	22,2	21,7
	2	22,9	22,0
	3	23,1	19,1

Provete	$\lambda$	$f_{m\acute{a}x.}$ [MPa]	E [GPa]	
<b>C5-A</b>	1	3,2	28,0	6,64
	2	3,2	30,0	6,97
	3	3,1	27,7	6,42
	4	3,2	25,6	6,06
	5	3,3	27,0	6,35
	6	3,2	28,5	6,91
<b>C5-B</b>	1	6,4	23,8	6,72
	2	6,4	24,3	7,12
	3	6,4	23,1	6,98
	4	6,4	25,2	6,76
	5	6,4	25,6	7,31
	6	6,5	27,7	7,44
<b>C5-C</b>	1	9,6	26,6	7,84
	2	9,6	25,2	7,85
	3	9,7	26,6	8,09
	4	9,7	26,4	7,87
	5	9,6	27,2	8,01
	6	9,6	25,0	7,46

Nota: Os provetes que não apresentam valores foi devido a erro no decorrer do respectivo ensaio.