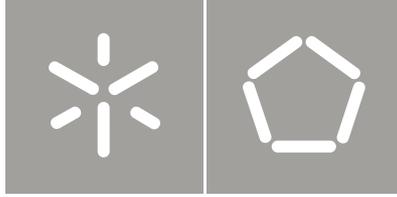




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Pedro Martins Fernandes Cunha

Comportamento à flexão
de vigas vidro-madeira



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Pedro Martins Fernandes Cunha

Comportamento à flexão
de vigas vidro-madeira

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

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Manuel Branco

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Jorge Branco, o meu agradecimento pelo seu apoio fundamental, permanente disponibilidade e rigor que contribuíram para um aumento significativo do meu conhecimento, desempenho e confiança. Pela amizade alcançada, que contribuiu para a facilidade de comunicação e compreensão e levou esta dissertação a bom caminho.

Ao Arquitecto José Pequeno, pela sua disponibilidade, opiniões e conhecimentos que partilhou.

Aos técnicos do laboratório de estruturas da Universidade do Minho, em particular ao senhor Matos pela experiência e ajuda proporcionada e um especial agradecimento ao Engenheiro Marco Jorge pela amizade demonstrada, pelas opiniões e conhecimentos partilhados.

Ao Engenheiro Hélder Sousa, pela preocupação, conhecimento e disponibilidade oferecida.

À minha família, pelo apoio incondicional e pela oportunidade de começar a minha vida com sucesso.

Aos meus amigos de infância, Pedro Mendes, Nuno Castro e Sérgio Lopes, agradeço por todos os momentos passados pois proporcionaram um desenvolvimento bastante positivo nas minhas escolhas.

Aos meus amigos, em particular ao João Costa, Pedro Pereira, David Lourenço, Ricardo Rodrigues, Júlio Ferraz, Bruno Santos, Cátia Martins e Mónica Ramos pelo companheirismo ao longo do curso. Quero agradecer em especial ao Engenheiro Marcos Oliveira pela amizade, ajuda e apoio que demonstrou em particular na recta final desta dissertação.

Ao meu Mestre e amigos da Academia Arte Nobre, por me mostrarem que com esforço e sacrifício conseguimos alcançar todos os objectivos.

À pessoa mais importante e responsável pelo fim deste capítulo, Andreia, pelo amor, amizade, apoio, incentivo, ajuda e sobretudo por me mostrar que todos os obstáculos podem ser ultrapassados quando nos mantemos juntos. Pelo controlo e consciência, que foram essenciais na minha formação pessoal.

“Quanto mais treino, mais sorte tenho”. - Tiger Woods

RESUMO

A indústria da pré-fabricação é uma área cada vez mais explorada, nomeadamente pela facilidade de execução e redução do tempo da obra. A utilização de soluções mistas neste tipo de indústria tem em vista um melhor desempenho dos materiais quando trabalham em conjunto. Para tal fim, a criatividade e o pensamento destacam-se para criar algo distinto e inovador.

A iluminação natural é um factor crucial no conceito de arquitectura, e uma possibilidade de aproveitamento da luz natural é a utilização de vidro em elementos estruturais, que leva precisamente à exploração das capacidades de iluminação. A motivação deste tipo de solução reside em beneficiar da iluminação natural de uma forma não muito explorada até agora, criando caminhos de luz e melhorando a percepção espacial, e respondendo, simultaneamente, com segurança e estabilidade estrutural.

Neste trabalho é avaliado o comportamento de vigas mistas vidro-madeira. As ligações – polímero, poliuretano e silicone – entre os dois materiais são ponderadas e analisadas, tal como a utilização de elementos verticais – prumos – nas extremidades das vigas. A variação da secção transversal é também analisada e comparada de forma a compreender a resistência e segurança das três variantes mencionadas.

Palavras-Chave: Madeira; Vidro; Vigas Vidro-Madeira; Ligações Coladas.

ABSTRACT

The prefabricated industry is an area increasingly explored, because of the ease execution and reduced work time. The use of composite solutions for this type of industry seeks to improve the performance of the materials when working together. For this purpose, creativity and thoughts stands out to create something different and innovative.

Natural lighting is a crucial factor in the concept of architecture, and one way to use natural light is to use glass in structural elements, which leads precisely to the exploit the capacities of lighting. The motivation for this type of solution is to benefit from natural light in a way not much explored until now, creating light paths and improving the spacial perception, replying at the same time with safety and structural stability.

In this work the behavior of composite glass-wood beams has been evaluated. The connection – polymer, polyurethane and silicone – between the two materials are analyzed and also the vertical restrain at the beams ends. A different cross-section is analyzed and compared in order to realize the strength and safety of the three variants mentioned.

Keywords: Wood; Glass; Glass-Wood Beams; Glued Connections.

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação e Objectivos	1
1.2	Organização da Dissertação	2
2	ESTADO DE CONHECIMENTO.....	3
2.1	Vidro como Material Estrutural.....	3
2.1.1	Bases de Cálculo.....	6
2.2	Madeira como Material Estrutural.....	7
2.2.1	Bases de Cálculo – Eurocódigo.....	10
2.3	Ligações Coladas	11
2.3.1	Ligações Flexíveis	12
2.3.2	Ligações Rígidas.....	13
2.4	Sistemas Mistos Estruturais.....	17
2.4.1	Generalidades	17
2.4.2	Soluções Vidro-aço.....	19
2.4.3	Soluções Vidro-Madeira	23
2.4.4	Soluções Vidro-GFRP	26
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	27
3.1	Fase 1 (caracterização dos materiais)	29
3.2	Fase 2 (flexão a 3 pontos de vigas “I” com e sem prumos)	29
3.3	Fase 3 (flexão a 4 pontos de vigas “I”).....	30
3.4	Fase 4 (flexão a 4 pontos de uma viga oca – viga caixão).....	31
3.5	Preparação dos ensaios.....	31
3.5.1	Materiais.....	31
3.5.2	Geometria dos provetes.....	32
3.5.3	Esquemas de ensaio	34

3.5.4	Execução das Vigas	36
3.6	Realização dos ensaios	37
3.6.1	Equipamento.....	37
3.7	Procedimento de ensaio.....	39
4	RESULTADOS	40
4.1	Fase 1 (caracterização dos materiais).....	40
4.2	Fase 2 (flexão a 3 pontos de vigas “T” com e sem prumos)	42
4.3	Fase 3 (flexão a 4 pontos de vigas I) e Fase 4 (flexão a 4 pontos de vigas ocas).....	45
5	Análise de resultados.....	48
5.1	Eficácia dos Prumos Verticais	48
5.2	Relação entre Adesivos	51
5.3	Eficácia dos Adesivos em Vigas de 3,2 m	52
5.4	Eficácia da Secção Transversal	53
5.5	Distribuição de Tensões e Extensões na Secção Transversal.....	54
5.5.1	Viga SP 101	55
5.5.2	Viga DC 895.....	58
5.5.3	Viga Caixão	61
6	CONCLUSÕES	64
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
8	ANEXOS	70
8.1	Anexo I.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Estruturas de vidro: (a) La Vela em Milão; (b) Loja Apple em Nova Iorque.	3
Figura 2 – Fracturas tipo do vidro: (a) vidro temperado; (b) vidro recozido; (c) vidro laminado. (Costa B. E., 2007).	4
Figura 3 – Estruturas de vidro: (a) Sede da EDP, no Porto; (b) Estação Central de Berlim.	5
Figura 4 – Skywalk no Grand Canyon.....	6
Figura 5 – Exemplo de casas de madeira.	7
Figura 6 – Estruturas de madeira: (a) Ponte de Kintaikyō em Iwakuni; (b) Metropol Parasol em Sevilha.	8
Figura 7 – Bloco de madeira (abeto) exposta ao fogo.	8
Figura 8 – Edifícios com fundações madeira: (a) Empire State Building; (b) Ponte de Brooklyn; (c) Estádio de Louisiana.	9
Figura 9 – Cortes típicos da madeira (Porteous & Kermani, 2007).	10
Figura 10 – Sistema de substituição de entrega danificada (Martins & Guerra, 2005).	11
Figura 11 – Esquema das tensões de secções mistas com ligações flexíveis.....	12
Figura 12 – Esquemas das tensões de secções mistas com ligações rígidas.	13
Figura 13 – Vigas de alma delgada (EN-1995-1-1, 2004).	14
Figura 14 – Vigas de vidro reforçadas com aço; esquema de ensaio (Christian Louter et al, 2005).	19
Figura 15 – Tipologias das vigas aço – vidro (Louter, 2007)	20
Figura 16 – Esquema da distribuição de forças posterior à rotura do vidro (Slivanský, 2012).	21
Figura 17 – Configuração dos provetes ensaiados (Slivanský, 2012).	21
Figura 18 – Modos de rotura: (a) Viga de vidro recozido; (b) Viga de vidro temperado (Slivanský, 2012).	21
Figura 19 – Secção transversal da viga de vidro reforçada e setup do ensaio (F.A.Veer et al, 2003).	22
Figura 20 – Esquemas de ensaios: (a) para tração; (b) para corte (Louise Blyberg et al, 2012).	23
Figura 21 – Secção transversal das vigas vidro-madeira (Blyberg & Serrano, 2010).....	24
Figura 22 – Esquema de ensaio (Blyberg & Serrano, 2010).	24
Figura 23 – Curvas força – deslocamento dos ensaios realizados e modos de rotura (Blyberg & Serrano, 2010).....	25

Figura 24 – Geometria das vigas vidro-GFRP (Luís Valarinho et al, 2010).....	26
Figura 25 – Esquema de ensaio (Luís Valarinho et al, 2010).	26
Figura 26 – Esquemas de ensaios e imagens dos ensaios realizados (Pequeno et al).	27
Figura 27 – (a) Adesivos utilizados na campanha experimental; (b) Provetes realizados. (Costa B. E., 2007).....	29
Figura 28 – Geometria das vigas da Fase 2, sem prumos verticais.	32
Figura 29 – Geometria das vigas da Fase 2, com prumos verticais.....	33
Figura 30 – Geometria das vigas DC 895 e SP 101.....	33
Figura 31 – Geometria da viga “caixão”.	33
Figura 32 – Esquema, longitudinal e transversal, de ensaio com duas cargas pontuais, para o proвете de vidro.	34
Figura 33 – Esquema, longitudinal e transversal, de ensaio com duas cargas pontuais, para os provetes de madeira.	34
Figura 34 – Esquema, longitudinal e transversal, de ensaio com uma carga pontual	35
Figura 35 – Esquema, longitudinal e transversal, de ensaio com duas cargas pontuais.	35
Figura 36 – Processo de preparação dos provetes.	36
Figura 37 - Localização e alinhamento dos apoios.....	37
Figura 38 – Posicionamento dos elementos verticais de segurança.	37
Figura 39 – Curvas força – deslocamento obtidos nos ensaios da Fase 1: (a) Viga de vidro; (b) Vigas de madeira.....	40
Figura 40 – Modos de rotura obtidos na Fase 1: (a) Viga de vidro; (b) Viga M04.	41
Figura 41 – Curvas experimentais força – deslocamento - adesivo C (polímero): (a) com prumos; (b) sem prumos.....	42
Figura 42 – Curvas experimentais força – deslocamento: (a) adesivo S (Silicone); (b) adesivo Q (poliuretano).....	42
Figura 43 – Modos de rotura obtidos na Fase 2.....	43
Figura 44 – Curvas força – deslocamento: (a) Fase 3 - DC895 (silicone) e SP101 (polímero); (b) Fase 4 – Caixão (silicone).....	45
Figura 45 – Vigas no início do ensaio e modos de rotura obtidos na Fase 3 e Fase 4.....	46
Figura 46 – Afastamento das extremidades dos banzos dos prumos: (a) Viga C02; (b) Viga Q03.....	49
Figura 47 – Distribuição das tensões segundo o EC5 da viga SP101 a meio vão.....	55
Figura 48 – Distribuição das tensões segundo o EC5 da viga DC895 a meio vão.....	58
Figura 49 – Distribuição das tensões segundo o EC5 da viga Caixão a meio vão.	61

Figura 50 – Geometria das secções transversais..... 65

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades mecânicas e físicas mais relevantes do vidro (Costa B. E., 2007). ...	5
Quadro 2 – Comparação entre os valores médios das tensões admissíveis e do módulo de elasticidade para madeira, betão e aço (Claude, 1995).	9
Quadro 3 – Lista de trabalhos sobre colunas estruturais de vidro (Tomas Serafinavicius et al, 2010).	17
Quadro 4 – Lista de trabalhos sobre painéis estruturais de vidro (Tomas Serafinavicius et al, 2010).	18
Quadro 5 - Esquema do diagrama de força – deslocamento e modo de rotura das vigas aço - vidro (Christian Louter et al, 2005).	20
Quadro 6 – Objectivos das diferentes fases de execução.....	28
Quadro 7 – Designação dos provetes correspondentes à Fase 1.	29
Quadro 8 – Designação dos provetes correspondentes à Fase 2.	30
Quadro 9 – Designação dos provetes correspondentes à Fase 3.	30
Quadro 10 – Designação dos provetes correspondentes à Fase 4.	31
Quadro 11 – Geometria dos provetes da Fase 1.	32
Quadro 12 – Posicionamento e identificação dos transdutores.	38
Quadro 13 – Distribuição dos extensómetros.....	39
Quadro 14 – Resultados obtidos nos ensaios realizados na Fase 1.	41
Quadro 15 – Resultados obtidos das primeiras fendas nos ensaios realizados na Fase 2.	44
Quadro 16 – Resultados obtidos nos ensaios realizados na Fase 3 e 4.....	47
Quadro 17 – Relação dos resultados obtidos nos ensaios dos provetes com adesivo C.	48
Quadro 18 – Coeficientes de ductilidade em força (ΔF) e em deslocamento (D).	50
Quadro 19 – Relação da prestação das vigas utilizando os diferentes adesivos no caso com prumos verticais.	51
Quadro 20 – Relação dos resultados obtidos nos ensaios realizados na Fase 3.	52
Quadro 21 – Coeficientes de ductilidade em força (ΔF) e em deslocamento (D).	52
Quadro 22 – Relação dos resultados obtidos nos ensaios realizados na Fase 4.	53
Quadro 23 – Coeficientes de ductilidade estática.	53
Quadro 24 – Distribuição das extensões e tensões na secção transversal da viga SP101 ao longo do ensaio de flexão (Fase 3).	56
Quadro 25 - – Distribuição das extensões e tensões na secção transversal da viga DC895 ao longo do ensaio de flexão (Fase 3).	59

Quadro 26 - Distribuição das extensões e tensões na secção transversal da viga Caixão ao longo do ensaio de flexão (Fase 4).	62
--	----

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Objectivos

A presente dissertação tem como principal objectivo avaliar o comportamento à flexão de vigas mistas vidro-madeira, tendo em vista a sua utilização estrutural em obras de Engenharia Civil, tanto na construção como na reabilitação, reforçando os valores dos sistemas estruturais mistos. Esta solução, a nível estético e estrutural, apresenta grandes vantagens ainda não devidamente exploradas. Os aspectos mais relevantes neste sistema estrutural são a iluminação natural – elemento chave na arquitectura – e a capacidade estrutural que concebe a um material frágil como o vidro.

A ideia que deu origem a este trabalho foi projectada pelo Arquitecto José Pequeno, que consiste numa pequena parcela de um projecto inovador. O projecto é constituído por um conjunto de estudos e trabalhos de maneira a compreender a ligação entre os dois materiais – Structural Timber-Glass Adhesive Bonding –, o comportamento mecânico das vigas mistas – Timber-Glass Composite Beams: Mechanical Behaviour & Architectural Solutions –, caracterização e potencialidades arquitectónicas do sistema misto vidro-madeira – Structural Timber-Glass Linear System: Characterization & Architectural Potentialities – e ainda o estudo energético de painéis vidro-madeira – Timber-Glass Composite Structural Panels: Tectonics, Sustainability & Integrated Energetic System Solutions.

Estes estudos tornam-se essenciais para a implementação de sistemas estruturais mistos em construções inovadoras. Relativamente ao comportamento dos materiais, a resistência à compressão do vidro e a resistência à tracção da madeira são observados e explorados, assim como a excessiva acumulação de tensões de compressão no vidro. Ainda neste contexto são também abordadas as várias formas de secções transversais, de forma a comparar a rigidez entre as diferentes geometrias ponderadas. A utilização de diferentes adesivos apresenta-se com o propósito de atingir a relação ideal entre resistência/ductilidade, levando à distribuição uniforme das tensões e reduzindo as fragilidades dos dois materiais.

1.2 Organização da Dissertação

Para além do presente capítulo, introdução, no qual é feita se apresentam a motivação e os objetivos do trabalho realizado, a dissertação encontra-se organizada em mais 6 capítulos.

No capítulo 2 é feita uma abordagem aos materiais vidro e madeira, focada na utilização destes como materiais estruturais e na comparação com outros materiais, analisando as suas principais características. Neste contexto, são ainda apresentadas bases de cálculo, preconizadas por Normas Europeias, para o dimensionamento de elementos em vidro e em madeira. Outro ponto analisado neste capítulo diz respeito à introdução ao conhecimento e métodos de cálculo de ligações coladas, divididas em ligações rígidas e ligações flexíveis. Por fim, completando o capítulo 2, são apresentados trabalhos de vários autores focados na utilização do vidro como material estrutural.

O capítulo 3 aborda todo o programa experimental realizado para análise do comportamento flexão das vigas vidro-madeira. Estão mencionados todos os objetivos pretendidos, as geometrias e a execução dos provetes, o equipamento utilizado como setup e registo de dados, e ainda o procedimento de ensaio. De referir que o programa experimental foi planeado e realizado pelo Arquitecto José Pequeno.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados. São apresentadas as curvas força-deslocamento e imagens dos modos de rotura obtidos em cada ensaio. Para uma melhor compreensão do comportamento das vigas são exibidas as forças de fendilhação e rotura com os respectivos deslocamentos.

No capítulo 5 são analisados todos os resultados apresentados no capítulo anterior. Os resultados são analisados através da observação das curvas força-deslocamento, das relações entre as forças de fendilhação e as forças de rotura, dos coeficientes de ductilidade e ainda da comparação das extensões e tensões distribuídas na secção transversal das vigas.

No capítulo 6 discutem-se as conclusões atingidas ao longo do trabalho realizado, justificando e corrigindo algumas opções tomadas, finalizando com sugestões para futuros estudos.

Para terminar o capítulo 7 diz respeito a futuros estudos que poderão desenvolver no âmbito deste tema.

2 ESTADO DE CONHECIMENTO

2.1 Vidro como Material Estrutural

O vidro é uma substância inorgânica, amorfa e fisicamente homogénea, obtida por resfriamento de uma massa em fusão que endurece pelo aumento contínuo de viscosidade até atingir a condição de rigidez, mas sem sofrer cristalização.

É utilizado pelo Homem desde há 5000 anos (Crompton, 1999), sendo somente utilizado em janelas, louça e mais tarde, com o desenvolvimento de técnicas de sopro, foi utilizado como matéria-prima de lâmpadas e outros elementos idênticos.

Nos últimos anos, o estudo do vidro como elemento estrutural aumentou por ser um material que concilia luz, transparência e estética com isolamento térmico, acústico, protecção solar e protecção contra choques, e ainda com a resistência ao fogo. A evolução de tecnologias de produção e de novas soluções permitiu assimilar conceitos arquitectónicos arrojados que garantem a comunicação entre o exterior e o interior mantendo o conforto e segurança.



(a)



(b)

Figura 1 – Estruturas de vidro: (a) La Vela em Milão; (b) Loja Apple em Nova Iorque.

No entanto, enquanto material estrutural, o vidro apresenta algumas desvantagens face aos materiais tradicionais, a referir o comportamento frágil e a reduzida resistência à tracção.

Para ultrapassar algumas desvantagens, a indústria do vidro tem recorrido ao melhoramento de dois métodos de fabrico: a têmpera do vidro e a laminação. No primeiro método, o vidro é sujeito a um tratamento térmico que introduz tensões de compressão nas suas arestas, provocando o fecho das fendas existentes e consequentemente aumento da tensão de rotura. O

princípio do segundo método consiste na união de dois ou mais vidros por butirais, com o objetivo de, no caso de uma placa de vidro quebrar, as placas adicionais evitarem o colapso e queda de material. Porém, estas duas soluções apenas contornam o problema do comportamento frágil do vidro, não o eliminando (Luís Valarinho et al, 2010). Então os tipos de vidro utilizados na construção são o recozido, o temperado, o termo-temperado e o laminado. O primeiro trata-se de um material monolítico, do qual se obtêm vidros com diferentes propriedades físicas e mecânicas utilizando tratamentos térmicos posteriores. Vidros temperados são conhecidos pela sua transparência e beleza associados à segurança e resistência permitindo a sua aplicação em projectos residenciais, comerciais e industriais. Ainda, o vidro laminado é o que oferece mais segurança em caso de quebra, uma vez que a existência de um filme de PVB (polivinibutiral) faz com que o vidro não apresente uma rotura frágil.

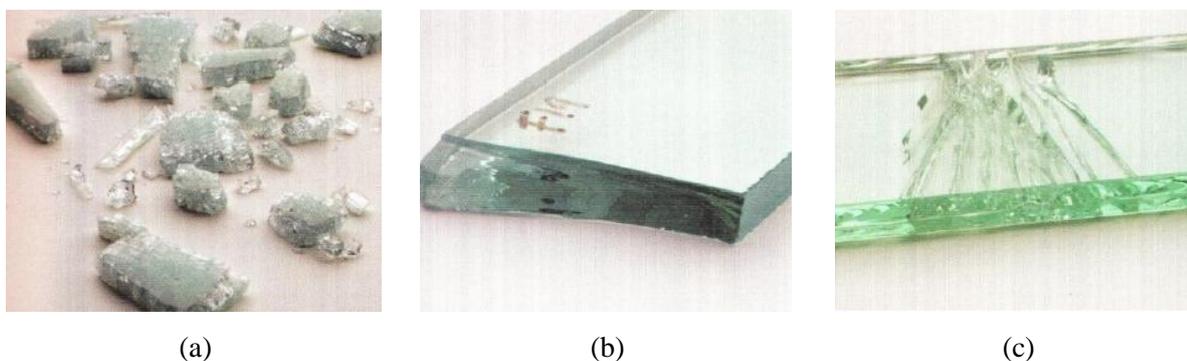


Figura 2 – Fracturas tipo do vidro: (a) vidro temperado; (b) vidro recozido; (c) vidro laminado. (Costa B. E., 2007).

A referência ao vidro como elemento estrutural necessita de uma distinção entre vidro estrutural e estrutura de vidro. Vidro estrutural diz respeito ao vidro que constitui elementos estruturais primários, como vigas, pilares e outros elementos de suporte, o que leva a que o seu comportamento tenha implicação directa na estabilidade da estrutura. Já nas estruturas de vidro, é usado para separar espaços (interior do exterior, por exemplo) constituindo assim um elemento de preenchimento, e não um elemento essencial para garantir a estabilidade global da estrutura. Além disso, nas estruturas de vidro, mesmo aquelas que não suportam cargas permanentes, o vidro pode ter que resistir a outras cargas, como a acção do vento, da neve, entre outras.



(a)



(b)

Figura 3 – Estruturas de vidro: (a) Sede da EDP, no Porto; (b) Estação Central de Berlim.

Tecnicamente, o vidro é considerado um líquido porque que as moléculas são desorganizadas como um fluido, mas a ligação entres elas são rígidas como um sólido, promovendo um comportamento mecânico linear perfeitamente elástico (White, 2007). A energia necessária para romper as ligações químicas entre os constituintes deste material corresponde à resistência teórica do vidro. Defeitos no vidro influenciam a sua resistência uma vez que originam concentração de tensões. No Quadro 1 apresentam-se as propriedades mecânicas e físicas mais relevantes do vidro.

Quadro 1 – Propriedades mecânicas e físicas mais relevantes do vidro (Costa B. E., 2007).

Propriedade	Valor	
Peso Específico	25000 kg/m ³	
Elasticidade	Módulo de elasticidade, E	70 GPa
	Módulo de distorção, G	26-33 GPa
	Coefficiente de Poisson, ν	0,20
Resistência	Flexão (vidro recozido)	40 MPa
	Flexão (vidro temperado)	120-200 MPa
	Compressão	1000 MPa
	Tracção	30-70 MPa
Dureza	5-6 (Escala de Mohs)	
Temperatura de Fusão	600 °C	
Comportamento térmico	Condutibilidade térmica	1,0 W/mK
	Coefficiente de dilatação térmica	9x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Comportamento ao fogo	Incombustível	

De uma perspectiva social, o vidro provoca efeitos psicológicos de não apresentar privacidade e ser um material frágil e fraco, encaminhando o vidro apenas para a utilização não estrutural. Mas, mais uma vez, estudos provam que o vidro pode vir a tornar-se num dos maiores materiais estruturais (White, 2007).



Figura 4 – Skywalk no Grand Canyon

2.1.1 Bases de Cálculo

Existem várias Normas Europeias para a utilização do vidro na construção. Estas normas consistem em determinar as propriedades do vidro que se está a utilizar.

A Norma Europeia mais relevante para a utilização do vidro como material estrutural é a EN 1288, *Glass in buildings – Determination of the bending strength of glass* (determinação da resistência à flexão do vidro). Esta norma divide-se em 5 partes:

- *Part 1 – Fundamentals of testing glass;*
- *Part 2 – Coaxial double ring test on flat specimens with large test surface areas;*
- *Part 3 – Test with specimens at two points, four point bending;*
- *Part 4 – Testing of channel shaped glass;*
- *Part 5 - Coaxial double ring test on flat specimens with small test surface areas.*

Tendo em consideração que o vidro irá ser utilizado com mais frequência como material estrutural, é necessário criar uma Norma Europeia de forma a uniformizar regras específicas para trabalhos de engenharia civil, assim como outros que beneficiaram desta nova norma.

A EN, ISO e as Normas Nacionais para produtos de vidro existem juntamente com orientações produzidas pela International Technical and Scientific Organizations, mas nenhum destes títulos especifica a utilização de produtos de vidro como elementos estruturais. A comissão dos Eurocódigos não contem regras para a utilização de estruturas de vidro, excetuando o Eurocódigo 0 – EN 1990. Este tema é discutido por R. Zarnic, que tenta realçar o valor do vidro na construção (R. Zarnic et al, 2007).

2.2 Madeira como Material Estrutural

A madeira é um material orgânico, proveniente de plantas lenhosas. Como tem origem num meio natural torna-se num material de elevada variabilidade, anisotrópico e não homogéneo. Devido a estas características naturais, e sendo esta uma fonte de matéria-prima inesgotável, foi desde sempre usada na construção (Costa B. E., 2007). Em obra, a madeira é utilizada para múltiplas finalidades, destacando-se na solução de problemas relacionados a coberturas, a cofragens, a escoramentos. Para além disso, é muito aplicada em componentes como painéis divisórios, portas, revestimentos, etc. (Carlito Junior et al, 2003).



Figura 5 – Exemplo de casas de madeira.

Hoje em dia, a madeira tem conquistado vários sectores da construção por ser um material extremamente competitivo no domínio da criação estrutural e arquitectónica. A sua utilização em coberturas, principalmente de polidesportivos, bem como piscinas e edifícios antigos, tem vindo a aumentar, mostrando-se uma solução viável tanto na estética como na economia da obra. Muitas vezes, este material é evitado como matéria-prima estrutural por ser considerado de baixa durabilidade e incapaz de desempenhar as suas funções. Estas razões conduzem a uma errada desvalorização das estruturas de madeira, levando a uma maior utilização do aço e do betão. Contudo, a valorização da madeira como material estrutural só aumentará com a compreensão das suas características físicas e mecânicas (Appleton, 2003).



(a)



(b)

Figura 6 – Estruturas de madeira: (a) Ponte de Kintaiyō em Iwakuni; (b) Metropol Parasol em Sevilha.

Um das grandes características a salientar deste material é a sua elevada resistência quando comparada com o seu peso. A madeira apresenta uma razão resistência/peso 30% superior à do aço e 10 vezes superior à do betão em compressão. No que diz respeito à resistência ao fogo, a madeira demonstra excelentes resultados, devido à taxa de combustão ser bastante lenta e as propriedades da zona não ardida manterem-se praticamente inalteradas, Figura xx. Apesar desta característica questionada por grande parte da população, existem revestimentos incombustíveis que permitem proteger a madeira contra o fogo. Na verdade, a combustão dos elementos que se encontram dentro da habitação (mobiliário, tapetes, decorativos) proporcionam um maior risco para a vida humana, devido à libertação de gases tóxicos. (Costa B. E., 2007).



Figura 7 – Bloco de madeira (abeto) exposta ao fogo.

Quanto à durabilidade, a madeira é extraordinariamente durável podendo conservar-se por muitos anos, a não ser que esteja submetida frequentemente a grandes variações de humidade. Por exemplo, edifícios antigos, como igrejas, conservaram-se durante muitos anos sem necessidade de intervenção. Exemplos incríveis, embora mais recentes, são o das fundações do Empire State Building, em Nova Iorque, da ponte de Brooklyn e ainda do estádio de Louisiana, que são de estacas de madeira.



Figura 8 – Edifícios com fundações madeira: (a) Empire State Building; (b) Ponte de Brooklyn; (c) Estádio de Louisiana.

Actualmente existe uma grande variedade de escolha em relação ao tipo de madeira a utilizar na construção, principalmente devido ao aparecimento dos seus derivados, envolvendo uma diversidade de propriedades físicas e mecânicas. Comparando estas propriedades com as do aço e do betão, a madeira apresenta valores bastante competitivos.

Quadro 2 – Comparação entre os valores médios das tensões admissíveis e do módulo de elasticidade para madeira, betão e aço (Claude, 1995).

Material	Massa Volúmica (kg/m ³)	Flexão (MPa)	Tração (MPa)		Compressão (MPa)		Corte (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
			//	⊥	//	⊥		
Madeira	560	12	12	0,15	11	2,8	1,2	11
Betão	2400	8	0,6		8		0,6	30
Aço	7800	170	170		170		100	210

Estudos destinados à construção sustentável definem a madeira como um material de imensas vantagens sobre outros. O ciclo de vida da madeira demonstra que esta prevalece favoravelmente sobre o aço ou o betão no que diz respeito à emissão de gases, libertação de poluentes para o ar, produção de poluentes para a água e produção de resíduos sólidos (Costa B. E., 2007). Por essa razão, a madeira torna-se num material ideal para uma racionalização ecológica de qualquer construção, diminuindo o consumo energético, a utilização de recursos, a poluição e, sobretudo, o impacto ambiental.

Relativamente à utilização excessiva de madeira como material de construção, existe algum problema? Esta questão dá origem uma resposta simples por parte das políticas florestais que garantem uma reflorestação contínua sem que haja falta de fornecimento de matéria-prima

para a indústria. Ainda assim, as novas tecnologias de produção permitem que todas as zonas das árvores sejam utilizadas e que nada seja desaproveitado.

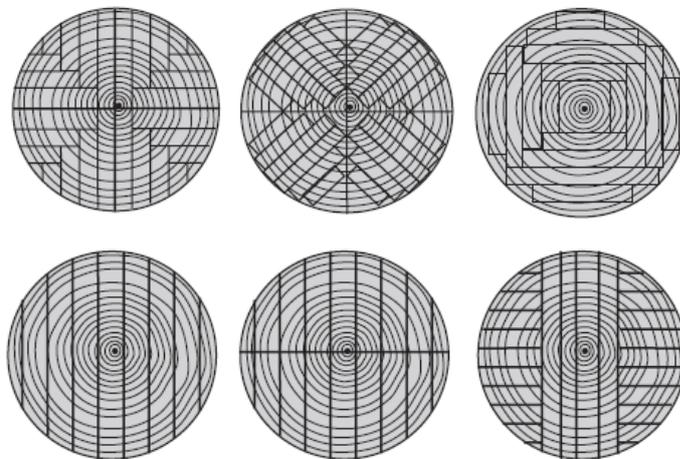


Figura 9 – Cortes típicos da madeira (Porteous & Kermani, 2007).

2.2.1 Bases de Cálculo – Eurocódigo

Os Eurocódigos formam um conjunto de documentos que possibilita a concepção de edifícios e estruturas de engenharia civil a seguir uma norma comum em toda a União Europeia. Estes documentos estão organizados de forma hierárquica:

- EN 1990, *Eurocódigo 0 – Bases para o projecto de estruturas*;
- EN 1991, *Eurocódigo 1 – Ações em estruturas*.

Estes são completados por outros Eurocódigos definidos por métodos particulares de projecto segundo os materiais usados – madeira, aço, betão, etc.

O Eurocódigo responsável pelo projeto de estruturas de madeira é o EN 1995, Eurocódigo 5: *Design of timber structures*. É constituído por três partes:

- EN 1995-1-1 *Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings* (Regras gerais e regras para edifícios);
- EN 1995-1-2 *Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design* (Ação do fogo);
- EN 1995-2 *Design of timber structures – Part 2: Bridges* (Pontes).

2.3 Ligações Coladas

Este tipo de ligações é aplicável a uma vasta variedade de materiais, desde a madeira, o vidro, o aço, a alvenaria, a fibra de carbono ou até mesmo o betão. Um exemplo de ligações coladas consiste numa técnica, já bastante desenvolvida, de colar varões ou barras de aço no interior de elementos de madeira de modo a estabelecerem continuidade entre os elementos, Figura 10 (Martins & Guerra, 2005).

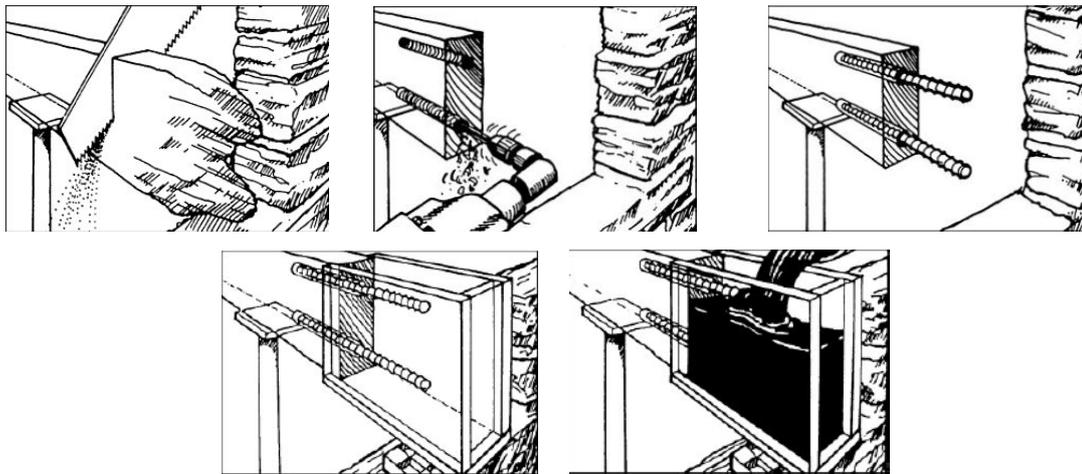


Figura 10 – Sistema de substituição de entrega danificada (Martins & Guerra, 2005).

Os produtos adesivos utilizados para este tipo de conexão são decididos conforme o uso pretendido ou as restrições que o sistema impõe. Estes podem estabelecer ligações rígidas, semi-rígidas ou flexíveis, o que se torna decisivo no funcionamento de um sistema misto.

2.3.1 Ligações Flexíveis

As ligações flexíveis consideram que todos os elementos têm um comportamento independente dos restantes. A Figura 11 representa um esquema de tensões de uma viga mista, simplesmente apoiada, em flexão.

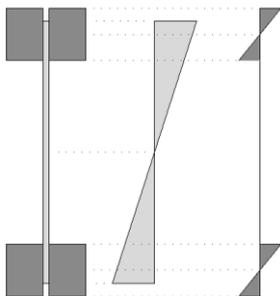


Figura 11 – Esquema das tensões de secções mistas com ligações flexíveis.

Os valores de cálculo para a tensão resistente à flexão deverão ser obtidos a partir da Equação (1).

$$f_{m,d} = k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (1)$$

Sendo k_{mod} o coeficiente que considera o efeito da duração das acções e do teor de água e γ_M o coeficiente parcial de segurança.

A verificação da segurança de uma determinada secção transversal é traduzida pela Equação (2).

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{sd}}{I} \times Z \leq f_{m,d} \quad (2)$$

2.3.2 Ligações Rígidas

Neste tipo de ligações, o modelo de análise leva à consideração de um comportamento conjunto entre os materiais, como está representado na Figura 12.

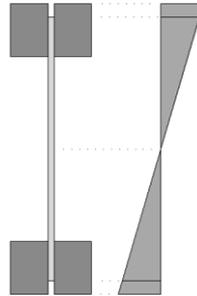


Figura 12 – Esquemas das tensões de seções mistas com ligações rígidas.

O Eurocódigo 5 (EN-1995-1-1, 2004) prevê a metodologia de cálculo de vigas coladas de alma delgada para seções em madeira maciça ou derivados de madeira.

- (1) Se uma variação linear da extensão ao longo da altura da viga for assumida, as tensões axiais no banzo, de derivado de madeiras, deverão satisfazer as expressões seguintes:

$$\sigma_{f,c,max,d} \leq f_{m,d} \quad (3)$$

$$\sigma_{f,t,max,d} \leq f_{m,d} \quad (4)$$

$$\sigma_{f,c,d} \leq K_C \times f_{c,0,d} \quad (5)$$

$$\sigma_{f,t,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6)$$

Onde:

$\sigma_{f,c,max,d}$ é o valor de cálculo da tensão de compressão na fibra extrema do banzo;

$\sigma_{f,t,max,d}$ é o valor de cálculo da tensão de tracção na fibra extrema do banzo;

$\sigma_{f,c,d}$ é o valor de cálculo da tensão de compressão na fibra média do banzo;

$\sigma_{f,t,d}$ é o valor de cálculo da compressão de compressão na fibra média do banzo;

K_C é o factor que tem em conta a instabilidade lateral (encurvadura).

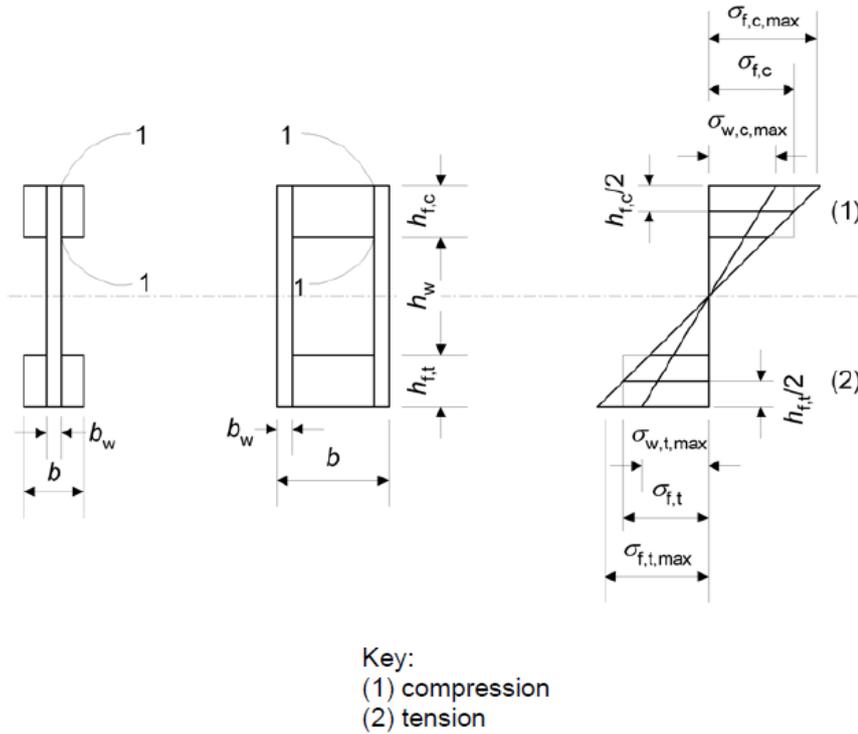


Figura 13 – Vigas de alma delgada (EN-1995-1-1, 2004).

(2) O factor k_c pode ser determinado (do lado da segurança, especialmente para vigas caixão) de acordo com:

$$\lambda_z = \sqrt{12} \times \left(\frac{l_c}{b}\right) \quad (7)$$

Onde:

l_c é a distância entre as secções onde a deformação lateral dos banzos comprimidos é impedida (comprimento de encurvadura);

b é dado na Figura 13.

Se uma análise mais detalhada for feita no que respeita à instabilidade lateral da viga como um todo, pode ser assumido que $K_C = 1,0$.

(3) As tensões axiais na alma deverão satisfazer as seguintes expressões:

$$\sigma_{w,c,d} \leq f_{c,w,d} \quad (8)$$

$$\sigma_{w,t,d} \leq f_{c,t,d} \quad (9)$$

Onde:

$\sigma_{w,c,d}$ e $\sigma_{w,t,d}$ são os valores de cálculo das tensões de compressão e tracção das almas, respectivamente;

$f_{c,w,d}$ e $f_{c,t,d}$ são os valores de cálculo de compressão e resistência à flexão das almas, respectivamente.

(4) Salvo o fornecimento de outros valores, o valor de cálculo da resistência à flexão das almas deve ser tomado como o valor de cálculo da resistência à tracção ou compressão.

(5) Deve ser verificado que qualquer zona de ligação colada possui resistência suficiente.

(6) Salvo os casos em que uma mais detalhada análise da encurvadura seja feita, dever-se-á verificar que:

$$h_w \leq 70b_w \quad (10)$$

e

$$F_{v,w,Ed} \leq \begin{cases} b_w h_w \left(1 + \frac{0,5h_{f,t} + h_{f,c}}{h_w} \right) f_{v,0,d} \text{ para } h_w \leq 35b_w \\ 35 b_w^2 \left(1 + \frac{0,5h_{f,t} + h_{f,c}}{h_w} \right) f_{v,0,d} \text{ para } 35b_w \leq h_w \leq 70 b_w \end{cases} \quad (11)$$

Onde:

$F_{v,w,Ed}$ é o valor de cálculo do esforço transversal actuante em cada alma;

$h_{f,c}$ é a altura do banzo comprimido;

$h_{f,t}$ é a altura do banzo traccionado;

b_w é a largura de cada alma;

$f_{v,0,d}$ é o valor de cálculo da resistência ao corte da alma.

(7) Para almas de placas de derivados de madeira, deve ser, para as secções 1-1 na Figura 13, verificado que:

$$\tau_{mean,d} \leq \begin{cases} f_{v,90,d} & \text{para } h_f \leq 4 b_{ef} \\ f_{v,90,d} \left(\frac{4b_{ef}}{h_f} \right)^{0,8} & \text{para } h_f > 4 b_{ef} \end{cases} \quad (12)$$

Onde:

$\tau_{mean,d}$ é o valor de cálculo da tensão de corte nas secções 1-1, assumindo uma distribuição uniforme de tensões;

$f_{v,90,d}$ é o valor de cálculo da resistência ao corte rasante da alma;

h_f tanto é $h_{f,c}$ como $h_{f,t}$.

$$b_{ef} \leq \begin{cases} b_w & \text{para vigas em caixão} \\ \frac{b_w}{2} & \text{para vigas em I} \end{cases} \quad (13)$$

2.4 Sistemas Mistos Estruturais

2.4.1 Generalidades

Os sistemas mistos têm em vista a optimização dos materiais utilizados, de forma a contornar desvantagens de um dos materiais ou utilizar as melhores características de ambos. Em relação ao vidro o objectivo é reforçar as suas fragilidades de modo a obter um sistema misto estrutural eficaz e seguro.

A transparência e iluminação são os principais desafios na construção estrutural em vidro. Nos dias de hoje, o interesse na utilização do vidro como elemento estrutura tem aumentado significativamente, o que leva a questões de como se comportará o vidro sendo utilizado como elemento estrutural – como colunas, painéis e vigas. A melhor forma de obter respostas para este tipo de questões é no desenvolvimento de investigações e estudos sobre o tema. Os próximos quadros demonstram alguns dos trabalhos desenvolvidos até 2010.

- Colunas estruturais de vidro

Quadro 3 – Lista de trabalhos sobre colunas estruturais de vidro (Tomas Serafinavicius et al, 2010).

Autor(es), Ano	Título	Resumo / Conclusões
(Veer & Pastunink, 1999)	Desenvolvimento de um pilar tubular transparente	O modo de rotura das colunas transparentes tem um comportamento similar às colunas de alumínio ou aço. Quando estiverem completamente desenvolvidas, estas colunas podem ser usadas como um elemento estrutural transparente com a segurança e a resistência do aço.
(Luible & Crisinel, 2005)	Encurvadura de elementos de vidro em compressão	A encurvadura de uma coluna de vidro em compressão depende principalmente da deformação inicial, da espessura do vidro e da resistência ao corte da camada de PVB na interface.
(Blaauwendraad, 2008)	Encurvadura de colunas de vidro laminado	A nova fórmula da força de encurvadura demonstra a eficácia da camada interior entre os elementos de vidro.

- Painéis estruturais de vidro

Quadro 4 – Lista de trabalhos sobre painéis estruturais de vidro (Tomas Serafinavicius et al, 2010).

Autor(es), Ano	Título	Resumo / Conclusões
(Huveners, E. et al, 2007)	Carregamento no plano em painéis de vidro	Uma fachada em vidro não pode ser atribuída uma função estrutural nas presentes normas, mas painéis de vidro têm capacidade resistente no plano. Três sistemas de imobilização foram testados. As tensões e deslocamentos dos sistemas foram analisados. As conclusões tiradas dizem respeito à segurança e manutenção das fachadas em vidro.
(Englhardt, O. et al, 2007)	Elementos híbridos estruturais – um inovador sistema de vidro-aço	Painéis de vidro estruturais têm grande potencial. Com a utilização de painéis de vidro como superfícies de estruturas, a capacidade suporte no plano é possível. O presente sistema estudado pode ser o início de várias formas de aplicação do vidro em engenharia e arquitectura.
(Teixidor, 2010)	Painéis mistos vidro-alumínio	A capacidade resistência do vidro pode ser melhorada com a junção de alumínio. Este trabalho mostra como um sistema misto como o vidro – aço pode ser aplicado como um sistema estrutural inovador para fachadas, lajes e coberturas.

- Vigas estruturais de vidro

Nos próximos subcapítulos são apresentados vários estudos sobre vigas mistas.

2.4.2 Soluções Vidro-aço

Um dos materiais elegidos quando o objectivo passa por resistir a esforços de tracção é o aço. Assim sendo, Louter, da Universidade Tecnológica de Delft, apresenta um estudo sobre este tipo de estruturas, recorrendo à aplicação de barras de aço inoxidável como reforço em vigas de vidro laminado.

De forma a tornar as vigas de vidro mais seguras, as barras de aço foram aplicadas na zona onde a viga está sujeita a tensões de tracção, ou seja na zona inferior. Com esta perspectiva, Louter estudou duas tipologias de vigas, como indica na Figura 14, acompanhadas pelo esquema de ensaio utilizado.

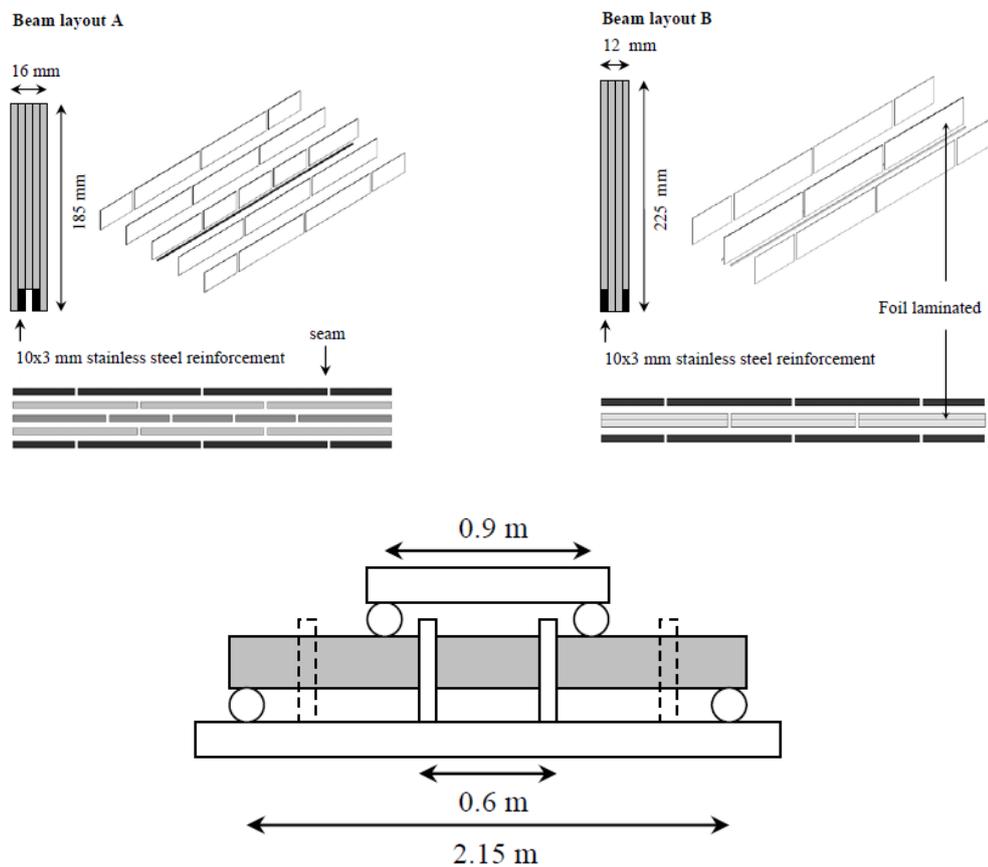
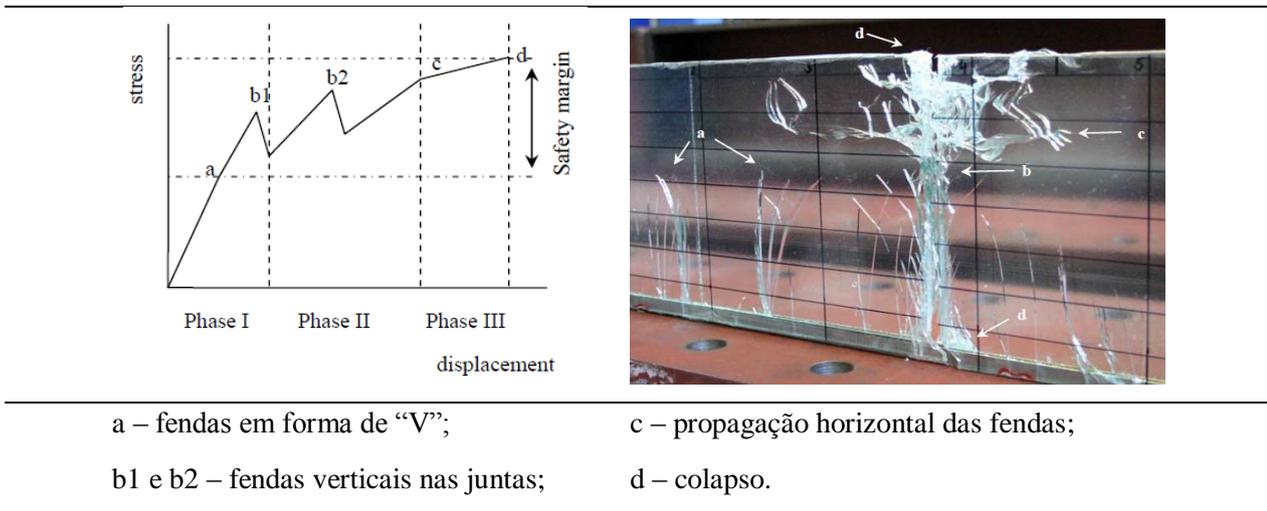


Figura 14 – Vigas de vidro reforçadas com aço; esquema de ensaio (Christian Louter et al, 2005).

As conclusões retiradas pelo autor foram que as vigas apresentaram um modo de rotura gradual, começando por ocorrer fendas em forma de “V” no vidro na zona de momentos máximos, sendo seguido por fendas verticais na zona das juntas que começam a propagando-

se na horizontal e por fim ocorre o colapso na zona das juntas. Com estes modos de rotura exibidos por ambas as tipologias definidas pelo autor, a viga B teve melhores resultados do que a viga A em relação à força de colapso. O esquema do diagrama de força – deslocamento obtido nos ensaios foi o apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Esquema do diagrama de força – deslocamento e modo de rotura das vigas aço - vidro (Christian Louter et al, 2005).



A ductilidade adquirida pelas vigas é exibida através da margem de segurança apresentada no quadro anterior. Depois da primeira fenda, a viga ainda é capaz de desempenhar a sua função até 2,6 vezes maior que a carga de fendilhação.

Um dos fatores que Louter focou foi que a torção lateral nas vigas mais esbeltas deve ser considerada. Então utilizou o mesmo conceito mas com geometrias diferentes de modo a contornar o problema provocado pelo esforço de torção.

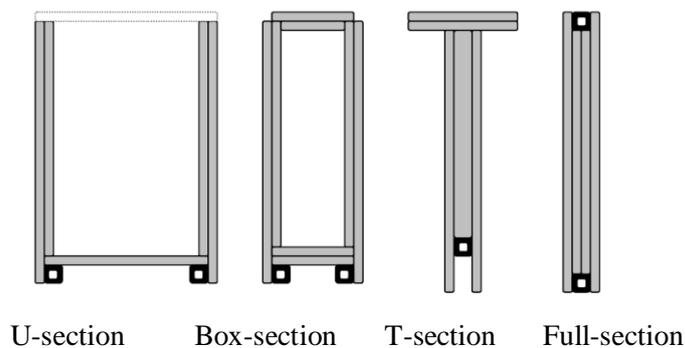


Figura 15 – Tipologias das vigas aço – vidro (Louter, 2007)

Miloš Slivanský, da Universidade Tecnológica da Eslováquia, também analisou o reforço de vigas de vidro com aço. O estudo consistiu em testar 4 tipos de vigas de vidro – vigas de vidro recozido e vigas de vidro temperado em interação com elementos de aço (como reforço).

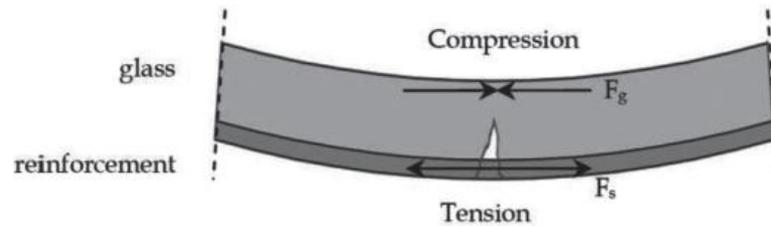


Figura 16 – Esquema da distribuição de forças posterior à rotura do vidro (Slivanský, 2012).

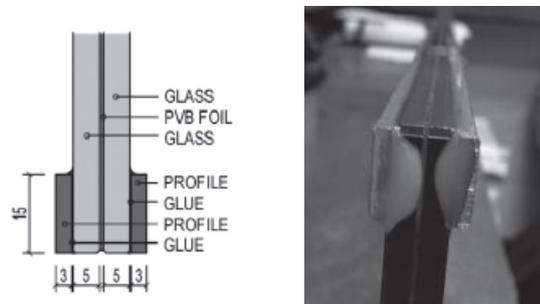


Figura 17 – Configuração dos provetes ensaiados (Slivanský, 2012).

Apesar de apresentarem modos de rotura diferentes, como ilustra a Figura 18, as vigas mistas de vidro temperado apresentaram uma maior resistência à flexão cerca de 30% superior às vigas de vidro recozido.

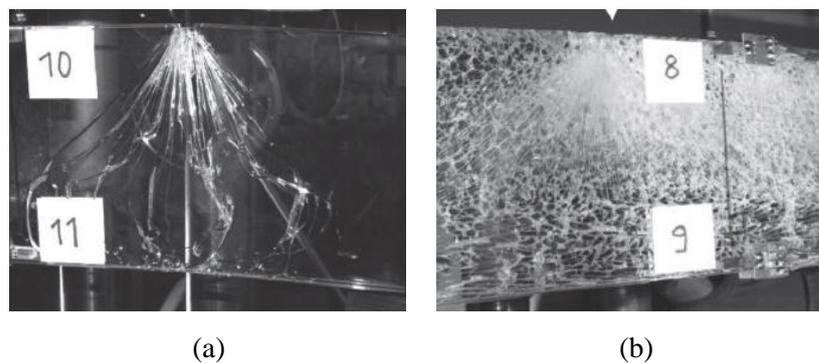


Figura 18 – Modos de rotura: (a) Viga de vidro recozido; (b) Viga de vidro temperado (Slivanský, 2012).

Outros autores também realizaram estudos sobre sistemas aço – vidro com configurações diferentes, como por exemplo F.A. Veer, da Universidade de Delft, que apresentou um estudo relativamente diferente, testando vigas de vidro e vigas de vidro reforçadas, em que demonstrou a diferença na utilização de 2 tipos de vidro e o reforço em aço. A Figura 19 apresenta a geometria da secção transversal da viga de vidro reforçada.

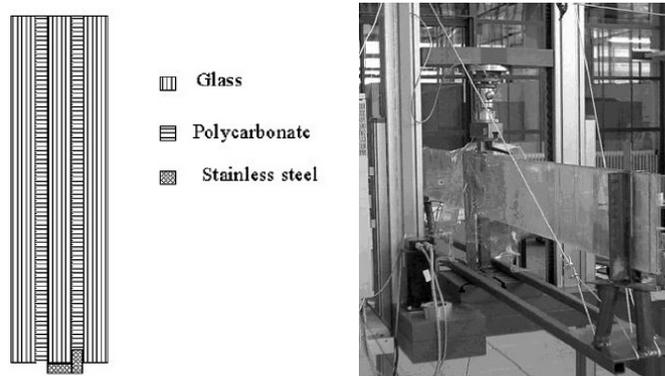


Figura 19 – Secção transversal da viga de vidro reforçada e setup do ensaio (F.A.Veer et al, 2003).

As principais conclusões do autor foram que o vidro laminado apresentou uma tensão de rotura menor mas pela sua rotura ser previsível torna-se mais seguro, o vidro laminado reforçado teve um comportamento estrutural mais seguro mas encontrar um adesivo eficaz para a interface entre o vidro e o polycarbonato torna-se um problema.

2.4.3 Soluções Vidro-Madeira

Uma das soluções mistas esteticamente mais apreciadas e ecológicas, são os sistemas vidro-madeira. Este sistema beneficia do facto de a madeira coabitar facilmente na conexão com outros materiais, aproveitando o máximo de proveito do sistema.

Quando se pretende o funcionamento em conjunto de dois materiais, a ligação entre os dois materiais torna-se no principal elemento do sistema. Então, Louise Blyberg, da Universidade de Linnaeus na Suécia, apresenta um trabalho de investigação com 3 tipos de adesivos para aplicação de sistemas estruturais madeira – vidro. O trabalho consistiu em testar os adesivos de silicone, de acrílico e de poliuretano tanto à tracção como ao corte. Os esquemas de ensaio estão apresentados na Figura 20.

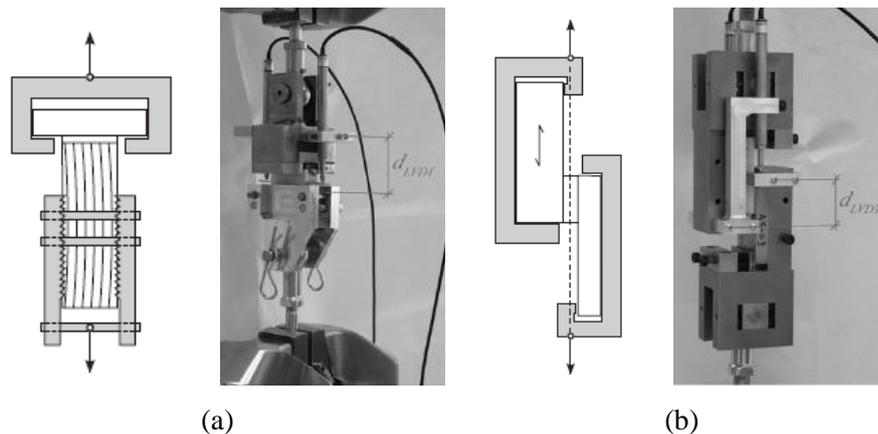


Figura 20 – Esquemas de ensaios: (a) para tracção; (b) para corte (Louise Blyberg et al, 2012).

Os resultados revelaram que o adesivo de acrílico ofereceu mais resistência tanto à tracção como ao corte. Além disto, foi demonstrado como as rotações nos provetes podem ser detectadas através de um sistema de medição óptico e como o modelo de elementos finitos pode ser usado para o estudo da ligação entre os dois materiais. Com a combinação de resultados obtidos, concluí que o silicone muito influenciado pela seu comportamento quase incompressível.

Relativamente a elementos estruturais, Louise Blyberg juntamente com Erik Serrano, também da Universidade de Linnaeus na Suécia, apresentaram um trabalho de investigação que demonstra a resistência à flexão de vigas em “I” de madeira – vidro, onde os banzos são de LVL (Laminated Veneer Lumber) e a alma de vidro laminado, Figura 21. O esquema de ensaio usado está ilustrado na Figura 22.

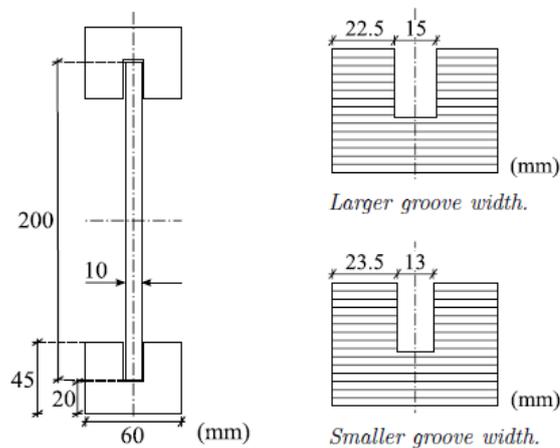


Figura 21 – Secção transversal das vigas vidro-madeira (Blyberg & Serrano, 2010).

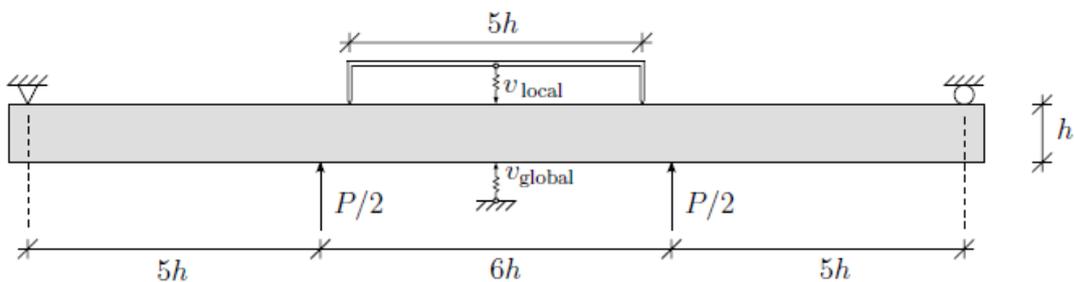


Figura 22 – Esquema de ensaio (Blyberg & Serrano, 2010).

Os adesivos usados para este trabalho foram de silicone, de acrílico e de poliuretano. Destes três adesivos, o acrílico foi o que teve uma melhor performance, apresentando maior carga resistente e menores deslocamentos. Os resultados alcançados e os modos de rotura são apresentados na Figura 23.

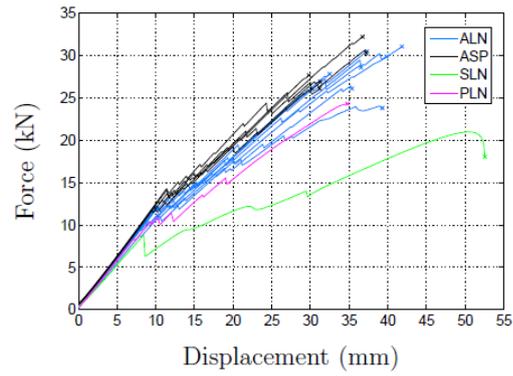


Figura 23 – Curvas força – deslocamento dos ensaios realizados e modos de rotura (Blyberg & Serrano, 2010).

2.4.4 Soluções Vidro-GFRP

GFRP trata-se de um compósito de polímero reforçado com fibras de vidro. Este material tem como função aumentar a capacidade resistente do vidro à tracção. Deste modo, Luís Valarinho et al do IST de Lisboa, estudaram o comportamento estrutural de vigas mistas GFRP - vidro.

O trabalho consistiu em realizar ensaios de flexão de vigas de vidro simples e de vigas mistas com secção transversal rectangular e em “I”, Figura 24.

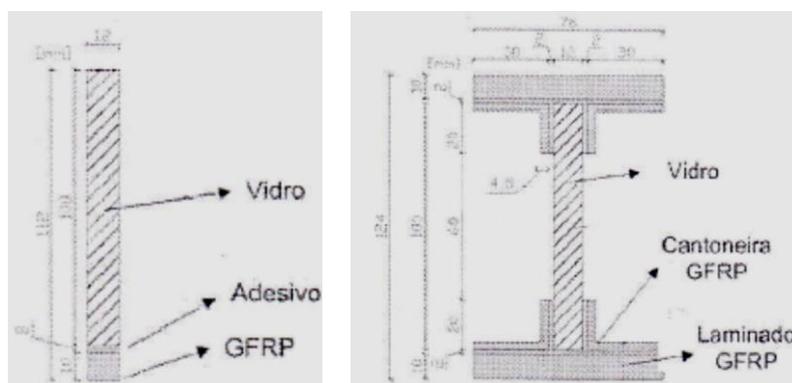


Figura 24 – Geometria das vigas vidro-GFRP (Luís Valarinho et al, 2010).

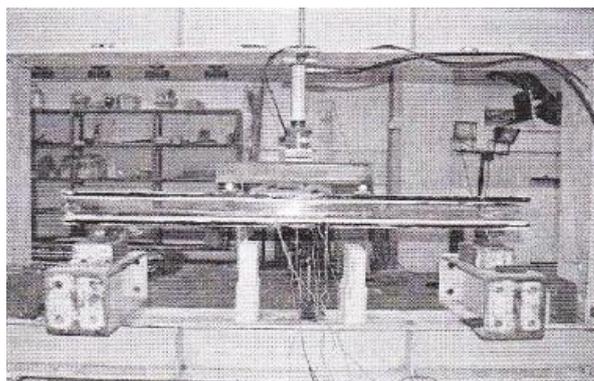


Figura 25 – Esquema de ensaio (Luís Valarinho et al, 2010).

As principais conclusões retiradas dos ensaios realizados foram que as vigas mistas apresentaram uma rotura dúctil, com um aumento significativo da capacidade resistente e da deformação após fendilhação do vidro, o que não ocorreu nas vigas de vidro simples.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A conceção e definição do presente programa experimental têm por base o estudo relativamente à performance dos adesivos a usar na ligação vidro-madeira realizado pelo Arquitecto José Pequeno – Structural Timber-Glass Adhesive Bonding (Pequeno et al, 2006). Nesse estudo, analisou-se o comportamento de 25 adesivos ao corte, temperatura e saturação de água, num total de 248 ensaios. De forma sucinta, as figuras seguintes apresentam os esquemas de ensaios utilizados nos vários ensaios efetuados.

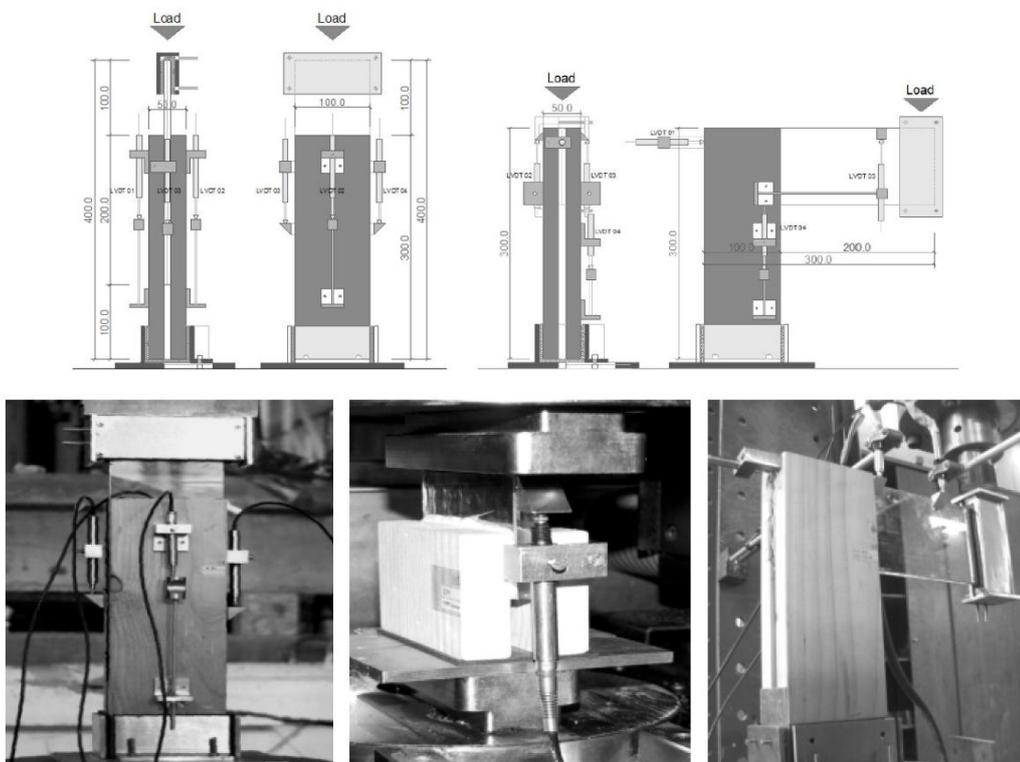


Figura 26 – Esquemas de ensaios e imagens dos ensaios realizados (Pequeno et al, 2006).

Os vastos resultados destes ensaios revelaram que a escolha do adesivo adequado para a união de elementos estruturais vidro-madeira é dependente da geometria da secção transversal, do comportamento mecânico do material e da carga aplicada.

O programa experimental que suporta este estudo foi realizado pelo Arquitecto José Pequeno – Timber-Glass Composite Beams: Mechanical Behaviour & Architectural Solutions (Pequeno et al, 2006) –, e consiste na execução de 4 fases. A primeira fase corresponde à caracterização material do vidro e da madeira. Na Fase 2 são realizados ensaios de flexão a três pontos de vigas em “I” com e sem prumos, avaliando a eficácia dos adesivos, os prumos verticais e a influência do vão livre. Na Fase 3 são testadas à flexão a quatro pontos duas vigas em “I” com diferentes adesivos. Na fase final, a Fase 4, é ensaiada à flexão uma viga de secção caixão – viga caixão.

Quadro 6 – Objectivos das diferentes fases de execução.

Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Caracterização dos materiais vidro e madeira 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eficácia dos adesivos; ▪ Eficácia dos prumos verticais; ▪ Influência do vão livre. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Selecção de dois adesivos da Fase 2; ▪ Comparação de 2 adesivos da Fase 2 através de vigas de 3,2 m de comprimento. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Selecção de um adesivo da Fase 3; ▪ Estudo da secção caixão.

3.1 Fase 1 (caracterização dos materiais)

A fim de obter uma base de referência relativamente à eficácia deste sistema misto, efectuou-se ensaios dos elementos do sistema separadamente, a madeira e o vidro. Realizaram-se ensaios à flexão de um provete de vidro e quatro provetes de madeira com 3,2 m de vão livre (ensaio de flexão a quatro pontos).

Quadro 7 – Designação dos provetes correspondentes à Fase 1.

Material	Viga	Vão Livre (m)
Vidro	V01	
Madeira	M01	3,20
	M02	
	M03	
	M04	

3.2 Fase 2 (flexão a 3 pontos de vigas “I” com e sem prumos)

A selecção dos adesivos teve como base um trabalho experimental, desenvolvido pelo Arquitecto Pequeno, que consistiu em ensaios ao corte de um conjunto de seis adesivos diferentes. Os seis adesivos, apresentados na Figura 27, são respetivamente, poliuretano, polímeros superflex, silicone, metacrilato e acrílico - em formato bi-componente e em fita bi-adesiva.



(a)



(b)

Figura 27 – (a) Adesivos utilizados na campanha experimental; (b) Provetes realizados. (Costa B. E., 2007)

Os adesivos seleccionados para a segunda fase deste trabalho estão apresentados no Quadro 8. Os ensaios correspondentes a esta fase, dizem respeito a ensaios à flexão em vigas simplesmente apoiadas com três vãos distintos, solicitados por uma carga pontual a meio vão.

Uma vez que é feita a comparação entre os provetes com ou sem prumos com o adesivo de Polímero (C), é dispensável a execução de provetes sem prumos para os restantes adesivos.

Quadro 8 – Designação dos provetes correspondentes à Fase 2.

Adesivo	Viga		Vão Livre (m)
	Com prumos	Sem prumos	
Polímero (C)	C01	C04	0,65
	C02	C05	1,00
	C03	C06	1,70
Poliuretano (Q)	Q01	-	0,65
	Q02	-	1,00
	Q03	-	1,70
Silicone (S)	S01	-	0,65
	S02	-	1,00
	S03	-	1,70

3.3 Fase 3 (flexão a 4 pontos de vigas “I”)

Esta fase consiste em ensaiar à flexão a quatro pontos vigas simplesmente apoiadas de 3,20 m de vão. Os adesivos preferidos para a execução destes ensaios foram o polímero (C) e o silicone (S).

Quadro 9 – Designação dos provetes correspondentes à Fase 3.

Viga / Adesivo	Vão Livre (m)
Sem prumos	
SP101 / C DC895 / S	3,20

3.4 Fase 4 (flexão a 4 pontos de uma viga caixão)

A fase 4 aborda a diferença na alteração da secção transversal entre a viga DC895 e a viga caixão. A secção transversal de comparação trata-se de uma secção em caixão, com o adesivo S (silicone) a fazer a ligação entre os dois materiais.

Quadro 10 – Designação dos provetes correspondentes à Fase 4.

Viga / Adesivo	Vão Livre (m)
Secção caixão	
Caixão / S	3,20

3.5 Preparação dos ensaios

3.5.1 Materiais

- Adesivos

Os adesivos utilizados na campanha experimental foram o polímero (C), o silicone (S) e o poliuretano (Q). O polímero e o silicone correspondem a adesivos flexíveis de polímero branco e silicone preto, respectivamente, enquanto o poliuretano corresponde a uma cola rígida.

- Vidro

O vidro laminado simples foi o tipo de vidro seleccionado para o programa experimental, com uma espessura de 12 mm.

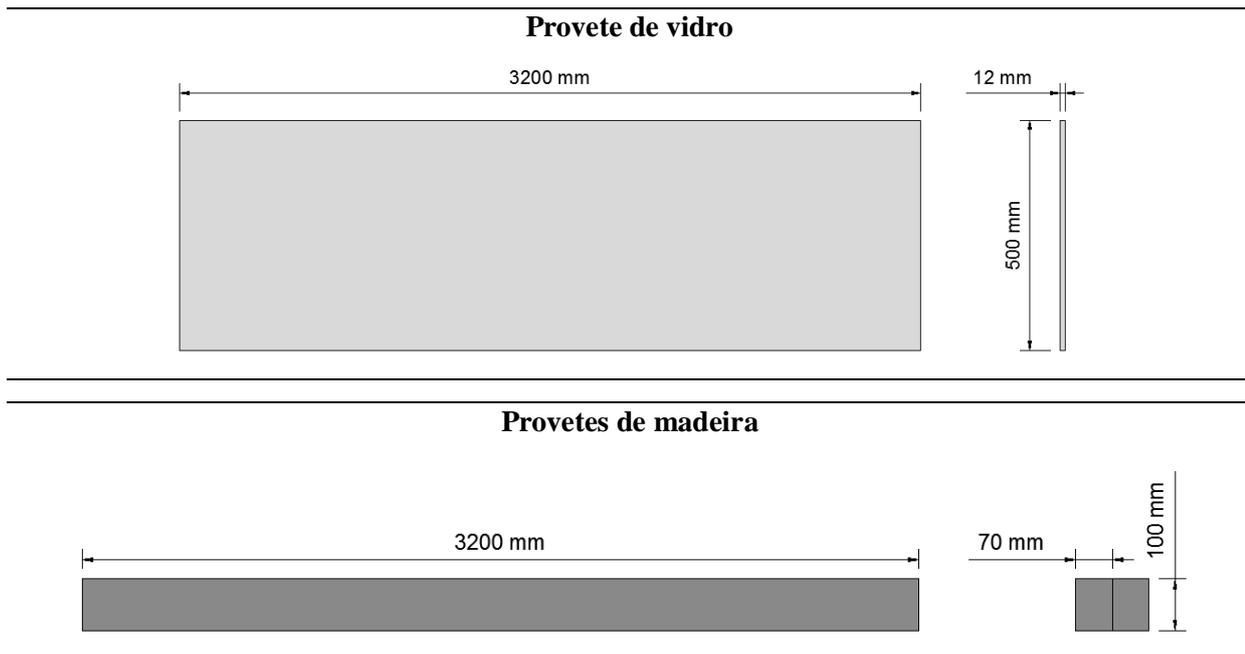
- Madeira

A madeira usada foi a *Pseudotsuga Menziessii* ou Coast Douglas Fir, devidamente seca, serrada e polida. As características e propriedades deste material estão presentes em Anexo I (Sánchez et al, 2004).

3.5.2 Geometria dos provetes

A Fase 1 do programa experimental tem como finalidade de ensaiar os materiais – vidro e madeira – separadamente. As geometrias adoptadas para este procedimento estão apresentadas no Quadro 11.

Quadro 11 – Geometria dos provetes da Fase 1.



As vigas da Fase 2 apresentam duas geometrias diferentes, que dizem respeito à Figura 28 e Figura 29, onde “d” representa os diferentes comprimentos a que as vigas foram ensaiadas – 0,65 m, 1,00 m e 1,70 m.



Figura 28 – Geometria das vigas da Fase 2, sem prumos verticais.

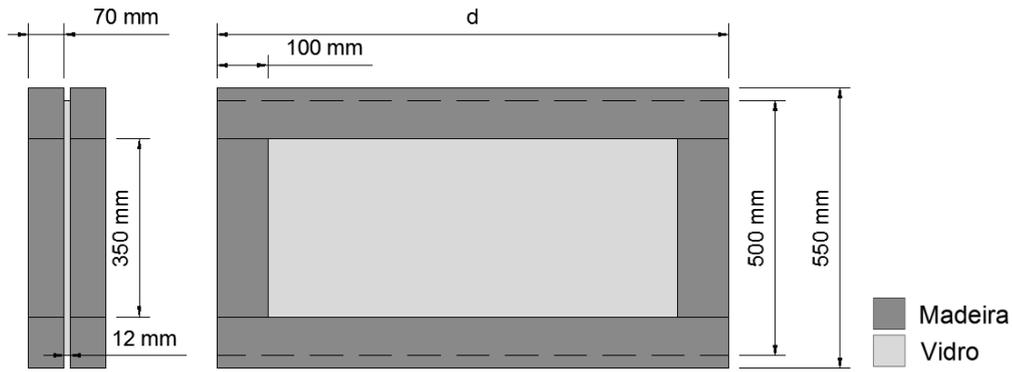


Figura 29 – Geometria das vigas da Fase 2, com prumos verticais.

Relativamente à Fase 3 e Fase 4, a geometria dos provetes está ilustrada na Figura 30 e na Figura 31, respetivamente.

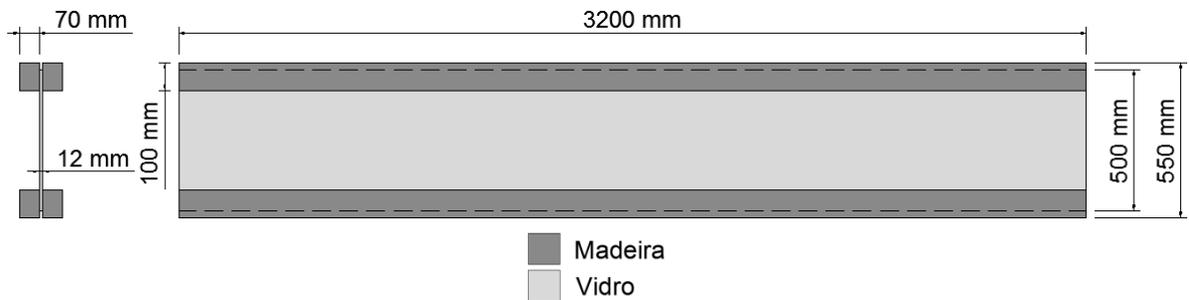


Figura 30 – Geometria das vigas DC 895 e SP 101.

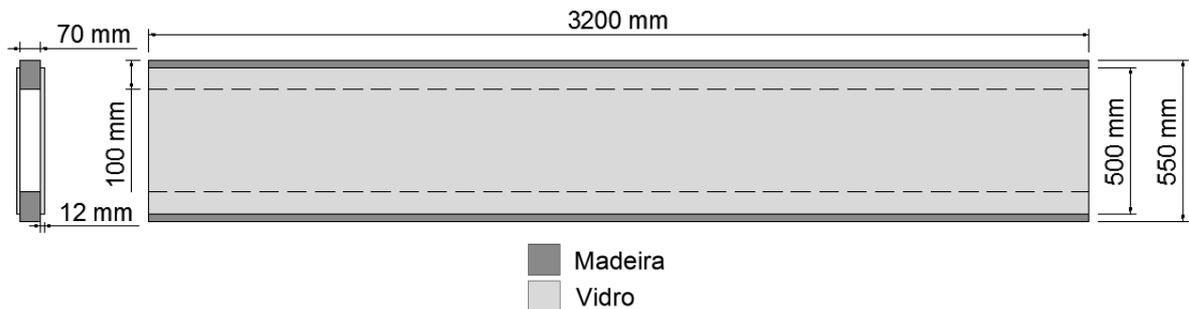


Figura 31 – Geometria da viga “caixão”.

Como se pode verificar nas figuras anteriores, existe um distanciamento de 25 mm entre o topo dos banzos e o topo da alma de vidro. Este pormenor foi idealizado de forma a explorar a capacidade de resistência à tracção da madeira e à compressão do vidro, permitindo que a madeira se deforme sem esmagar localmente o vidro.

3.5.3 Esquemas de ensaio

O esquema de ensaio usado para os ensaios da Fase 1, passou pela aplicação de duas cargas pontuais, como está ilustrado na Figura 32 e na Figura 33. De forma a garantir a estabilidade lateral do provete foram adicionados elementos metálicos de forma a restringir o deslocamento para fora do plano.

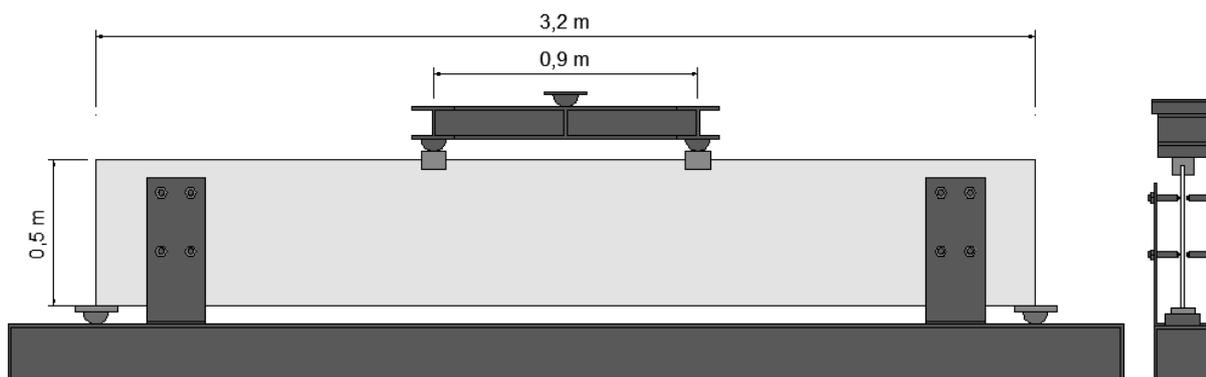


Figura 32 – Esquema, longitudinal e transversal, de ensaio com duas cargas pontuais, para o provete de vidro.

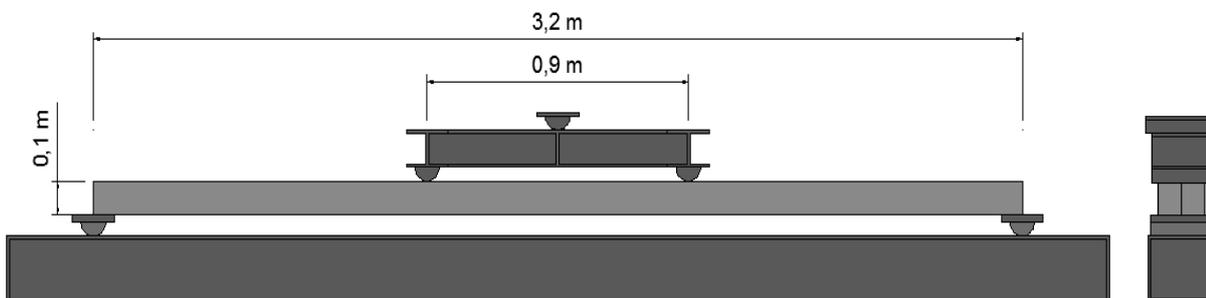


Figura 33 – Esquema, longitudinal e transversal, de ensaio com duas cargas pontuais, para os provetes de madeira.

Para a realização dos ensaios da Fase 2, recorreu-se a um esquema de ensaio diferente do que nas outras fase. A justificação desta decisão recai sob o facto de na Fase 2 ser utilizados comprimentos de vão relativamente pequenos, e de maneira a obter a situação mais gravosa, obtendo o momento flector máximo, optou-se pela aplicação de uma carga pontual a meio vão. O esquema de ensaio referido está ilustrado na Figura 34.

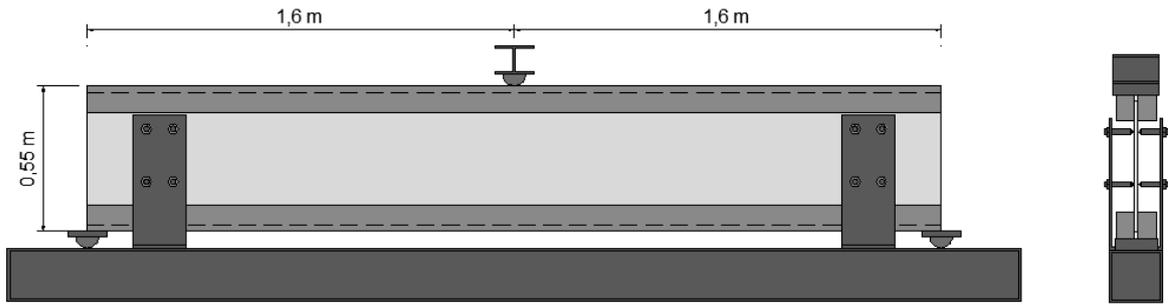


Figura 34 – Esquema, longitudinal e transversal, de ensaio com uma carga pontual

Nas três últimas fases, optou-se pela solicitação de duas cargas pontuais para evitar um exagerado esforço de corte nas secções sob o ponto de aplicação das cargas.

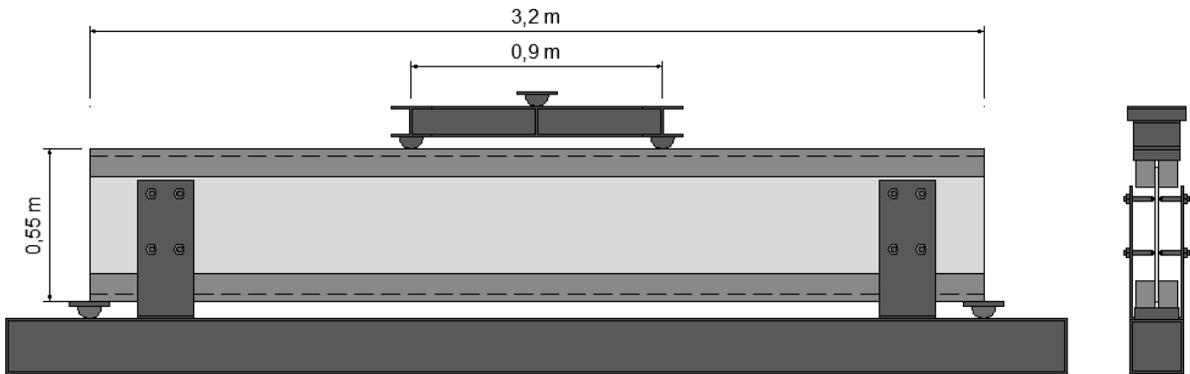


Figura 35 – Esquema, longitudinal e transversal, de ensaio com duas cargas pontuais.

3.5.4 Execução das Vigas

De forma a obter o máximo rigor nos resultados experimentais, a madeira foi toda polida e posteriormente limpa com ar comprimido com o objectivo eliminar qualquer factor que colocasse em causa a adesão da cola à madeira. Para melhorar o processo de colagem foi aplicada acetona na madeira e no vidro. O tempo esperado para a secagem da cola flexível foi de 24 horas, enquanto a cola rígida, para além de demorar uma hora a aquecer a cola para a sua aplicação, apresenta um tempo de secagem muito curto (cerca de 5 minutos), o que dificulta o procedimento de execução do provete.

Depois de concluída a fase de montagem dos provetes e consequente secagem da cola, estes foram novamente polidos e limpos. O processo de preparação pode ser visualizado na Figura 36.

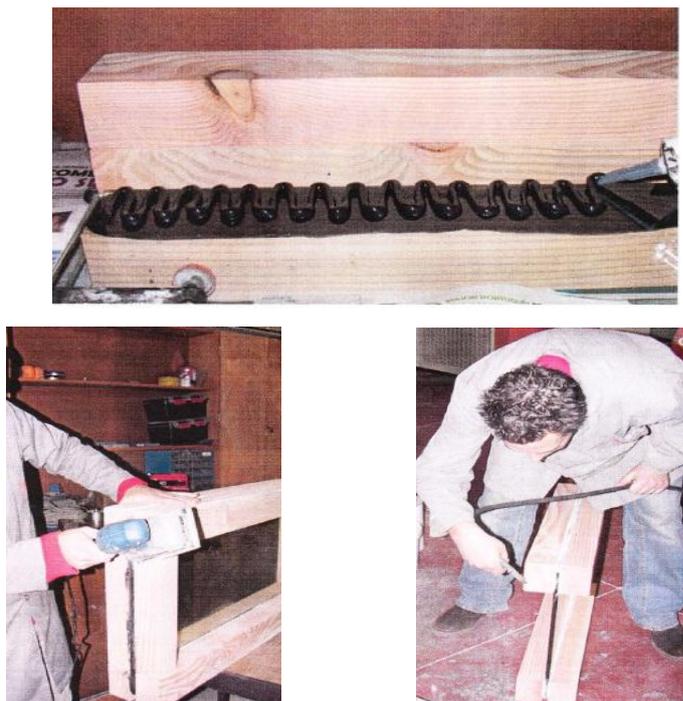


Figura 36 – Processo de preparação dos provetes.

3.6 Realização dos ensaios

3.6.1 Equipamento

Todos os ensaios foram controlados em deslocamento externo, a uma velocidade de 5 microm/s, com registo de leitura e aquisição de dados por computador de meio em meio segundo. O actuador adquirido para esta campanha foi um atuador de 500 kN com 500 mm de curso.

Antes da colocação da viga é importante posicionar, alinhar e fixar correctamente os apoios, de forma a evitar problemas de instabilidade do provete, garantindo a segurança do ensaio.



Figura 37 - Localização e alinhamento dos apoios

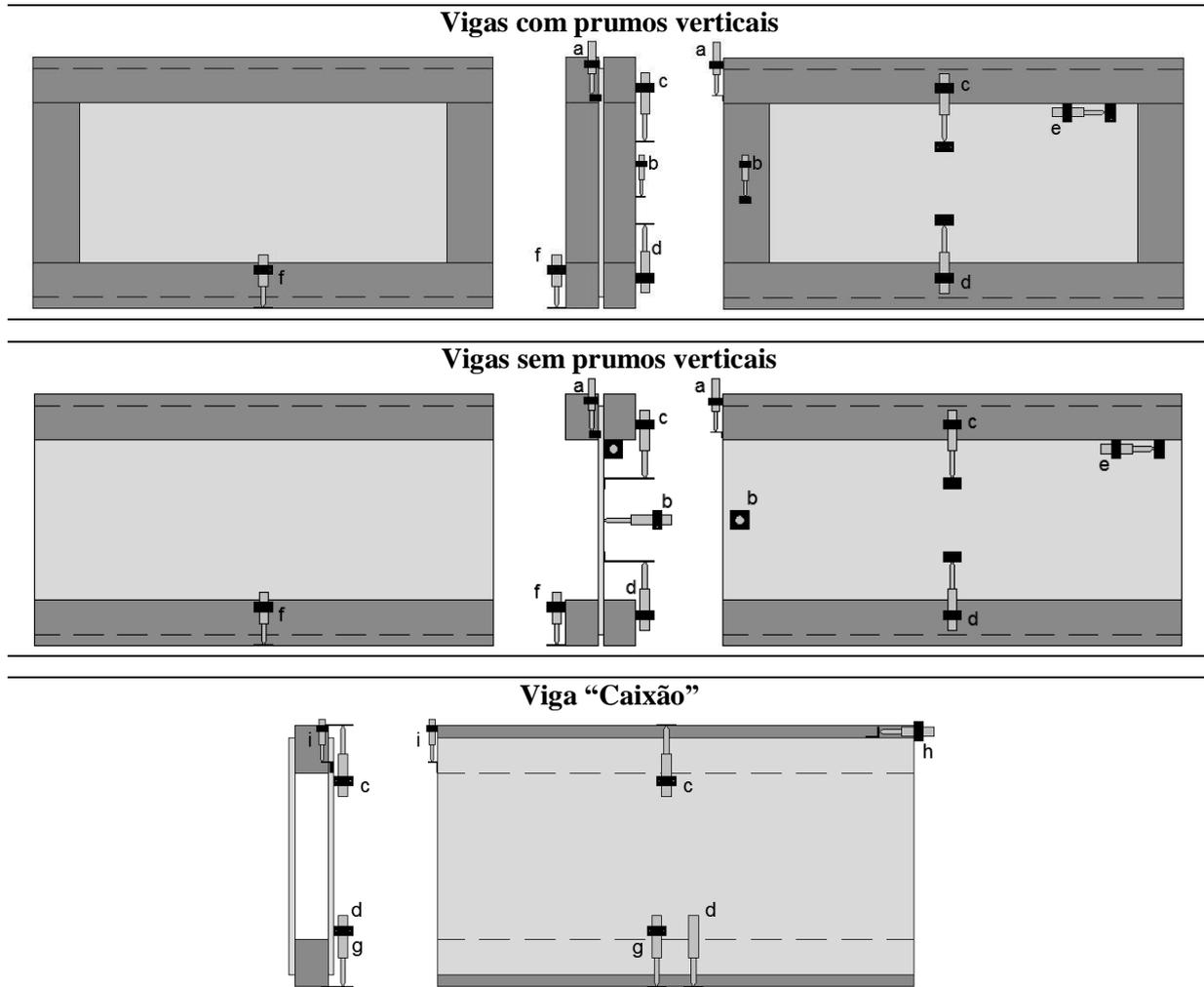
Foram ainda colocados elementos verticais para evitar o deslocamento das vigas para fora do plano, como indica na Figura 38.



Figura 38 – Posicionamento dos elementos verticais de segurança.

Relativamente à aquisição de deslocamentos, recorreu-se a três transdutores de +/- 10 mm e +/- 5 mm, dois de +/- 2,5 mm e um de +/- 12,5. No Quadro 12 estão representados o posicionamento dos transdutores para os diferentes provetes do programa experimental.

Quadro 12 – Posicionamento e identificação dos transdutores.



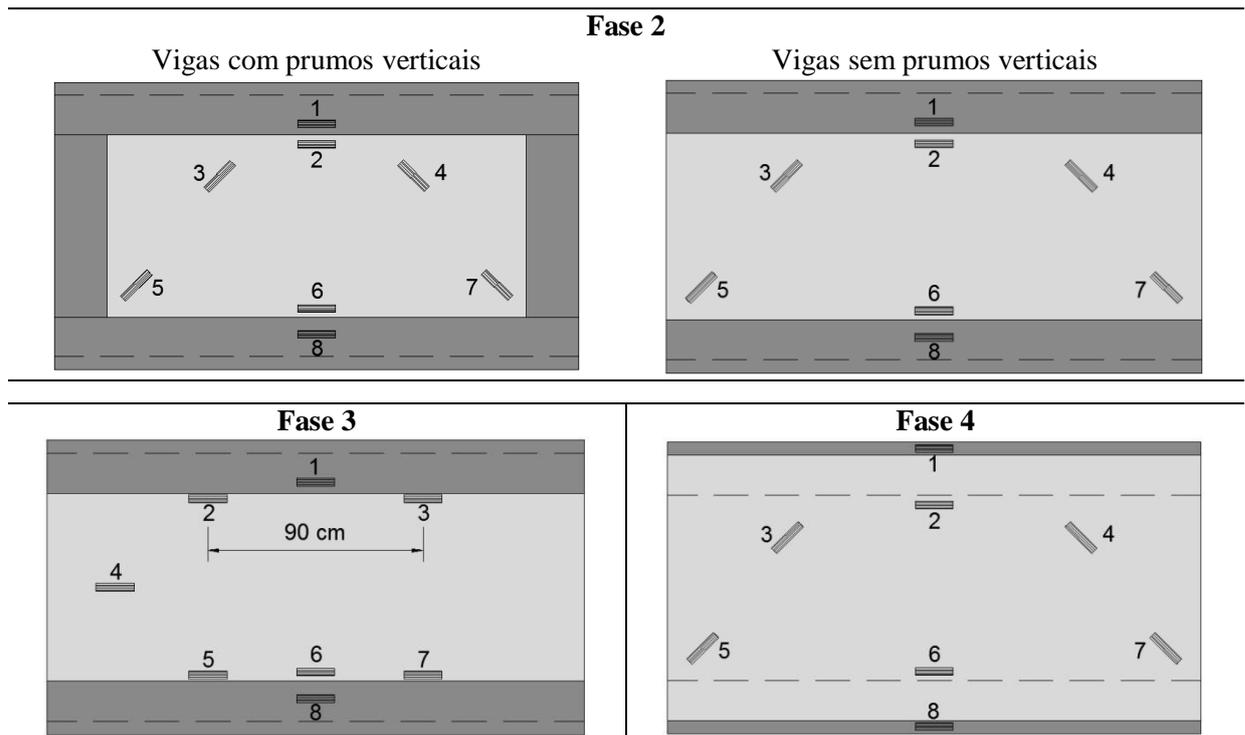
LVDT	Curso	LVDT	Curso	LVDT	Curso
a (40352)	+/- 5 mm	d (83073)	+/- 10 mm	g (83072)	+/- 10 mm
b (71944)	+/- 2,5 mm	e (31923)	+/- 2,5 mm	h (19948)	+/- 5 mm
c (64389)	+/- 10 mm	f (61472)	+/- 12,5 mm	i (83043)	+/- 5 mm

Os LVDT's responsáveis pelo deslocamento relativo entre a madeira e o vidro na extremidade superior são os “a” e “i”. O deslocamento para fora do plano da viga foi medido pelo transdutor “b”. O transdutor “c” tem a função de registar o deslocamento entre a madeira, banzo superior, e o vidro a meio vão. Assim como o transdutor “d”, com a diferença de registar o deslocamento do banzo inferior em relação ao vidro. Este LVDT no provete “caixão” tem uma finalidade diferente, registando apenas a flecha da viga, e o LVDT “g” memoriza o deslocamento entre o banzo inferior e a viga. Finalmente os transdutores “e” e

“h” desempenham o papel de registar os deslocamentos longitudinais relativos entre o vidro e a madeira.

De forma a obter uma informação mais precisa do desempenho da viga mista foram ainda posicionados 8 extensómetros em cada provete antes de serem colocados na estrutura de ensaio. A distribuição destes está referida no Quadro 13.

Quadro 13 – Distribuição dos extensómetros.



O programa informático responsável pela aquisição de dados provenientes dos transdutores e extensómetros denomina-se Dyna Tester.

3.7 Procedimento de ensaio

Todos os ensaios efectuados na campanha experimental foram controlados em deslocamento externo, a uma velocidade de 5 mícron/s. O registo de leitura e aquisição de dados foram executados a uma frequência de 2 Hz, ou seja, de meio em meio segundo. O dispositivo responsável pela aplicação do deslocamento era um atuador de 500 kN com um curso total de 500 mm.

4 RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos na campanha experimental. São apresentadas as curvas força-deslocamento e imagens dos modos de rotura obtidos em cada ensaio. Para uma melhor compreensão do comportamento das vigas são exibidas as forças de fendilhação e rotura com os respectivos deslocamentos.

4.1 Fase 1 (caracterização dos materiais)

A Figura 39 ilustra as curvas força – deslocamento obtidas nos ensaios da Fase 1 correspondentes à caracterização dos materiais, ou seja, a curva da viga de vidro (a) e as curvas das quatro vigas de madeira. Na Figura 40 estão ilustrados os modos de rotura do provete de vidro e, de forma exemplificativa, o modo de rotura do provete de madeira M04.

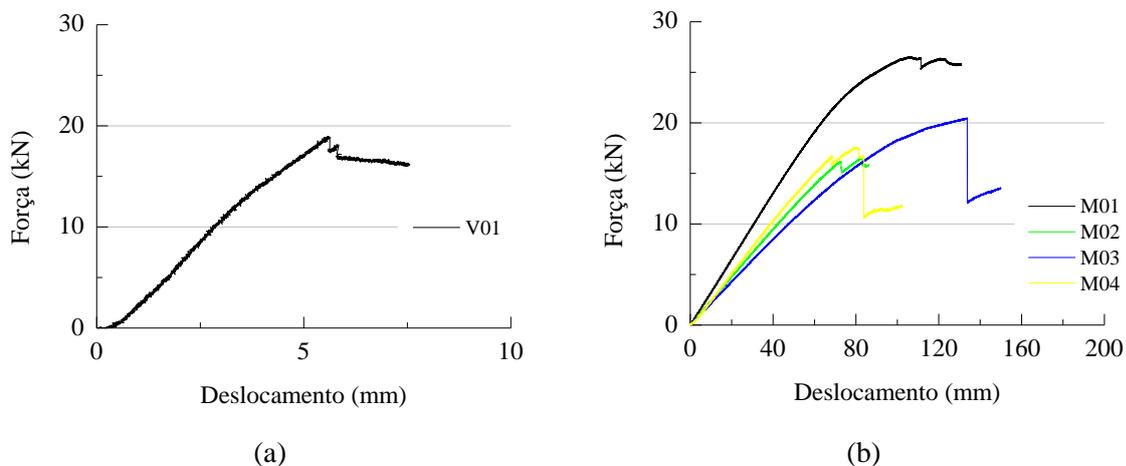


Figura 39 – Curvas força – deslocamento obtidos nos ensaios da Fase 1: (a) Viga de vidro; (b) Vigas de madeira.



Figura 40 – Modos de rotura obtidos na Fase 1: (a) Viga de vidro; (b) Viga M04.

O Quadro 14 apresenta os resultados da força e deslocamento correspondente ao aparecimento da primeira fissura (F_f , força de fendilhação e d_f deslocamento de fendilhação), e a força e deslocamento de rotura (F_u , força última e d_u deslocamento de rotura) e o momento flector máximo ($M_{m\acute{a}x}$) obtidos nos ensaios da Fase 1.

Quadro 14 – Resultados obtidos nos ensaios realizados na Fase 1.

Provete	F_f (kN)	F_u (kN)	$M_{m\acute{a}x}$ (kN/m)	d_f (mm)	d_u (mm)
V01	18,96	18,96	10,90	5,00	5,57
M01	-	26,54	15,26	-	106,42
M02	-	16,63	9,56	-	82,95
M03	-	20,50	11,79	-	133,69
M04	-	17,62	10,13	-	79,56
Média	-	20,32	11,68	-	85,00

A média apresentada no Quadro 14 diz respeito aos provetes de madeira (M01, M02, M03 e M04). É de notar que quando ocorre a primeira fenda no vidro, aos 18,96 kN, o provete colapsa com um deslocamento final de 5,57 mm. Relativamente aos provetes de madeira apresentam força ultima média de 20,32 kN e um deslocamento último médio de 85,00 mm.

4.2 Fase 2 (flexão a 3 pontos de vigas “I” com e sem prumos)

As figuras seguintes ilustram as curvas força – deslocamento a meio-vão registadas nos ensaios de flexão a 3 pontos de vigas “I” com e sem prumos (Fase 2) e os modos de rotura observados.

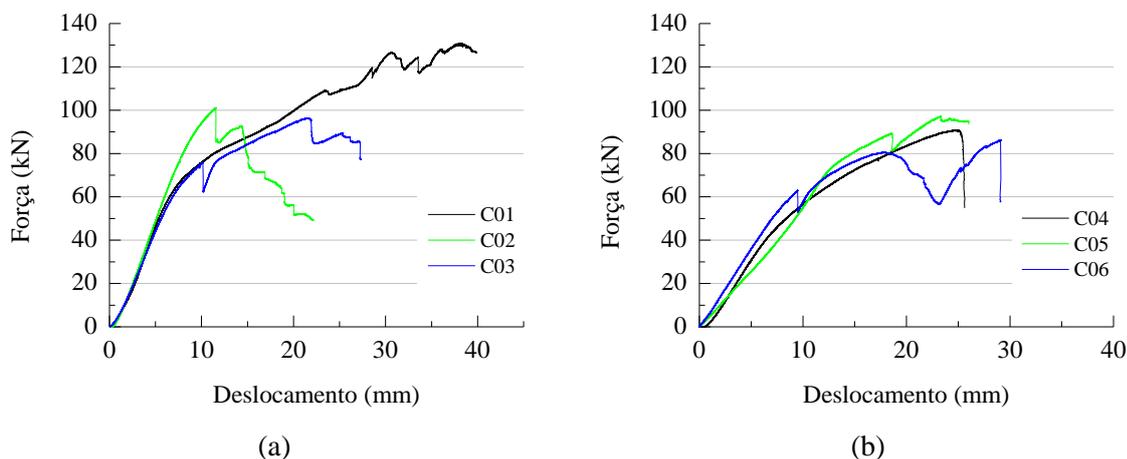


Figura 41 – Curvas experimentais força – deslocamento - adesivo C (polímero): (a) com prumos; (b) sem prumos.

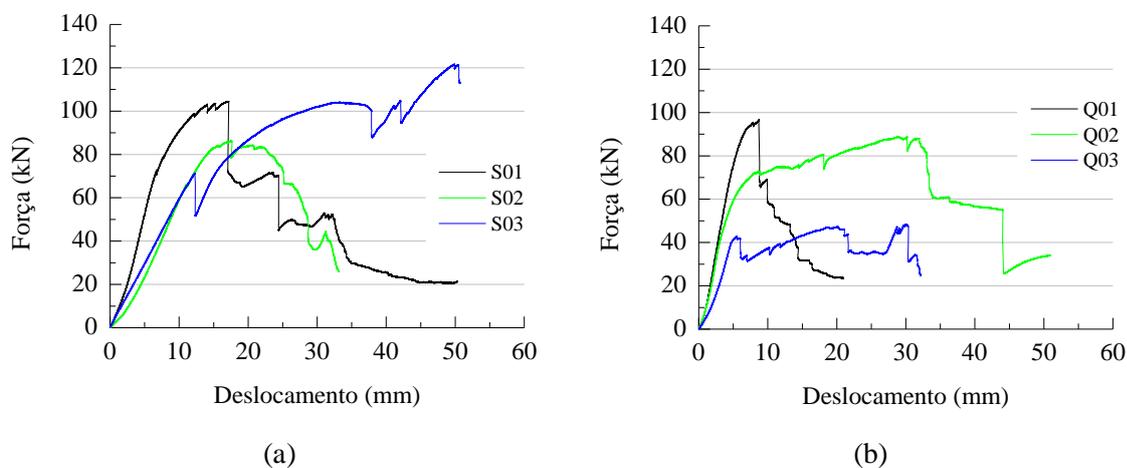
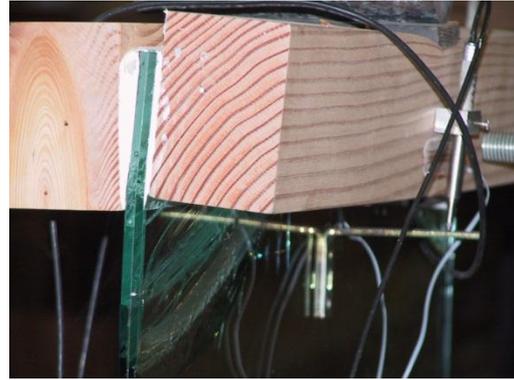


Figura 42 – Curvas experimentais força – deslocamento: (a) adesivo S (Silicone); (b) adesivo Q (poliuretano).

Numa primeira análise às figuras anteriores é de notar que a utilização de prumos ofereceu mais capacidade resistente às vigas C01, C02 e C03. O adesivo Q foi o que apresentou menos eficácia relativamente aos outros adesivos. A diferença entre vãos influencia a capacidade resistente da viga, apresentando maior rigidez as vigas de 0,65 m (01).



C01



C04



S03



Q02

Figura 43 – Modos de rotura obtidos na Fase 2.

A figura anterior ilustra os modos de rotura ocorridos nos ensaios da Fase 2. Os provetes de menor vão (0,65 m) como o C01 apresentam roturas na madeira enquanto os de maior vão (S03) colapsaram pelo vidro. Na viga C04, é possível visualizar que esforço de torção esteve presente no modo de rotura da viga.

O Quadro 15 apresenta os resultados da carga da primeira fissura (F_f), da força de rotura (F_u) e os deslocamentos a meio vão correspondentes (d_f , deslocamento de fendilhação e d_u deslocamento de último), obtidos nos ensaios da Fase 2.

Quadro 15 – Resultados obtidos das primeiras fendas nos ensaios realizados na Fase 2.

Viga		01	02	03	04	05	06
Vão (m)		0,65	1,00	1,70	0,65	1,00	1,70
Adesivo		Com prumos			Sem prumos		
C	F_f (kN)	107 / M	101 / M	75 / V	88 / V	88 / M	59 / V
S		99 / M	22 / V	71 / V	-	-	-
Q		72 / V	69 / V	40 / V	-	-	-
C	F_u (kN)	130,9 / M	101,2 / M	96,5 / V	90,9 / V	97,3 / V	86,3 / A
S		104,6 / M	86,5 / M	121,9 / V	-	-	-
Q		96,7 / M	89,0 / V	48,6 / M	-	-	-
C	d_f (mm)	24	12	10	23	18	9
S		13	5	12	-	-	-
Q		5	7	5	-	-	-
C	d_u (mm)	38	12	21	25	23	18
S		17	18	50	-	-	-
Q		9	30	30	-	-	-

Legenda: / M – rotura registada na madeira; / V – rotura registada no vidro; / A – rotura registada no adesivo

Nas vigas de 0,65 e 1,00 m de vão (01 e 02, respetivamente) o registo de F_f máximo e de F_u máximo foram obtidos pelo adesivo C (vigas C01 e C02), enquanto a viga S03 obteve o valor superior de F_u .

Os modos de rotura nas vigas 01 (0,65 m) desenvolveram-se pela madeira, à excepção da viga Q01 que obteve a primeira fenda no vidro. Nas vigas de 1,00 m só a viga C02 é que obteve a primeira fenda na madeira. Por último, as vigas de 1,70 m fendilharam todas pelo vidro, levando estas a colapsar pelo vidro à excepção da viga Q03.

4.3 Fase 3 (flexão a 4 pontos de vigas I) e Fase 4 (flexão a 4 pontos de vigas caixão)

A Figura 44 exhibe as curvas experimentais força – deslocamento a meio-vão registadas nos ensaios da Fase 3 e Fase 4, seguindo-se a Figura 45 que ilustra as vigas no início dos ensaios e os modos de rotura atingidos.

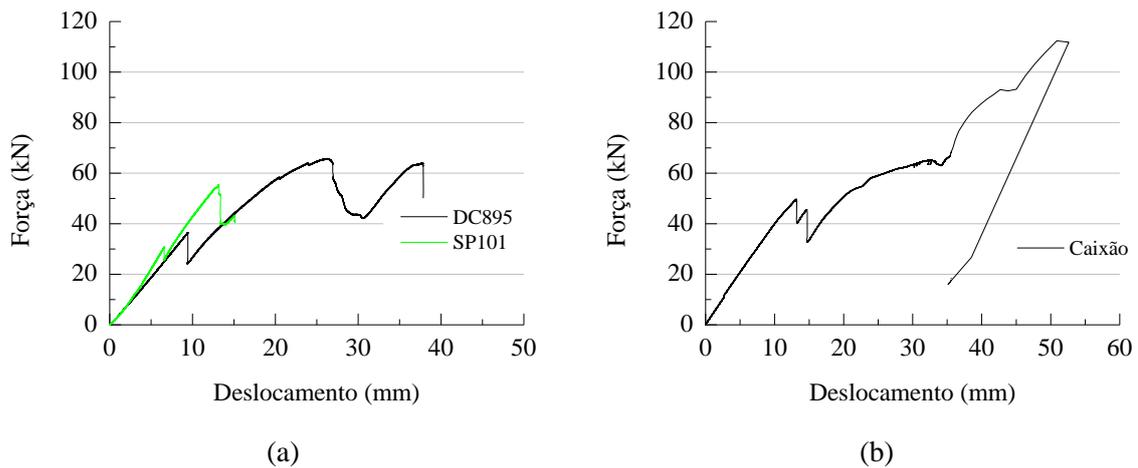


Figura 44 – Curvas força – deslocamento: (a) Fase 3 - DC895 (silicone) e SP101 (polímero); (b) Fase 4 – Caixão (silicone).

Ao visualizar as curvas força-deslocamento da viga DC895 e SP101 verifica-se que a viga DC895 apresenta um desempenho melhor do que a SP101, tanto na aparição da primeira fenda como na força última. Em relação à viga caixão é de facto a viga que apresenta um comportamento à flexão mais satisfatório.



Viga DC895 (Silicone – Fase 3)



Viga SP101 (Polímero – Fase 3)



Viga Caixão (Silicone – Fase 4)

Figura 45 – Vigas no início do ensaio e modos de rotura obtidos na Fase 3 e Fase 4. Nos ensaios à flexão da fase 3 e 4 todas as vigas tiveram a primeira fenda no vidro, demonstrando que os adesivos conseguem uma transmissão de esforços adequada.

O quadro seguinte apresenta as forças de fendilhação F_f e forças últimas F_u e respetivos deslocamentos (d_f e d_u), correspondentes às vigas DC895, SP101 e Caixão.

Quadro 16 – Resultados obtidos nos ensaios realizados na Fase 3 e 4.

Provede	F_f (kN)	F_u (kN)	d_f (mm)	d_u (mm)
DC895	31 / V	65,9 / V	7	13
SP101	30 / V	55,5 / A	8	27
Caixão	49 / V	66 / A	13	35

Legenda: / V – rotura registada no vidro; / A – rotura registada no adesivo

Apesar da F_f da viga DC895 ser muito próxima da F_f da viga SP101, apresenta uma F_u de 65,9 kN enquanto a viga SP101 só resistiu a uma F_u de 55,5 kN.

Como visualizado anteriormente a viga Caixão apresenta um melhor comportamento que a viga DC895, exibindo uma F_f de 49 kN e uma F_u de 66 kN.

5 Análise de resultados

Neste capítulo são analisados todos os resultados apresentados no capítulo anterior. Os resultados são analisados através da observação das curvas força-deslocamento, das relações entre as forças de fendilhação e as forças de rotura, dos coeficientes de ductilidade e ainda da comparação das extensões e tensões distribuídas na secção transversal das vigas.

5.1 Eficácia dos Prumos Verticais

A colocação dos prumos verticais tem como objectivo aumentar a capacidade resistente da viga mista vidro-madeira. Para avaliar a influência dos prumos, na Fase 2 do programa experimental foram considerados 3 vigas sem prumos (C04, C05 e C06) para comparação directa com as vigas da série C (adesivo de polímero) designados por C01, C02 e C03. No Quadro 17 apresentam-se a comparação directa entre estas vigas em termos de força de fendilhação (F_f), deslocamento de fendilhação (d_f), força última (F_u), deslocamento último (d_u),

Quadro 17 – Relação dos resultados obtidos nos ensaios dos provetes com adesivo C.

Viga	01 / 04	02 / 05	03 / 06	01 / 04	02 / 05	03 / 06
Vão (m)	0,65	1,00	1,70	0,65	1,00	1,70
Adesivo						
C	F_f (kN)			d_f (mm)		
	1,22	1,15	1,27	2,00	0,43	2,00
C	F_u (kN)			d_u (mm)		
	1,44	1,04	1,12	3,17	0,84	1,28

O quadro anterior demonstra que a utilização de prumos resulta numa maior capacidade resistente das vigas vidro-madeira mas, por outro lado, os deslocamentos a meio vão nas vigas sem prumos foram significativamente menores. A razão disto acontecer deve-se ao facto de as vigas de menor vão estão sujeitas a momentos flectores pequenos e o esforço predominante é o esforço transversal. Assim conclui-se que os prumos verticais desempenham melhor as suas funções em situações onde o esforço mais influente é o esforço transversal, e como

consequência a opção da não utilização de prumos nas vigas de 3,20 m de vão livre é justificado pelo facto dos esforços relevantes nestas vigas serem os momentos flectores.

Uma solução que poderá melhorar a eficácia dos prumos em vigas com vão livres maiores será a fixação dos prumos por colagem, não só à alma de vidro, mas também aos banzos de madeira. Assim evita-se o levantamento dos banzos nas extremidades e diminui-se os esforços de torção nos banzos de madeira, Figura 46.

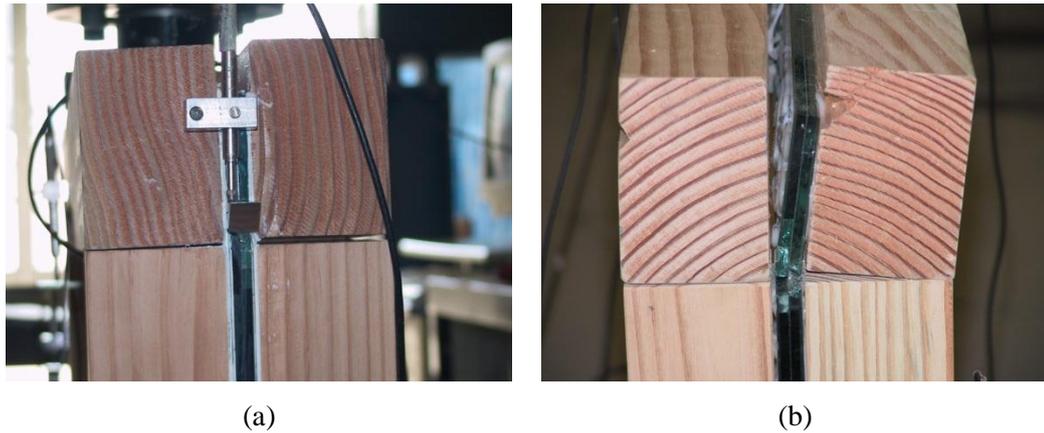


Figura 46 – Afastamento das extremidades dos banzos dos prumos: (a) Viga C02; (b) Viga Q03.

Com base nos resultados dos ensaios, foi ainda calculado o coeficiente de ductilidade em força (ΔF) e em deslocamento (D), que consiste na razão entre a força última (F_u) / deslocamento último (d_u) e a força de fendilhação (F_f) / deslocamento de fendilhação (d_f).

$$\Delta F = \frac{F_u}{F_f} \tag{14}$$

$$D = \frac{d_u}{d_f} \tag{15}$$

Quadro 18 – Coeficientes de ductilidade em força (ΔF) e em deslocamento (D).

Viga	01	02	03	04	05	06
Vão (m)	0,65	1,00	1,70	0,65	1,00	1,70
Adesivo	Com prumos			Sem prumos		
	ΔF					
C	1,22	1,00	1,29	1,03	1,11	1,46
S	1,06	3,93	1,72			
Q	1,34	1,29	1,22			
	D					
C	1,58	2,10	1,28	1,00	1,09	2,00
S	1,31	3,60	4,17			
Q	1,80	4,29	6,00			

Tendo em conta que o ΔF pode ser considerado uma medida do coeficiente de segurança, quanto maior for maior é a margem de segurança associado à viga. Analisando o quadro anterior, observa-se que a maior margem de segurança é conseguida pelo provete S02. No que diz respeito à utilização de prumos é visível que os provetes de maior vão (C06 e C03 – 1.70 m) desempenharam as suas funções com a margem de segurança maior.

5.2 Relação entre Adesivos

Dos três adesivos ensaiados na Fase 2, o adesivo de poliuretano – Q – foi o que respondeu com menos sucesso, apresentando valores de carga de fendilhação e carga de rotura inferiores aos valores atingidos pelos restantes adesivos. Assumindo como referência as prestações das vigas com adesivo Q, na força última (F_u), deslocamento último (d_u), força de fendilhação (F_f) e deslocamento de fendilhação (d_f).

Quadro 19 apresenta-se os benefícios do uso dos adesivos C e S em termos de força última (F_u), deslocamento último (d_u), força de fendilhação (F_f) e deslocamento de fendilhação (d_f).

Quadro 19 – Relação da prestação das vigas utilizando os diferentes adesivos no caso com prumos verticais.

Viga	01	02	03		01	02	03
Vão (m)	0,65	1,00	1,70		0,65	1,00	1,70
Adesivo		F_f				F_f	
C / Q	1,49	1,46	1,88	S/Q	1,38	0,32	1,78
		d_f				d_f	
C / Q	4,80	1,43	3,60	S/Q	3,40	2,57	10,00
		F_u				F_u	
C / Q	1,35	1,14	1,98	S/Q	1,08	0,97	2,51
		d_u				d_u	
C / Q	4,22	0,70	0,77	S/Q	1,44	0,17	0,40

Em análise ao quadro anterior observa-se que o adesivo Q apresenta valores inferiores aos restantes adesivos (adesivos C e S), à excepção da viga Q02. Isto significa que o adesivo Q (poliuretano) é o adesivo menos próprio para fazer a ligação entre o vidro e a madeira.

5.3 Eficácia dos Adesivos em Vigas de 3,2 m

Analisando as curvas experimentais força – deslocamento obtidas nos ensaios da Fase 3, é perceptível que a viga DC895 teve um desempenho melhor que a viga SP101. Nos quadros seguintes apresentam-se a relação entre as cargas de fendilhação, cargas últimas, os respectivos deslocamentos e ainda os coeficientes de ductilidade registados nos ensaios destas duas vigas.

Quadro 20 – Relação dos resultados obtidos nos ensaios realizados na Fase 3.

Viga	F_f	F_u
DC895 / SP101	1,03	1,19

	D_f	D_u
DC895 / SP101	0,88	0,48

Quadro 21 – Coeficientes de ductilidade em força (ΔF) e em deslocamento (D).

Viga	ΔF	D
DC895	2,13	1,86
SP101	1,85	3,86

Analisando os quadros anteriores, apesar da força de fendilhação da viga DC895 ser muito similar ao da viga SP101, apresenta um ΔF 15% superior e um D duas vezes menor, o que significa que a viga DC895 apresenta uma margem de segurança superior à viga SP101. Outro aspecto a solicitar, no que se refere ao modo de rotura, à viga SP101 obteve uma rotura por descolagem do adesivo, o que indica que o adesivo não foi capaz de suportar a transição de tensões entre os dois materiais (vidro e madeira).

5.4 Eficácia da Secção Transversal

Comparando as curvas experimentais força – deslocamento obtidos na Fase 4, do provete que apresentou melhor desempenho nos ensaios anteriores – DC895 – com a viga com uma secção transversal distinta – Caixão – é de notar que a viga caixão obteve melhores resultados, Quadro 22.

Quadro 22 – Relação dos resultados obtidos nos ensaios realizados na Fase 4.

Viga	F_f	F_u	d_f	d_u
Caixão / DC895	1,00	1,18	1,86	2,69

Quadro 23 – Coeficientes de ductilidade estática.

Viga	ΔF	D
DC895	2,13	1,86
Caixão	1,35	2,69

A secção em caixão respondeu positivamente ao teste ao qual foi submetida, provando ser mais resistente e mais segura, como revela os coeficientes de ductilidade. Em termos de força a viga Caixão obteve uma força última cerca de 70% superior. Relativamente aos coeficientes de ductilidade, a viga Caixão apresenta uma margem de segurança maior que a viga DC895, pois apresenta um D 44% superior, apesar do ΔF ser inferior (uma diferença de 58%).

5.5 Distribuição de Tensões e Extensões na Secção Transversal

Um dos objectivos deste capítulo passa por compreender o comportamento das vigas mistas vidro-madeira em termos da distribuição das extensões e tensões na secção transversal durante o ensaio de flexão. Como valores de referências foi ainda calculada a distribuição de tensões na secção transversal mista vidro-madeira de acordo com o Eurocódigo 5 (EN-1995-1-1, 2004), subcapítulo “2.3.2.- ligações rígidas”.

O procedimento de cálculo passou pela determinação do momento flector de fendilhação (M_d) instalado na viga tendo sido necessário homogeneizar a secção transversal, de maneira a determinar o momento de inercia efetivo ($I_{ef,f}$), como indica as expressões seguintes.

$$M_d = \frac{F_f \cdot b}{2} \quad (16)$$

Sendo b a distância do apoio ao ponto de aplicação da força ($b = 1,15$ m).

$$b_f = \left(b_w \cdot \frac{E_{p.c.90.mean}}{E_{0.mean}} \right) \quad (17)$$

$$I_{ef,f} = \frac{2 \cdot b_f \cdot H^3}{12} - \frac{2 \cdot b_f \cdot (H - 2 \cdot h_f)^3}{12} \quad (18)$$

Onde b_w é a largura da madeira, $E_{p,c90,mean}$ é o módulo de elasticidade transversal e $E_{0,mean}$ é o módulo de elasticidade axial.

Com a informação adquirida pelos extensómetros (extensão, ε) instalados nas vigas ensaiadas é possível determinar a tensão (σ) instalada em determinado ponto da secção transversal da viga através da Lei de Hooke simplificada.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (19)$$

Onde E representa o valor do módulo de elasticidade do material em estudo.

5.5.1 Viga SP 101

A Figura 47 apresenta a distribuição das tensões na secção transversal da viga mista vidro-madeira SP101, a meio vão, de acordo com as expressões preconizadas pelo Eurocódigo 5 (EN-1995-1-1, 2004).

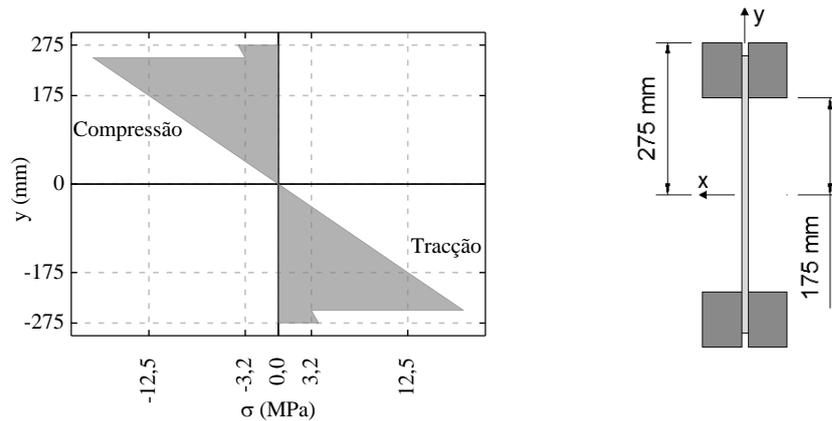
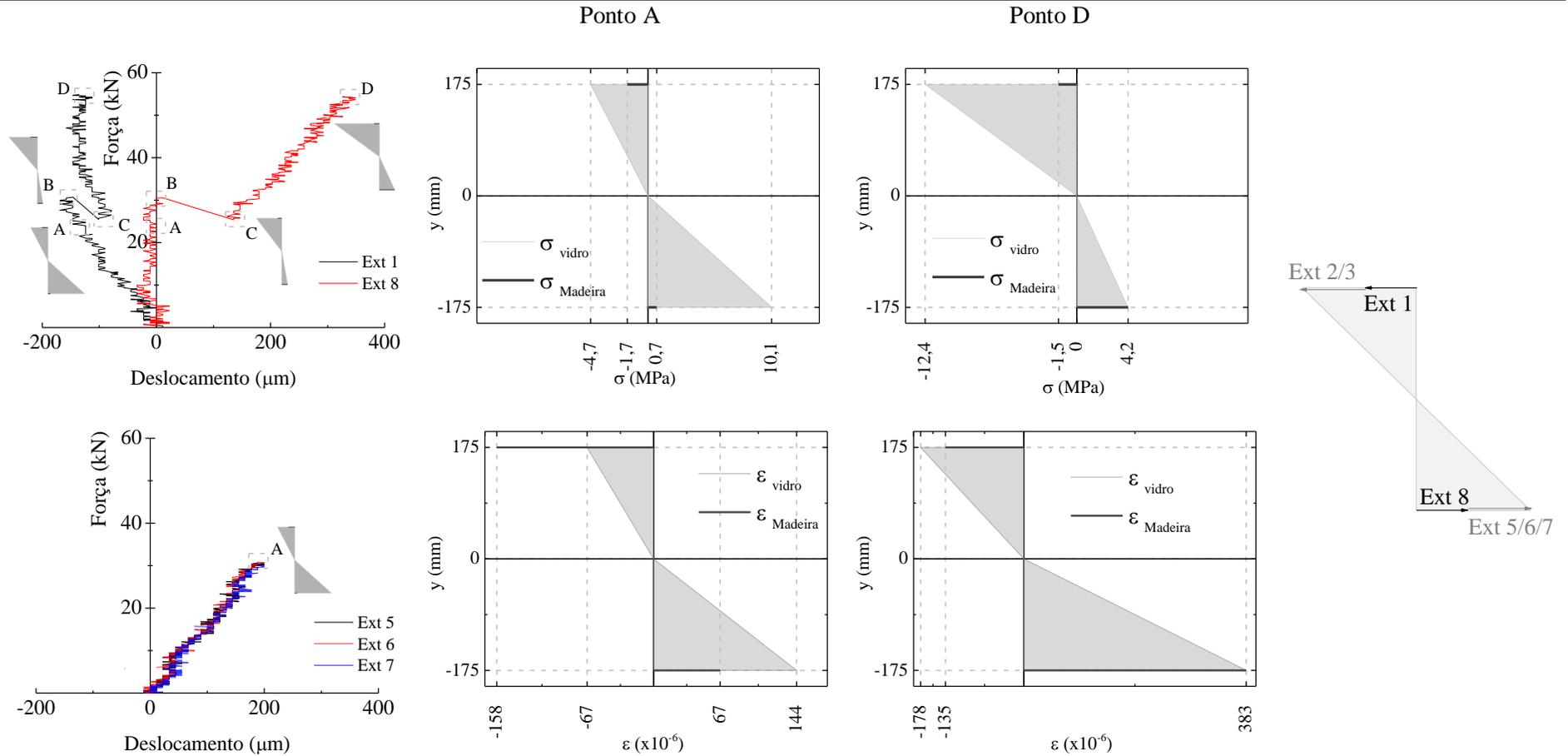


Figura 47 – Distribuição das tensões segundo o EC5 da viga SP101 a meio vão.

A distribuição de tensões segundo o EC5 revelam uma tensão para o vidro de 12,5 MPa a 175 mm do centro da secção transversal, altura onde estão colocados os extensómetros, deixando a madeira com uma tensão de 3,2 MPa.

Os dados registados pelos extensómetros da viga SP101 estão apresentados no Quadro 24. As curvas força-deslocamento já apresentadas no capítulo 4, são agora complementados com a representação das tensões instaladas na secção transversal da viga em quatro momentos diferentes. Destacando-se os pontos A e D que representam o ponto de fendilhação e o ponto de rotura, respectivamente.

Quadro 24 – Distribuição das extensões e tensões na secção transversal da viga SP101 ao longo do ensaio de flexão (Fase 3).



Ao analisar o quadro anterior é de notar que, até à formação da primeira fissura (ponto A) as tensões nos banzos de madeira são muito inferiores comparando com as tensões na alma de vidro. Depois da fendilhação, a viga ainda tem capacidade de suportar mais carga, cerca de 5 kN, até que os esforços sejam encaminhados para os banzos (pontos B e C). A partir do momento do ponto C o vidro deixa de funcionar à tracção apesar de ainda transmitir as tensões para o banzo inferior, alcançando uma tensão de 4,2 MPa (na madeira).

Em relação aos diagramas das extensões no ponto de fendilhação (ponto A) é visível que o banzo superior obteve uma extensão cerca de 2,36 vezes superior à extensão instalada no vidro, concluindo que o adesivo apresenta deformações elevadas na transição de esforços do banzo para a alma. O mesmo sucede com o banzo inferior, pois a extensão no vidro é 2,15 vezes superior à da madeira, ou seja, não à uma transição de esforços “perfeita” por parte do adesivo. O ponto D representa o momento imediatamente antes da rotura, e como era de esperar o banzo inferior é o único elemento a oferecer resistência à tracção, apresentando uma extensão última de 383×10^{-6} .

Relativamente ao método simplificado sugeridos pelo EC5, o valor indicado para a tensão de fendilhação é superior (12,5MPa - tracção) ao valor registado nos ensaios (10,1MPa - tracção).

5.5.2 Viga DC 895

A Figura 48 apresenta a distribuição das tensões na secção transversal da viga mista vidro-madeira DC895, a meio vão, de acordo com as expressões preconizadas pelo Eurocódigo 5 (EN-1995-1-1, 2004).

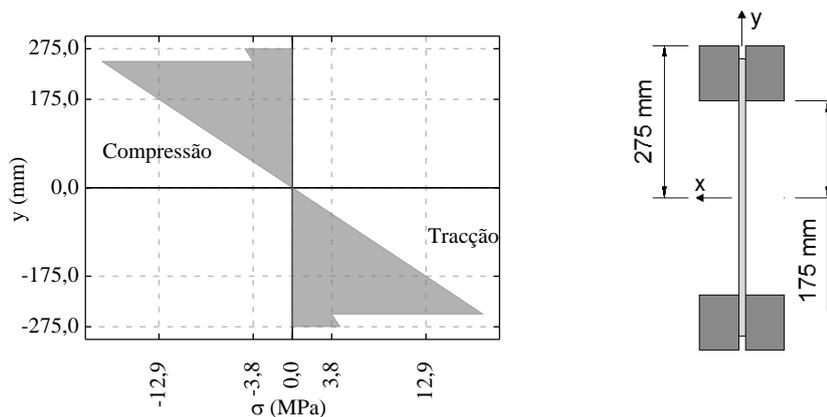
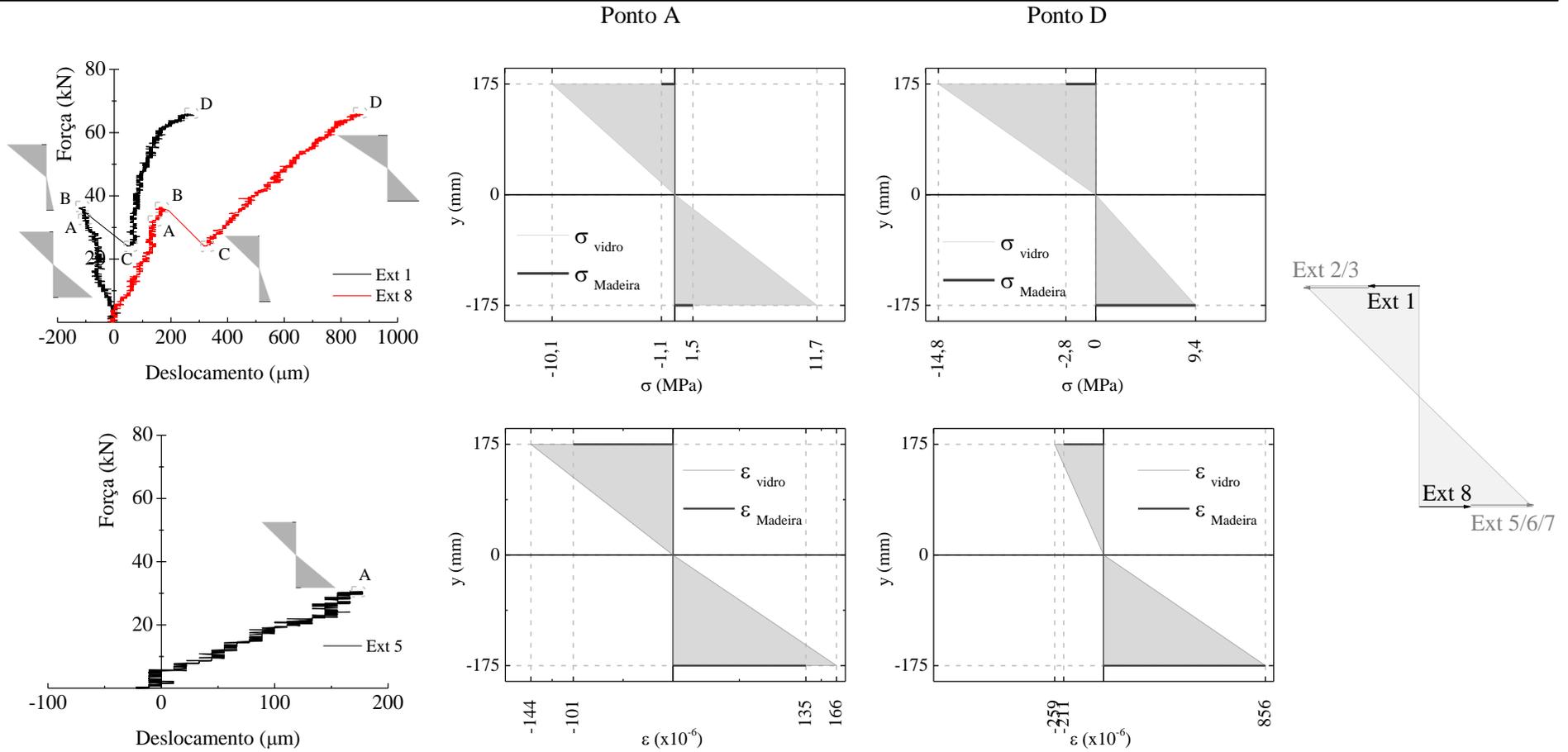


Figura 48 – Distribuição das tensões segundo o EC5 da viga DC895 a meio vão.

A distribuição de tensões segundo o EC5 revelam uma tensão para o vidro de 12,9 MPa a 175 mm do centro da secção transversal, altura onde estão colocados os extensómetros, deixando a madeira com uma tensão de 3,8 MPa.

O processo de cálculo e análise de resultados foram alcançados do mesmo modo que os da viga SP101. Os resultados estão apresentados no Quadro 25.

Quadro 25 - – Distribuição das extensões e tensões na secção transversal da viga DC895 ao longo do ensaio de flexão (Fase 3).



Devido à danificação ou ao não registo dos extensómetros 6 e 7 não foi possível adquirir os dados destes.

Analisando os resultados obtidos, observa-se que a viga DC895 obteve um comportamento semelhante ao da viga anterior (SP101), apesar de esta apresentar valores de tensões superiores no vidro e conseqüentemente as tensões na madeira são inferiores. Mas mesmo depois da fendilhação a viga ainda suporta mais 1kN de carga até os banzos adquirirem os esforços provenientes do vidro. Em relação à última “etapa” da viga, do ponto C ao ponto de rotura D, a viga conseguiu suportar uma tensão máxima de compressão de 14,8 MPa, enquanto o banzo inferior registou uma tensão de tração de 9,4 MPa.

Os resultados das extensões instaladas na viga DC895 anterior revelam um comportamento diferente da viga SP101. As extensões obtidas no momento de fendilhação (ponto A) nos banzos são inferiores às extensões apresentadas pelo vidro. Nesta viga a transição de esforços é adequada do banzo superior para a alma, pois o adesivo limita a deformação da madeira fazendo a transição de esforços para o vidro. Mas o mesmo não acontece no banzo inferior, porque a extensão do vidro deveria ser menor do que a extensão da madeira (banzo inferior), de forma a conseguir mais resistência à tracção por parte do vidro. No momento imediatamente antes da rotura (ponto D), o vidro já não resiste á tracção, levando o banzo inferior de madeira a resistir até a uma extensão de 856×10^{-6} .

A tensão de fendilhação calculada pelo EC5 (12,9 MPa) é superior à tensão alcançada no ensaio (11,7 MPa), o que revela que o cálculo preconizado pelo EC5 não é seguro.

5.5.3 Viga Caixão

A Figura 49 apresenta a distribuição das tensões na secção transversal da viga mista vidro-madeira Caixão, a meio vão, de acordo com as expressões preconizadas pelo Eurocódigo 5 (EN-1995-1-1, 2004).

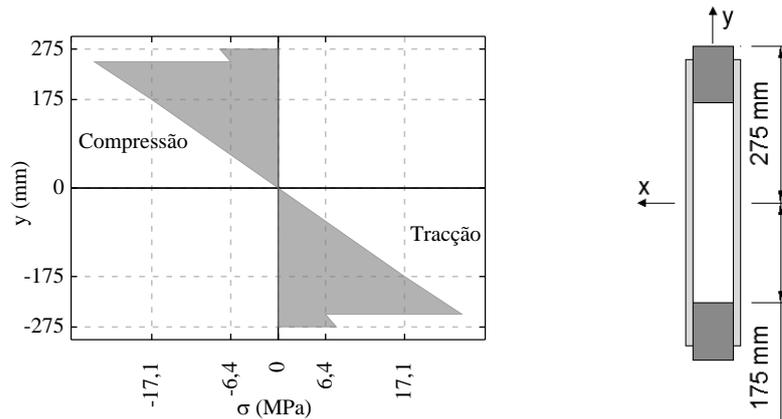
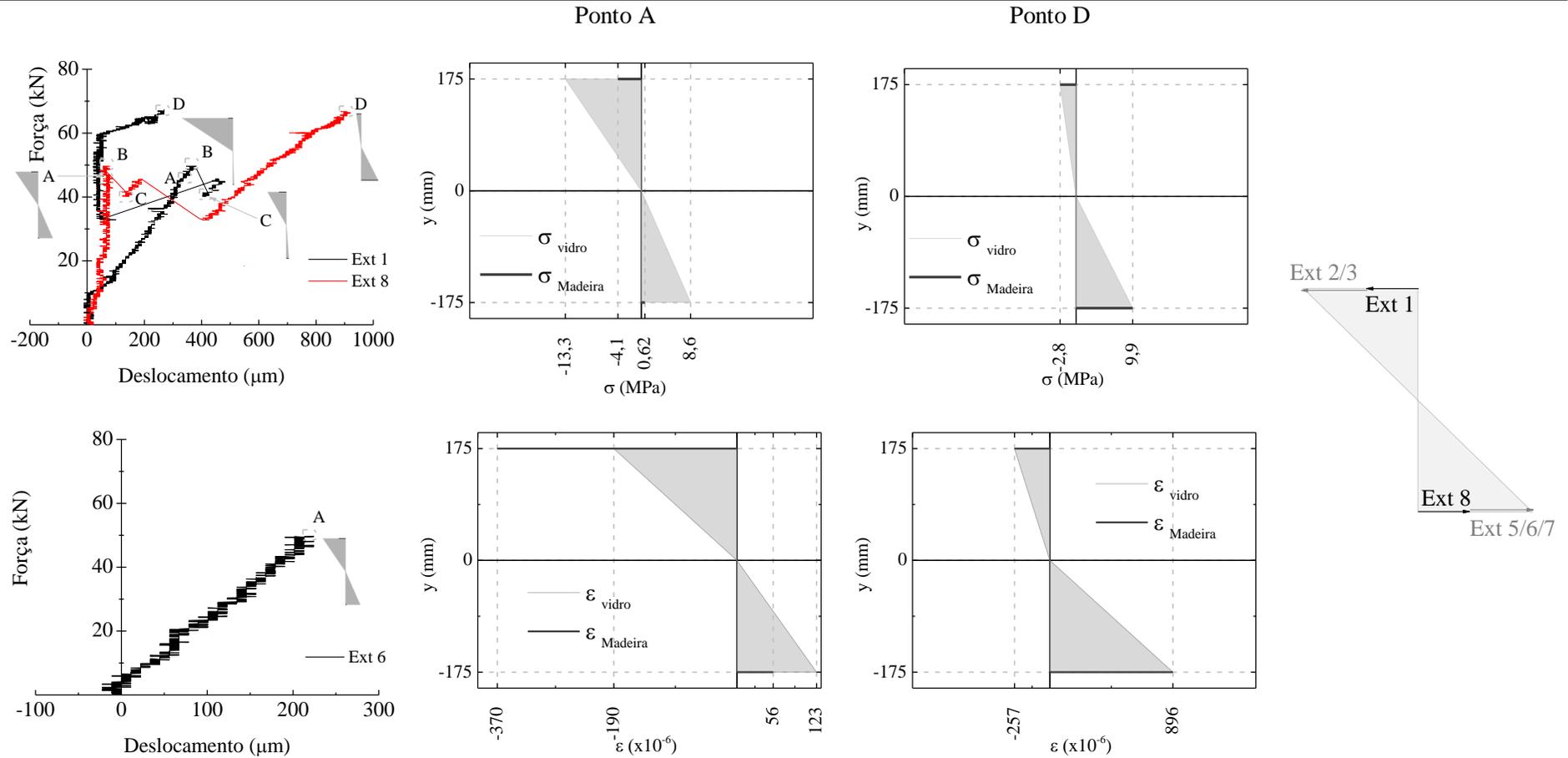


Figura 49 – Distribuição das tensões segundo o EC5 da viga Caixão a meio vão.

A distribuição de tensões segundo o EC5 revelam uma tensão para o vidro de 17,1 MPa a 175 mm do centro da secção transversal, altura onde estão colocados os extensómetros, deixando a madeira com uma tensão de 6,4 MPa.

Quadro 26 - Distribuição das extensões e tensões na secção transversal da viga Caixão ao longo do ensaio de flexão (Fase 4).



Devido à danificação ou ao não registo de dados dos extensómetros 5 e 7 não foi possível adquirir os dados destes.

Observando os resultados da viga Caixão é de destacar que foi a viga que obteve a maior diferença entre a tensão de fendilhação do EC5 (17,1 MPa) e a do ensaio (8,6 MPa). Isto deve-se ao facto da viga caixão possuir maior área de vidro e menor área de madeira do que as restantes vigas, isto diminui a capacidade de resistência à tracção da viga. Mas quando ocorre a passagem do ponto A para o ponto B as tensões são caminhadas imediatamente para os banzos, obtendo uma tensão no banzo superior anormal (44 MPa), reduzindo de seguida para 11 MPa devido à aparição de outras fendas no vidro que condicionaram a transição de esforços.

Em relação aos diagramas das extensões no ponto de fendilhação (ponto A) é visível que o obteve um comportamento idêntico à viga SP101 apesar da diferença de adesivos. O banzo superior obteve uma extensão cerca de 1,95 vezes superior à extensão instalada no vidro, concluindo mais uma vez que o adesivo apresenta deformações elevadas na transição de esforços do banzo para a alma, ocorrendo o mesmo com o banzo inferior.

Esta viga, no ponto D, teve a particularidade de conseguir resistir aos esforços a que estava sujeita só com o funcionamento dos banzos, justificando assim que as tensões e extensões últimas pertencem aos banzos de madeira.

6 CONCLUSÕES

Os objectivos traçados no início deste trabalho podem considerar-se cumpridos, nomeadamente quanto à compreensão do comportamento à flexão das vigas vidro-madeira.

A concluir em primeiro lugar temos a eficácia dos prumos nas extremidades das vigas:

- Apesar dos prumos oferecerem mais resistência à viga assim como garantirem a estabilidade da mesma, apresentam deformações a meio vão significativamente superiores às vigas sem prumos;
- A utilização de prumos apresentaram um melhor desempenho quando o esforço predominante é o esforço transversal;
- De forma a aumentar a eficácia dos prumos, seria a união, por colagem ou por parafusos, dos prumos aos banzos, evitando o levantamento da extremidade dos banzos e aumentando a estabilidade do elemento estrutural.

Em relação aos três adesivos usados para a conexão entre o vidro e a madeira conclui-se que:

- Os adesivos que garantiram melhor desempenho entre o vidro e a madeira foram o adesivo derivado do silicone (S) e do polímero (C), destacando-se o adesivo C em vãos de 3,20 m de comprimento;
- Para uma análise mais precisa devem ser executados mais ensaios de forma a obter uma base de dados maior de forma a garantir a compreensão total deste tipo de vigas.

Em conclusão da eficácia da secção oca:

- A secção caixão foi sem dúvida a que demonstrou ser mais eficaz, relativamente à capacidade de carga, à margem de segurança e estabilidade da viga;
- Para uma comparação mais adequada entre as secções transversais, os elementos vidro e madeira devem ter as mesmas dimensões, com o objectivo de obter o mesmo momento de inércia em ambas as vigas, Figura 50.

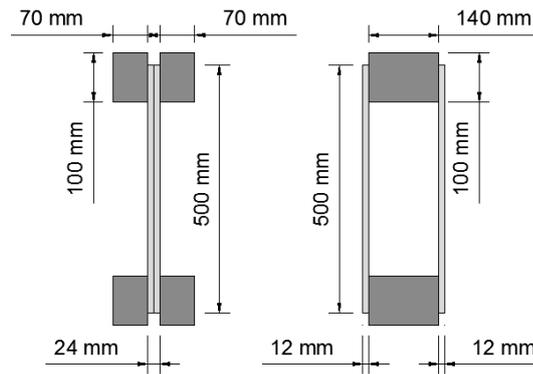


Figura 50 – Geometria das secções transversais.

Por último, a distribuição das extensões e tensões:

- As vigas SP101 e Caixão tiveram um comportamento semelhante, apesar da diferença entre adesivos, destacando-se as extensões elevadas no banzo superior no momento da fendilhação;
- Apesar da viga Caixão se exibir com um comportamento exemplar em termos capacidade de carga, mostra que quanto mais vidro for utilizado, menores são as tensões de fendilhação, o que provoca uma dependência inevitável dos banzos de madeira;
- O adesivo provou ser um adesivo flexível, não permitindo alcançar extensões e tensões idênticas nos diferentes materiais (vidro e madeira) por obter deformações excessivas na transição de esforços entre os dois materiais;
- As tensões adquiridas através do cálculo preconizado pelo EC5 não coincidem com as tensões obtidas nos ensaios, revelando-se inseguras.

7 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente capítulo diz respeito a futuros estudos que poderão desenvolver no âmbito deste tema.

Com a experiência adquirida ao longo do desenvolvimento deste trabalho são sugeridos diferentes estudos experimentais para aumentar o conhecimento relativo a este tema. Poderia estudar-se a influência na alteração da geometria dos banzos de madeira, como é exemplificado na figura seguinte.

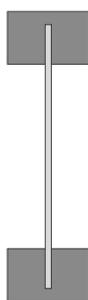


Figura 51 – Geometria da secção transversal.

Como a influência dos prumos verticais foi estudada, poderia ser estudado a influência na utilização de vários prumos ao longo da secção longitudinal, como indica a figura abaixo.

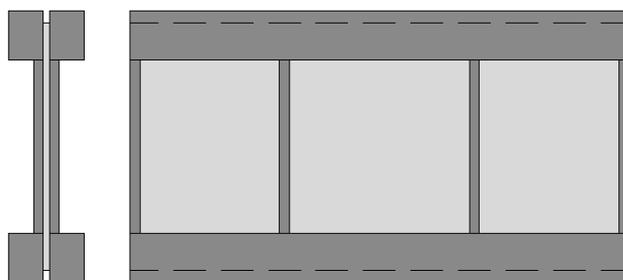


Figura 52 – Geometria da secção transversal.

Estudo da distribuição de tensões e extensões ao longo da secção transversal poderia ser analisada em vigas com as mesmas características geométricas mas com a alteração para adesivos rígidos ou semi-rígidos, de maneira a obter uma relação entre flexíveis e rijos em vigas de 3,20 m.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Piazza, M.; Baldessari, C.; Tomasi, R.; Acler, E. (2008). Behaviour of refurbished timber floors characterized by different in-plane stiffness.
- Appleton, J. (2003). *Reabilitação de edifícios antigos patologias e tecnologias de intervenção*. Orion.
- Baldessari, C. (2005). *Ruolo di solai coperture e cordoli nel comportamento sismico di edifici esistenti in muratura*. Italia.
- Blaauwendraad, J. (2008). *Buckling of Laminated Glass Columns*. Delft , Netherlands.
- Blyberg, L.; Serrano, E. (2010). *Timber/Glass Adhesively Bonded I-beams*. Suécia.
- Branco, J. M.; Cruz, P. J. (2002). *Lajes Mistas de Madeira-Betão*.
- Junior, C. (2003). *Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira*. Brasil: Manole.
- Louter, C.; Schetters, L.; Veer, F., Herwijnen, F.; Romein, T. (2005). Experimental Research on Scale 1:8 Models of an 18 m Reinforced Glass Beam. Delft, Holanda.
- Claude, L. G. (1995). *Les assemblages dans la construction en bois*. Paris: CTBA.
- Coías, V. (2009). *Inspecções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios 2ª Edição*. Lisboa: IST PRESS.
- Costa, B. (2007). *Análise e Dimensionamento de Vigas Mistas Madeira-Vidro*. Guimarães.
- Costa, J. (2011). *Influencia da água no comportamento de madeiras resinosas*. Guimarães.
- Costa, L. (Janeiro de 2009). *Tipificação de soluções de reabilitação de pavimentos estruturais em madeira em edifícios antigos*. Porto.
- Crompton, P. (1999). *Assesment of design procedures for structural glass beams*. Trinity.
- Dias, T. (2008). *Pavimentos de madeira em edifícios antigos. Diagnóstico e intervenção*. Porto.
- EN-1288-1. (2000). *Glass in building - Determination of the bending strength of glass - part 1: Fundamentals of testing glass*.
- EN-1288-3. (2000). *Glass in building - Determination of the bending strength of glass - Part 3: Test with specimen supported at two points (four point bending)*.
- EN-1990. (2009). *Bases para o projecto de estruturas*.
- EN-1990. (2009). *Bases para o projectos de estruturas*.
- EN-1991. (2009). *Eurocódigo 1 - Acções em estruturas*.

- EN-1995-1-1. (2004). *Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules for buildings*.
- EN-1998. (2010). *Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos*.
- Englhardt, O. (2007). *Hybrid structural elements an innovative high fi ligree glass-steel-system*. Tampere, Finland.
- Veer, F.; Rijgersberg, H.; Ruytenbeek, D.; Louter, P.; Zuidema, J. (2003). *Composite Glass Beams, the Third Chapter*.
- Peraza, F. (2004). *Tableros de Madera de Uso Estructural*. Madrid: Aitim.
- Freitas, E. (2011). *Análise, Intervenção e Monitorização de Estruturas Antigas de Madeira do CampUrbis*.
- Gattesco, N.; Macorini, L. (2006). *Strengthening and Stiffening Ancient Wooden Floors with Flat Steel Profiles*.
- Huveners, E. (2007). *In-plane loaded glass pane (shear wall)*. Tampere, Finland.
- Jorge, L. (2005). *Estruturas mistas madeira-betão com a utilização de betões de agregados leves*.
- Kreher, K. (2005). *Load Introduction with Timber Timber as Reinforcement for Glued Composites (Shear-Walls, I-Beams) Structural Safety an Calculation-Model*. Vienna (Austria) / Luzern (Switzerland).
- Lopes, M. (2007). *Tipificação de soluções de reabilitação de estruturas de madeira em coberturas de edificios antigos*. Porto, Portugal.
- Blyberg, L. (2012). *Adhesive joints for structural timber/glass applications: Experimental testing and evaluation methods*. Suécia.
- Louter, C. (2007). *Adhesively bonded reinforced glass beams*. Delft.
- Lubile, A.; Crisinel, M. (2005). *Buckling of glass elements under compression*. Obtido em 12 de Dezembro de 2009, de Using the World-Wide Web to Deliver Complex Electronic Documents: www.glassfiles.com
- Valarinho, L. (2010). *Construção em vidro: comportamento estrutural de vigas mistas vidro-GFRP. Encontro Nacional Conservação e Reabilitação de Estruturas*.
- Valluzzi, M. (2010). *In plane strenghtening of timber floors for the sismic improvement of masonry buildings*.
- Martins, V.; Guerra, J. (2005). *Reabilitação materiais e técnicas tradicionais de construção*.
- Mendes, N.; Lourenço, P. (2004). *Redução da vulnerabilidade sísmica de edifícios antigos de alvenaria*.

- Pequeno, J.; Cruz, P. (2006). *Structural Timber-Glass Adhesive Bonding*. Guimarães, Portugal.
- Pequeno, J.; Cruz, P. (2006). *Timber-Glass Composite Beams: Mechanical Behaviour & Architectural Solutions*. Guimarães, Portugal.
- Pequeno, J.; Cruz, P. (2009). *Structural Timber-Glass Linear System: Characterization & Architectural Potentialities*. Guimarães, Portugal: Architectural Challenges & Solutions: Glass Performance Days.
- Pequeno, J.; Cruz, P. (2009). *Timber-Glass Composite Structural Panels: Tectonics, Sustainability & Integrated Energetic*. Guimarães, Portugal: Energy Performance in Buildings; Glass Performance Days.
- Porteous, J.; Kermani, A. (2007). *Structural Timber Design to Eurocode 5*.
- Zarnic, R. (2007). *Purpose and justification for new design standards regarding the use of glass products in civil engineering works*. European Commission.
- Rothoblaas. (2010). *Connettore a doppio filetto WT della SFS intec*.
- Rothoblaas. (2011). *rothofixing - Timber Carpentry*.
- Sánchez (2004). *Especies de maderas*. Aitim.
- Serrano, E.; Blyberg, L. (2010). *Timber/Glass Adhesively Bonded I-beams*. Suécia.
- Slivanský, M. (2012). *Experimental Verification of the Resistance of Glass Beams*.
- Thelandersson, S. (2003). *Timber Engineering*. Inglaterra: Wiley.
- Teixidor, C. (2010). *Glass-honeycomb composite panels*. Dusseldorf, Germany.
- Ilharco, T. (2010). *Reabilitação de Estruturas Antigas de Madeira com Materiais Tradicionais*. Porto.
- Serafinavicius, T. (2010). *Challenges to Structural Glass: What have been already done?* Vilnius, Lithuania.
- Veer, F.; Pastunink, J. (1999). *Developing a Transparent Tubular Laminated Column*. Tampere, Finland.
- White, R. (2007). *Glass as a Structural Material*. Kansas.

9 ANEXOS

9.1 Anexo I

- Proveniência

A *Pseudotsuga Menziesii* ou Douglas fir, existe na América do Norte, tendo sido cultivada mais recentemente no Reino Unido, Nova Zelândia, França e Austrália.

- Descrição da madeira

Borne	Branco amarelado ou amarelo palha e relativamente espesso (4 cm).
Cerne	Distinto de cor vermelho tijolo ou vermelho salmão, definido e abundante (40-50% em árvores com mais de trinta anos).
Medula	De tamanho médio circular.
Camadas de crescimento	Muito distintas, pela espessa zona de Outono, intensamente corada de contorno e desenvolvimento regulares. Anéis de crescimento largos a muito largos [4.0 (3.5-5.0) mm].
Fio	Em geral direito.
Grão	Médio.
Textura	Desigual ou medianamente desigual; madeira medianamente heterogénea.
Veio	Fornecido pelas camadas de crescimento (veio listado ou riscado).

- Propriedades físicas

Densidade (h=12%) (kg/m ³)	480	Leve
Retracção (%)		
Volumétrica total	12.2	Retráctil
Tangencial total	7.0	Média (-)
Radial total	4.5	Média (-)
Coefficiente de retracção	0.46	Nervosa
Anisotropia	1.6	Média (-)
Teor de saturação das fibras (%)	27	Normal

Dureza 2.0/275 Branda/Média

- Propriedades mecânicas

Compressão axial

Tensão de rotura (kg/cm²) 430 Média

Flexão estática

Tensão de rotura (kg/cm²) 1140 Média

Rigidez (índice) 41 Moderadamente elástica

Fendimento

Tensão de rotura (kg/cm²) 16 Média/Pouco físsil

Tracção transversal

Tensão de rotura (kg/cm²) 20 Fraca/aderente

Flexão dinâmica

Coefficiente de resiliência (kg/cm²) 0.34 Pouco resistente ao choque

- Propriedades tecnológicas

Conversão Serragem fácil originando superfícies ásperas por revesos de nós; Desenrolamento possível: folhas relativamente felpadas; Micro-colapso inviabilizador.

Preparação Secagem rápida; pouca fendilhação e deformação; impregnação do cerne difícil.

Defeitos Nós abundantes e firmes (dificuldade de desramação). Heterogeneidade estrutural. Frequente ocorrência de micro-frissuração anelar.

Durabilidade Cerne resistente aos carunchos. Baixa durabilidade em condições de risco ao ataque de fungos.

Laboração Aplainamento delicado com tendência para fio levantado; Molduragem difícil (fio lascado); perfuração imperfeita; torneamento defeituoso.

Ligações Boa aptidão à colagem. Satisfatória no uso de elementos metálicos, apesar da tendência para o desvio de cravagem.

Acabamento superficial Operações preparatórias delicadas e difíceis. Fácil folheamento.
Boa recepção de velaturas e tintas, vernizes e ceras.

- Aplicações

Alta qualidade para elementos estruturais e maciços interiores e exteriores (cerne).

Mobiliário: interiores e engradados (madeiras de anel estreito). Lamelados e laminados.

Embalagens e palettes. Aglomerados (partículas e fibras).

Carpintaria exterior.

Construção naval