

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Fábio Quintas Cruz

Desenvolvimento e caracterização de
painéis sanduíche híbridos para a
reabilitação de pisos de edifícios

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

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Manuel de Sena Cruz e
Professor Doutor Eduardo Nuno Borges Pereira

AGRADECIMENTOS

Com o finalizar da presente dissertação, etapa importante da minha vida, deixo os meus sinceros agradecimentos a todas as entidades, familiares e amigos que me ajudaram, acompanharam e que de forma direta ou indireta contribuíram para este trabalho.

Ao Professor José Sena Cruz, orientador científico da dissertação, quero expressar o meu profundo agradecimento pela amizade, disponibilidade, dedicação e incentivos demonstrados. Muito obrigado ainda pelos ensinamentos transmitidos, bem como todo o espírito crítico, rigor e profissionalismo que me inculuiu.

Ao Professor Eduardo Pereira, co-orientador da dissertação, agradeço sinceramente o permanente acompanhamento, bem como a sua disponibilidade, espírito crítico e ensinamentos partilhados. Agradeço ainda todo o tempo dispensado na implementação e análise da metodologia DIC nos ensaios de corte do PUR.

Ao Gonçalo Escusa, que me acompanhou durante a realização da dissertação, agradeço com amizade a valiosa colaboração prestada ao longo deste trabalho, assim como toda a disponibilidade e conhecimentos partilhados.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, LEST, em particular ao Engenheiro Marco Peixoto e ao técnico Sr. António Matos agradeço a colaboração e disponibilidade demonstradas durante a realização dos trabalhos experimentais.

À empresa ALTO - PERFIS PULTRUDIDOS LDA., agradeço o material cedido para a realização dos ensaios experimentais. O meu muito obrigado ao Engenheiro Tomé Santos e ao Engenheiro Mário Alvim pelos conhecimentos transmitidos.

O presente trabalho, inserido no Projeto de Investigação (ID&T EasyFloor), foi financiado pela ANI (contracto 2015/03480).

Quero agradecer aos amigos que fiz aos longos destes últimos 5 anos na UMinho, em especial, ao Sérgio Soares, Carlos Cruz, Nélson Eduardo e Joaquim Silva por todo o companheirismo, conhecimentos partilhados e incentivos. Aos alunos de doutoramento Christoph de Sousa,

Mário Coelho, Ricardo Cruz, Pedro Fernandes, Patrícia Silva e Luís Correia deixam também o meu agradecimento.

Aos meus grandes amigos, Tozé, João Amândio, Tiago Sá, Luís Pedro e Miguel Carvalho, um muito obrigado pela influência que têm tido na minha Vida.

À Catarina agradeço de um modo especial por todo o amor, apoio e incentivo, compreensão, dedicação e paciência, que tanto têm contribuído de uma forma que transcende todos os bons conceitos da Vida.

À minha Família, em especial aos meus Pais e Irmão, agradeço de uma forma também muito especial, o amor e o carinho dedicado, a compreensão que sempre demonstraram e o incessante incentivo demonstrado em toda a minha Vida.

RESUMO

Nos últimos anos, com a crescente necessidade de elementos estruturais leves, de elevada rigidez e resistência na Engenharia da Construção, nomeadamente na área da reabilitação, tem havido um enorme interesse no estudo e desenvolvimento de soluções compósitas, nas quais se incluem os painéis sanduíche.

A presente dissertação insere-se no projeto de investigação “EasyFloor”, que tem como objetivo o de contribuir para o desenvolvimento de painéis sanduíche inovadores que constituem o elemento central de uma nova técnica de reabilitação de pavimentos de piso de edifícios existentes ou em construção nova. Estes painéis serão constituídos por uma lâmina inferior em GFRP ou G/CFRP (*glass/carbon fiber reinforced polymer*), uma lâmina superior em matriz cimentícia reforçada com fibras de elevado desempenho e um núcleo em espuma de poliuretano (PUR). O trabalho inclui componentes experimentais e numéricas.

De modo a proceder à conceção e otimização do painel sanduíche nas suas diversas vertentes, foi necessário conhecer completamente as propriedades de todos os materiais envolvidos. Desta forma, numa primeira fase procedeu-se à caracterização mecânica do PUR à compressão, tração e corte. No que respeita aos ensaios de compressão e tração, foram seguidas as recomendações normativas existentes. Relativamente aos ensaios de corte, tendo por base a bibliografia existente, foi desenvolvida e analisada uma configuração de ensaio alternativa. Na análise da configuração de ensaio proposta foi avaliada a influência da geometria do provete na resposta ao corte do PUR. Posteriormente, a geometria e a metodologia desenvolvidas foram empregues para caracterizar experimentalmente o comportamento ao corte do PUR. Por intermédio de ensaios de tração uniaxial e de flexão, foi ainda caracterizado o comportamento de provetes de GFRP e C/GFRP sob o efeito de tensões normais. Realizaram-se diversas simulações numéricas dos ensaios experimentais efetuados com o objetivo de complementar a análise de resultados e de calibrar modelos numéricos para os estudos paramétricos realizados.

Em geral, os resultados experimentais obtidos estão de acordo com o reportado na bibliografia. Relativamente ensaios de corte do PUR constatou-se que existe um efeito de escala nos resultados obtidos, tendo-se observado que quanto maior é a relação comprimento/espessura (L/t) dos provetes, mais elevados são os valores da resistência ao corte. Complementarmente, observou-se que a rigidez inicial é pouco influenciada por este parâmetro (L/t), contrariamente ao que acontece com os modos de rotura observados experimentalmente, que consistentemente se mostraram dependentes desta relação. Quanto aos resultados obtidos a partir dos ensaios de

tração e de flexão em lâminas de GFRP, as duas configurações de provetes de GFRP ensaiadas não apresentaram diferenças significativas em termos das respostas experimentais observadas. Por outro lado, os provetes híbridos C/GFRP ensaiados à flexão apresentaram, em geral, um modo de rotura prematuro condicionante da resposta experimental, observando-se a delaminação ao nível da camada de transição entre os dois materiais. Por último, as simulações numéricas conducentes ao dimensionamento do painel sanduíche mostraram que o uso de uma camada superior com melhores propriedades mecânicas aumenta significativamente a rigidez à flexão do painel.

Palavras-chave: painel sanduíche híbrido, PUR, GFRP, C/GFRP, pultrusão, comportamento estrutural, ensaios experimentais, simulações numéricas

ABSTRACT

In recent years, with the growing need for light structural elements, of high stiffness and resistance in Construction Engineering, particularly in the rehabilitation domain, there has been a great deal of interest in the study and development of composite solutions, including sandwich panels.

The present dissertation is part of the research project "EasyFloor", which aims to contribute to the development of innovative sandwich panels that constitute the central element of a new technique for the rehabilitation of floors in existing buildings or new constructions. These panels will comprise a lower GFRP or G/CFRP (glass / carbon fiber reinforced polymer) flange, a top flange made of a cementitious matrix reinforced with high performance fibers, and a polyurethane foam core (PUR). The work includes experimental and numerical research components.

In order to proceed with the design and optimization of the sandwich panel in its several aspects, it was necessary to characterize the properties of all the materials involved. In this way, in a first phase the mechanical characterization of the PUR in compression, tension and shear was carried out. For the compression and tension tests, the existing normative recommendations were followed. With regard to the shear tests, based on the existing literature an alternative testing configuration was developed and analysed. In the analysis of the proposed test configuration, the influence of the geometry of the specimen in the shear response of the PUR was evaluated. Subsequently, the developed geometry and methodology were used to experimentally characterize the shear behaviour of PUR. By means of uniaxial tensile and flexural tests, the behaviour of GFRP and C / GFRP specimens under the effect of normal stresses was also characterized. Numerical simulations of the experimental tests were performed with the objective of complementing the analysis of results and of calibrating numerical models for the parametric studies.

In general, the experimental results obtained are in agreement with the ones reported in the literature. With regards to the PUR shear tests, it was found that there is a scale effect on the results obtained, since the higher the length / thickness ratio (L / t) of the test specimens, the higher the shear strength values obtained. Complementarily, it was observed that the initial stiffness of the experimental responses is almost not influenced by this parameter (L / t), in contrast to the experimentally observed rupture modes, which have consistently shown to be dependent on this ratio. As for the results obtained from the tensile and flexure tests on GFRP samples, the two configurations of GFRP specimens tested did not present significant

differences in terms of the observed experimental responses. On the other hand, the flexural test on C/GFRP hybrid test specimens showed, in general, that a premature failure mode tends to occur, which consists on the delamination at the level of the transition layer between the two materials. Finally, the numerical simulations leading to the design of the sandwich panel showed that the use of an upper layer with better mechanical properties significantly increases the flexural rigidity of the panel.

Keywords: hybrid sandwich panel, PUR, GFRP, C/GFRP, pultrusion, structural behaviour, experimental tests, numerical simulations.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xxv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Projeto EasyFloor: breve descrição	2
1.3 Objetivos e metodologia da dissertação.....	6
1.4 Estrutura da dissertação	8
2 ESTADO DO CONHECIMENTO	9
2.1 Introdução	9
2.2 Descrição de painéis sanduíche	10
2.2.1 Definição e constituintes dos painéis sanduíche	10
2.2.2 Processos de produção de painéis sanduíche.....	16
2.2.3 Evolução, aplicação e desenvolvimento dos painéis sanduíche na Engenharia .	22
2.3 FRP, PUR e argamassa de elevado desempenho	36
2.3.1 Polímeros reforçados com fibras ou FRP	36
2.3.2 Poliuretano.....	50
2.3.3 Argamassas de elevado desempenho.....	52
2.4 Comportamento mecânico dos painéis sanduíche	53
2.4.1 Considerações iniciais para o dimensionamento	53
2.4.2 Princípios do comportamento estrutural.....	54
2.4.3 Estado Limite de Serviço - Critério de deformação	63
2.4.4 Estado Limite Último – Critérios dos modos de rotura.....	65
3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM PUR	79
3.1 Introdução	79
3.2 Programa experimental	80
3.2.1 Ensaios de compressão	80
3.2.2 Ensaios de tração	82
3.2.3 Ensaios de corte	85

3.3	Resultados e Discussão	101
3.3.1	Ensaio de compressão	101
3.3.2	Ensaio de tração.....	104
3.3.3	Ensaio de corte	108
3.4	Simulações numéricas: Experimental <i>versus</i> Numérico	134
3.5	Conclusões	136
4	COMPORTAMENTO MECÂNICO DE LÂMINAS DE GFRP e C/GFRP	139
4.1	Introdução.....	139
4.2	Ensaio de Flexão.....	140
4.2.1	Programa Experimental	140
4.2.2	Resultados dos Ensaio de Flexão	145
4.3	Ensaio de Tração Direta.....	152
4.3.1	Programa Experimental	152
4.3.2	Resultados dos Ensaio de Tração Direta	156
4.4	Discussão de Resultados	161
4.4.1	Ensaio de Flexão	161
4.4.2	Ensaio de Tração Direta	167
4.4.3	Ensaio de Tração Direta <i>versus</i> Flexão	170
4.5	Conclusões	171
5	ESTUDOS PARAMÉTRICOS CONDUCENTES AO DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS SANDUÍCHE HÍBRIDOS	173
5.1	Introdução.....	173
5.2	Influência da camada superior na rigidez à flexão do painel	173
5.2.1	Introdução	173
5.2.2	Estudo paramétrico	174
5.3	Simulação baseada no MEF de um painel sanduíche híbrido.....	180
5.3.1	Considerações iniciais.....	180
5.3.2	Resultados.....	183
6	CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	187
6.1	Conclusões	187
6.2	Perspetivas de desenvolvimentos futuros.....	189
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	191
	ANEXO I - Ficha técnica do adesivo usada na colagem do PUR.....	199

ANEXO II - Caraterização geométrica dos provetes de PUR ensaios ao corte	201
ANEXO III - Resultados dos ensaios de corte do PUR	203
ANEXO IV - Modos de rotura dos provetes de PUR ensaios ao corte	207
ANEXO V - Caraterização geométrica dos provetes ensaiados à flexão	213
ANEXO VI - Caraterização geométrica dos provetes ensaiados à tração	215
ANEXO VII - Resultados dos ensaios de tração	217

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema dos painéis (a) compósitos e (b) híbridos, com sistemas de ligação por encaixe (a.1 e b.1) e por sobreposição (a.2 e b.2) (ALTO - PERFIS PULTRUDIDOS, IST e UM).....	3
Figura 2.1 - Constituição básica de um painel sanduíche (Compósitos, 2012).....	10
Figura 2.2 - Tipologias de estruturas sanduíche mediante o núcleo (adaptado de (Thomsen <i>et al.</i> , 2006)).	13
Figura 2.3 - Esquema tipo do processo da pultrusão tradicional. Destaque para o sistema de manuseamento das fibras, o sistema de guias para pré-formar e posicionar os reforços, a zona de impregnação de resina, o molde aquecido, o sistema de tração e o sistema de corte (adaptado de (Fibrolux)).....	18
Figura 2.4 - (a.1) Esquema do método da moldagem manual e (a.2) respetiva produção de um painel sanduíche; (b.1) esquema do método “ <i>vacum bagging</i> ” e (b.2) respetiva produção de uma prancha de surf (a.1 e b.1 (Cripps); a.2 e b.2 (Sena-Cruz, 2015)).	20
Figura 2.5 - Esquema do método de pulverização e respetiva aplicação (Lecture 5.4: Hand Lay-up and Spray Lay-up; Sena-Cruz, 2015).	21
Figura 2.6 - Métodos (a) RTM e (b) VARTM (adaptado de (Song, 2003)).....	21
Figura 2.7 - (a) Processo de infusão a vácuo no casco de um navio (DIAB) e (b) Processo de infusão a vácuo na produção de lâminas (Barbosa, 2014).	22
Figura 2.8 - (a) "Mosquito" (Compósitos, 2012) e (b) cápsula da nave <i>Apollo</i> com duas carapaças sanduíche interligadas (Davies, 2001).	23
Figura 2.9 - “Clickhouse”: painéis sanduíche compostos por lâminas em GFRP e núcleo em PUR. Estes foram utilizados para piso, parede e teto e foram produzidos por moldagem manual. Vãos até 3 m e sobrecarga de 1.6 kN/m ²	25
Figura 2.10 - “Legouse”: estrutura sanduíche (piso, parede e teto) composta por faces em betão autocompactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) e um núcleo em poliestireno expandidos (EPS), contendo ainda conetores em GFRP a ligar as duas camadas. Conseguiu-se atingir vãos de 8 m.....	25
Figura 2.11 - Habitação desenvolvida pela As Composit Inc (AS COMPOSITE INC).	25
Figura 2.12 - Solatrium House (2013) (horizon).	25
Figura 2.13 - Instalação do painel compósito da cobertura e aspeto final do edifício (CCLAB).	26

Figura 2.14 - Transporte aéreo e instalação de painel sanduíche compósito pré-fabricado com 21 m × 6 m. As faces deste painel são em GFRP e o núcleo em tereftalato de polietileno (PET) perfazem uma estrutura fina e leve, mas forte e resistente às variações extremas de temperatura (Suíça, 2011) (Gurit, 2011).....	26
Figura 2.15 - Ponte sobre o rio <i>Avançon</i> (vão com 11.4 m) (Flynn, 2013).	27
Figura 2.16 - A Makkah clock tower, torre central do Abraj-al Bait (Makkah, KSA). Edifício com 607 m em que os últimos 200 m contém mais de 40000 m ² de painéis sanduíche compósitos e FRP, incluindo o maior relógio do mundo (com 47 m de diâmetro) (Gurit, 2012).	27
Figura 2.17 - Cobertura da estação Haramain High Speed Rail. O telhado é estruturalmente composto por uma estrutura compósita com faces em GFRP e núcleo em PET. Os vãos possuem até 9 m e cobrem 160000 m ² (Gurit, 2013).....	27
Figura 2.18 - Painel tipo 1 com treliça no núcleo e conetores metálicos (esquerda); painel tipo 2 sem treliça no núcleo e com conetores metálicos (centro); painel tipo 3 com treliça no núcleo e com o dobro da espessura do tipo 1 e com conetores compósitos (direita). O painel tipo 4 resulta da metade não danificada do ensaio do painel tipo 3 (adaptado de (Norton, 2004)).	29
Figura 2.19 - Modos de rotura: (a) rotura do painel tipo 1 - fendilhação do betão e encurvadura local da face de GFRP; (b) rotura do painel tipo 2 - fenda de corte no betão; (c) pormenor junto ao apoio do painel tipo 2 - delaminação da face superior do núcleo; (d) perda da ligação entre o betão e treliça aos 77.84 kN no painel tipo 3; (e) rotura de corte no compósito após perder a ligação com o betão no painel tipo 3 e (f) rotura da ligação GFRP-betão e delaminação do betão no painel tipo 4 (adaptado de (Norton, 2004)).	29
Figura 2.20 - Composição e instalação do tabuleiro: (a) Painel FRP/LC pré-fabricado; (b) Painel FRP/LC conectado às vigas e (c) colocação da UHPFRC (Keller <i>et al.</i> , 2007).	30
Figura 2.21 - Secção híbrida da viga ensaiada (adaptado de (Keller <i>et al.</i> , 2007)).	30
Figura 2.22 - (a) Esquema do painel híbrido e (b) delaminação na interface GFRP/betão (adaptado de (Johnson <i>et al.</i> , 2006)).	31
Figura 2.23 - Secção transversal do painel proposto e ensaiado. As dimensões encontram-se em milímetros (adaptado de (Liu <i>et al.</i> , 2011)).	31
Figura 2.24 - Modo de rotura no painel sem tratamento da interface e pormenor do deslizamento entre as componentes de GFRP e betão (adaptado de (Liu <i>et al.</i> , 2011)).	32

Figura 2.25 - Modo de rotura no painel com tratamento da interface e pormenor do deslizamento entre as componentes de GFRP e betão (adaptado de (Liu <i>et al.</i> , 2011)).	32
Figura 2.26 - Painel Sanduíche híbrido GFRP/UDFRM: (a) Esquema tipo e (b - c) Painel em produção (adaptado de (Mastali <i>et al.</i> , 2015)).	33
Figura 2.27 - Sequência de danos observada durante o ensaio do painel sanduíche híbrido proposto (adaptado de (Mastali <i>et al.</i> , 2015)).	34
Figura 2.28 - Esquema dos conetores para o ensaio de tipo pull-out (adaptado de (Machado, 2015)).	35
Figura 2.29 - (a) Relação entre a tensão e a extensão da fibra, matriz e FRP (CNR-DT 205/2007) e (b) relação tensão-extensão para alguns tipos de cordões de FRP e aço (adaptado de (Zoghi, 2013)).	38
Figura 2.30 - Escala de análise na produção de um material compósito (Correia, 2004).	38
Figura 2.31 - Tipos de <i>Rovings</i> : (a) mecha de filamento contínuo não torcido (<i>tow</i>); (b) mecha de filamento contínuo torcido (<i>yarn</i>) (adaptado de (Fiberline Composites, 2003)) e (c) bobine de <i>roving</i> comercializada (FIBERGLASS).	41
Figura 2.32 - Tipos de manta: (a) manta com fibras contínuas orientadas aleatoriamente (<i>continuous strand mat</i>); (b) manta/tecido com fibras contínuas entrelaçadas, orientadas a 0° e 90° (<i>woven fabrics</i>); (c) manta que resulta da mistura de uma manta com fibras contínuas entrelaçadas (0° e 90°) com fibras orientadas aleatoriamente e (d) manta que resulta da mistura de uma manta com fibras orientadas a 0°, 45° e 90° com fibras dispostas aleatoriamente (adaptado de (Fiberline Composites, 2003)).	43
Figura 2.33 - Arranjo da matriz com as fibras: (a) arranjo por partículas: as fibras encontram-se dispersas pela matriz (reforço não direcional); (b) arranjo com fibras curtas: apesar de as fibras curtas encontrarem-se dispersas de modo aleatório, elas já apresentam uma certa orientação e (c) arranjo orientado com fibras longas: as fibras são longas e estão dispostas de forma orientada de modo a responder à carga a que vai ser sujeito (Jones, 1998).	45
Figura 2.34 - Disposição típica das camadas num perfil pultrudido (esquerda e direita) (adaptado de (Correia, 2013)).	46
Figura 2.35 - Comparação das propriedades mecânicas dos perfis de GFRP produzidos pela empresa <i>Fiberline</i> e outros materiais (Correia, 2004).	47
Figura 2.36 - Passadiços em gradil com guarda-corpos (ALTO).	49
Figura 2.37 - Plataforma de trabalhos com escada isolante e guarda-corpo (ALTO).	49
Figura 2.38 - Painel (STRONGWELL).	49

Figura 2.39 - Banco de Jardim (ALTO).....	49
Figura 2.40 - Ponte Aberfeldy- Primeira ponte pedonal 100% compósita (1992) (Correia, 2004).	49
Figura 2.41 - Ponte Bonds Mill –Primeira ponte rodoviária móvel (1994) (Correia, 2004). ..	49
Figura 2.42 - FRP Edifício EyeCatcher (1999) (Correia, 2004).	49
Figura 2.43 - Ponte Lérida (2001) (Correia, 2004).	49
Figura 2.44 - Variação dos parâmetros mecânicos: (a) em compressão; (b) tração e (c) corte (adaptado de (Davies, 2001)).	51
Figura 2.45 - Analogia entre uma estrutura sanduíche e uma viga em secção I.	54
Figura 2.46 - Ilustração do “efeito sanduíche” (adaptado de (Zenkert, 2005)).	55
Figura 2.47 - Viga sanduíche simplesmente apoiada. Secção AA à direita (adaptado de (Allen, 2013)).	56
Figura 2.48 - Distribuição de tensões de corte na viga sanduíche: (a) verdadeira distribuição de tensões; (b) tensões de corte constantes ao longo do núcleo (consideração das condições (2.3) e (2.11) e da hipótese de $E_c=0$) e (c) diagrama aproximado (consideração de (ii), desprezando ainda a rigidez de flexão local das lâminas) (adaptado de (Allen, 2013)). .	60
Figura 2.49 - Secção da viga sanduíche assimétrica (adaptado de (Zenkert, 2005)).	60
Figura 2.50 - Deslocamento transversal da viga sanduíche: (a) secção indeformada; (b) deformação devido à flexão pura; (c) deslocamento devido ao esforço de corte e (d) deformada global (flexão + corte) (Allen, 2013).	64
Figura 2.51 - Rotura por tração das faces: (a) meio vão e (b) na zona do apoio intermédio (adaptado de (Davies, 2001)).	66
Figura 2.52 - Rotura da lâmina comprimida (COMPOSITES, 2000).	67
Figura 2.53 - Encurvadura global (Ascione <i>et al.</i> , 2016a).	68
Figura 2.54 - Instabilidade por corte (Davies, 2001).	70
Figura 2.55 - Rotura por (a) encurvadura local a meio vão e (b) encurvadura local na zona de apoio intermédio, devido a esforços de compressão (Davies, 2001).	71
Figura 2.56 - (a) Instabilidade local: falha de compressão do núcleo e (b) instabilidade local: falha da ligação adesiva (adaptado de (Ascione <i>et al.</i> , 2016a)).	71
Figura 2.57 - Enrugamento entre células do núcleo (Davies, 2001).	72
Figura 2.58 - Rotura por corte do núcleo (Davies, 2001).	73
Figura 2.59 - Tensões nas faces, interface e núcleo (Davies, 2001).	75
Figura 2.60 - Resistência da face e núcleo no apoio (Davies, 2001).	75

Figura 2.61 - Três modos de rotura diferentes devido ao apoio: (a) por corte; (b) por esmagamento do núcleo e (c) por enrugamento da lâmina comprimida (Davies, 2001).	75
Figura 2.62 - Diferentes suposições para a distribuição de tensão no núcleo devido à reação de apoio: (a) distribuição de tensões no núcleo igual à que se desenvolve ao longo da largura de apoio; (b) degradação das tensões de compressão ao longo do núcleo; (c) distribuição mais precisa das tensões no núcleo e (d) distribuição mais parecida com o real (Davies, 2001).....	76
Figura 2.63 - Distribuição de tensões no núcleo mais realística (Davies, 2001).....	76
Figura 2.64 - Esmagamento local do núcleo (Ascione <i>et al.</i> , 2016a).....	77
Figura 2.65 - Rotura pela ligação (i) por tração e (ii) por corte (adaptado de (Davies, 2001)).	78
Figura 3.1 - Configuração de ensaio: (a) fase pré-inicial do ensaio e (b) fase final do ensaio.	81
Figura 3.2 - Configuração de ensaio e a instrumentação usada: (a) esquema do provete e sistema de ensaio e (b) fotografia do ensaio com a instrumentação. As dimensões encontram-se em milímetros.	84
Figura 3.3 - Ensaios propostos pela (a) ASTM C273-00 e (b) ISO 1922:2001(E). Nota: as dimensões encontram-se em milímetros.	86
Figura 3.4 - Exemplos de modelos usados no desenvolvimento do sistema de ensaio: (a) Esquema (FEM) do 1º modelo proposto e (b) configuração em FEM relativa modelo adotado. Nota: os modelos apresentados dizem respeito ao provete com as dimensões de $120 \times 50 \times 720 \text{ mm}^3$ (a) e $30 \times 360 \times 120 \text{ mm}^3$ (b).....	88
Figura 3.5 - Alguns dos resultados obtidos para a situação em que a chapa metálica possui 20 mm de espessura e a carga/reação de apoio encontram-se alinhadas verticalmente segundo os eixos de simetria do provete de PUR: (a) Apoios (esquerda) e carga aplicada em Z - 6500N (direita); (b) deslocamento em Z e (c) tensão de corte no plano ZX. Notas: os códigos “0” e “1” da figura (a) dizem respeito aos graus de liberdade em que existem condições de apoio (deslocamentos segundo X Y Z e rotações segundo X Y Z), sendo que os graus de liberdade impedidos têm o código “1”; os círculos a vermelho indicam os pontos onde foram aplicadas condições de apoio (pontos 1) e a carga (ponto 2).	89
Figura 3.6 - (a) Condições de apoio e (b) carga pontual ($F=-6500\text{N}$): (a.1) perspetiva 3D (em cima) e planta (em baixo), (a.2) plano XZ (em cima) e legenda relativa aos graus de liberdade na direção X, Y, Z e respetivas rotações (1 significa que está bloqueado e 0 significa que está livre); (b) carga aplicada em perspetiva 3D. Notas: os círculos a	

vermelho indicam os pontos onde foram aplicadas condições de apoio (pontos 1 e 2) e a carga (ponto 3).	91
Figura 3.7 - Deslocamentos em z obtidos da simulação numérica: (a) perspetiva tridimensional e respetivos pormenores e (b) plano XZ.	92
Figura 3.8 - Deslocamentos (X e Y) obtidos da simulação numérica: (a) perspetiva tridimensional e respetivos pormenores do deslocamento Y e (b) plano XZ referente ao deslocamento X.	93
Figura 3.9 - Tensão de corte a que o provete de PUR se encontra sujeito: (a) plano XZ e (b) perspetiva geral do provete.	94
Figura 3.10 - Configuração dos ensaios de corte em placas utilizado para a série 1: (a) vista 3D; (b) vista frontal; (c) vista lateral e (d) vista em planta. Notas: (i) as dimensões encontram-se em milímetros; (ii) devido à espessura do provete, a configuração usada na série 2 contém ajustes ao nível da posição dos apoios rotulados.	96
Figura 3.11 - Etapas relativas à preparação dos provetes para os ensaios de corte.	99
Figura 3.12 - Fotografias do ensaio de corte em espuma de poliuretano: (a) vista frontal e (b) vista posterior.	100
Figura 3.13 - Provetes ensaiados à compressão. Nota: a fotografia foi tirada algum tempo depois da realização dos ensaios, apresentando, por isso estes, a recuperação da deformação elástica.	102
Figura 3.14 - Relação entre a tensão de compressão e a extensão axial dos provetes de PUR ensaiados.	103
Figura 3.15 - Modos de rotura obtidos nos ensaios de tração do PUR.	105
Figura 3.16 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> extensão para todos os provetes de PUR ensaiados.	106
Figura 3.17 - Comparação ao nível da resistência máxima e do módulo de elasticidade entre os dois grupos identificados nos ensaios de caracterização em compressão e em tração: (a) tensão máxima e (b) módulo de elasticidade.	108
Figura 3.18 - Exemplo de aplicação da determinação de $\tau_{\max,2\%}$ e $\gamma_{\text{ult},2\%}$ para o provete PUR_ST_30_360_01.	109
Figura 3.19 - Provete (PUR_ST_30_360_06) com rotura por corte. Destacam-se as fendas de tração diagonalmente opostas.	110

Figura 3.20 - Relação entre a tensão de corte e a distorção: ensaios relativos aos provetes (a) PUR_ST_30_360; (b) PUR_ST_30_180; (c) PUR_ST_30_120 e (d) PUR_ST_30_120.....	112
Figura 3.21 - Modos de rotura típicos: (a) PUR_ST_30_360; (b) PUR_ST_30_180; (c) PUR_ST_30_120 e (d) PUR_ST_30_60.....	113
Figura 3.22 - Curvas médias da relação entre a tensão de corte e a distorção para as séries do Grupo I.....	114
Figura 3.23 - Influência das variáveis em estudo no Grupo I de ensaios com a relação L/t. Nota: comparação relativamente à série cuja relação L/t=12.....	116
Figura 3.24 - Relação entre a tensão de corte e a distorção: ensaios relativos aos provetes (a) PUR_ST_60_360; (b) PUR_ST_60_240 e (c) PUR_ST_60_120.....	118
Figura 3.25 - Modos de rotura típicos: (a) PUR_ST_60_360; (b) PUR_ST_60_240 e (c) PUR_ST_30_120.....	119
Figura 3.26 - Curvas médias que traduzem a relação entre a tensão de corte e a distorção dos provetes- tipo que compõem a série 2.	120
Figura 3.27 - Influência das variáveis em estudo no Grupo II de ensaios com a relação L/t. Nota: comparação relativamente à série cuja relação L/t=6.....	122
Figura 3.28 - Curvas médias relativas à relação entre a tensão de corte e a distorção (todas as séries).....	123
Figura 3.29 - Comparação da força máxima de corte entre provetes de ambos os Grupos com a mesma relação L/t: (a) força para uma deformação de corte de 2%, $F_{max,2\%}$, e (b) força na rotura, $F_{max,ult}$ (valor aparente). Nota: comparação relativamente ao Grupo I.....	124
Figura 3.30 - Comparação da tensão máxima de corte entre provetes de ambos os Grupos com a mesma relação L/t: (a) tensão para uma deformação de corte de 2%, $\tau_{max,2\%}$, e (b) tensão na rotura, $\tau_{max,ult}$ (valor aparente). Nota: comparação relativamente ao Grupo I.	125
Figura 3.31 - Comparação da distorção última de corte entre provetes de ambos os Grupos com a mesma relação L/t: (a) distorção para uma deformação de corte de 2%, $\gamma_{ult,2\%}$ e (b) distorção na rotura, $\gamma_{ult,ap}$ (valor aparente). Nota: comparação relativamente ao Grupo I.	126
Figura 3.32 - Comparação do módulo de corte entre provetes de ambos os Grupos com a mesma relação L/t. Nota: comparação relativamente ao Grupo I.....	126
Figura 3.33 - Provede PUR_ST_30_360_06: relação entre a tensão de corte e a distorção ($\tau - \gamma$), em cima; evolução das extensões principais (a meio) e evolução das extensões YY (em	

baixo). Nota: a numeração nos campos de extensões têm correspondência com a relação τ - γ	129
Figura 3.34 - Provete PUR_ST_30_180_01: relação entre a tensão de corte e a distorção (τ - γ); evolução das extensões principais (a meio) e evolução das extensões YY (em baixo). Nota: a numeração nos campos de extensões têm correspondência com a relação (τ - γ).	130
Figura 3.35 - Provete PUR_ST_30_120_01: relação entre a tensão de corte e a distorção (τ - γ); evolução das extensões principais (a meio) e evolução das extensões YY (em baixo). Nota: a numeração nos campos de extensões têm correspondência com a relação (τ - γ).	131
Figura 3.36 - Provete PUR_ST_30_60_01: relação entre a tensão de corte e a distorção (τ - γ); evolução das extensões principais (a meio) e evolução das extensões YY (em baixo). Nota: a numeração nos campos de extensões têm correspondência com a relação (τ - γ).	132
Figura 3.37 - Evolução das extensões XY para todos os provetes do Grupo I. Nota: a numeração nos campos de extensões têm correspondência com a relação (τ - γ).....	133
Figura 3.38 - (a) Condições de apoio e (b) deslocamento prescrito incremental aplicado. Notas: os códigos “0” e “1” da figura (a) dizem respeito aos graus de liberdade em que existem condições de apoio (deslocamentos segundo X Y Z e rotações segundo X Y Z), sendo que os graus de liberdade impedidos têm o código “1”. O código “-1” da figura (b) diz respeito à direção em que foi aplicado o deslocamento prescrito (direções X ou Y), sendo que “-1” representa o eixo Y e a direção negativa; os círculos a vermelho indicam os pontos onde foram aplicadas as condições de apoio (pontos 1 e 2).	135
Figura 3.39 - Relação entre a força e o deslocamento para os ensaios de corte do PUR_ST_30_360 - comparação entre a resposta numérica e a experimental.	136
Figura 4.1 - Secção transversal com identificação dos seus constituintes. São também apresentados os ensaios a realizar nos materiais retirados de cada parte do painel em FRP: nervura e face inferior.	139
Figura 4.2 - Configuração dos provetes extraídas das vigas 1, 2 e 3: (a) provetes extraídas da viga 1; (b) da viga 2 e (c) da viga 3.	142
Figura 4.3 - Imagens da configuração do ensaio de flexão (3 pontos) em provetes de GFRP e C/GFRP (vão igual a 220 mm): (a) provete de C/GFRP no equipamento de ensaio pronto a ensaiar e (b) provete de GFRP no equipamento de ensaio durante a realização do mesmo.	144
Figura 4.4 - Etapas relativas à preparação dos provetes para os ensaios de flexão.	145

Figura 4.5 - Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para os provetes ensaiados à flexão: (a) provetes em GFRP extraídos do banzo viga 1 (Série 1); (b) provetes em GFRP extraídos do banzo da viga 2 (Série 2) e (c) provetes híbridos extraídos do banzo da viga 3 (Série 3). Nota: importa referir a existência de uma descontinuidade em todas as respostas que se deve ao equipamento de medição.	147
Figura 4.6 - Modos de rotura obtidos referentes a cada série. Em cima encontra-se um provete de cada série durante a fase final do ensaio e em baixo encontram-se todas os provetes após o ensaio do mesmo: (a) provetes da Série 1; (b) Série 2 e (c) Série 3. Nota: nas imagens relativas ao conjunto de provetes, importa referir que o nível de rotura se encontra “ampliado” relativamente ao ensaio padrão, uma vez que todos os provetes foram continuamente carregados com o objetivo de amplificar o padrão de rotura.	150
Figura 4.7 - Imagens da região a meio vão mostrando a evolução da deformação e o modo de rotura típico evidenciado pelos provetes de GFRP e C/GFRP: (a) provete V2_B_GFRP_0°_01 e (b) provete V3_B_C/GFRP_0°_02. Notas: no caso do provete híbrido apenas é possível visualizar indiretamente a delaminação. As última fotografia de ambos os provetes dizem respeito ao momento em que se decidiu continuar o ensaios, sem registo de dados, de modo a amplificar visualmente o modo de rotura.	151
Figura 4.8 - Provetes extraídos das vigas 1 e 2, das quais se extraíram os provetes: na parte superior da imagem encontram-se os provetes retirados da viga 1 e na parte de baixo os provetes retirados da viga 2.	152
Figura 4.9 - Apresentação esquemática do corte dos provetes extraídos das vigas I.	153
Figura 4.10 - Configuração do ensaio de tração: (a) dimensões nominais e instrumentação e (b) equipamento universal de ensaios hidráulico com sistema de amarras e provete pronto a ensaiar.	154
Figura 4.11 - Sequência de procedimentos realizados para a preparação dos provetes para os ensaios de tração.	155
Figura 4.12 - Curvas que relacionam a tensão de tração com a extensão dos provetes (a) da viga 1 e (b) da viga 2.	157
Figura 4.13 - Modos de rotura obtidos nos provetes: (em cima) perspetiva global, (a) provetes da Série 1 e (b) provetes da Série 2. Nota: para cada um dos provetes apresenta-se uma fotografia frontal (em cima) acompanhada pela identificação dos provetes e uma fotografia à parte lateral do mesmo (em baixo).	160

Figura 4.14 - Relação entre a tensão e a extensão superiores (calculada) dos provetes das vigas 1 e 2 extraídos do banzo das respectivas vigas I.	163
Figura 4.15 - Comparação de resultados para os provetes extraídos do banzo das vigas 1 (Série 1) e 2 (Série 2) a partir dos respetivos valores médios de: (a) força máxima de flexão; (b) tensão máxima de flexão na face superior (calculada); (c) extensão máxima na face superior (calculada) e (d) módulo de elasticidade de flexão.....	164
Figura 4.16 - Comparação entre a força aplicada a meio vão e as extensões medidas pelo extensómetro na face inferior (trações) e a força e as extensões calculadas segundo a norma ASTM D7264/D7264M – 07, com base na deformação medida na face superior (compressões): (a) Série 1 e (b) Série 2.	165
Figura 4.17 - (a) Curvas adimensionais de todos os provetes ensaiados e (b) respetiva variação com base nos valores médios. A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda.	166
Figura 4.18 - Comparação dos vários parâmetros obtidos entre provetes da mesma série considerando: (a) a força máxima atingida; (b) a tensão de tração máxima; (c) a extensão máxima e (d) ao módulo de elasticidade. Nota: a comparação é sempre em relação ao provete anterior.	168
Figura 4.19 - Comparação dos vários parâmetros obtidos entre provetes do mesmo tipo, mas de séries distintas considerando: (a) a força máxima atingida; (b) a tensão de tração máxima; (c) a extensão máxima e (d) o módulo de elasticidade. Nota: a comparação é efetuada em relação à Série 1.	170
Figura 4.20 - Comparação dos resultados dos provetes da mesma série obtidos a partir dos ensaios de flexão e tração direta. Comparação para o provete V1 _B_GFRP_0° e V2 _B_GFRP_0°.....	171
Figura 5.1 - Modelo exemplo de uma secção em betão armado do SECTION (Sena-Cruz, 2013).	174
Figura 5.2 - Geometria da secção transversal modelada (em cima) e malha de elementos finitos adotada (em baixo). Nota: as dimensões encontram-se em milímetros e o FRP diz respeito ao GFRP.....	175
Figura 5.3 - Relação entre o momento fletor e a curvatura para distintas classes de resistência do betão.	177

Figura 5.4 - Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para um painel simplesmente apoiado com 4 metros de vão e com carregamento em 4 pontos, para distintas classes de resistência do betão.....	178
Figura 5.5 - Relação entre o momento fletor e a curvatura para diferentes extensões últimas de compressão da camada de betão.....	179
Figura 5.6 - Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para um painel simplesmente apoiado com 4 metros e carregado em 4 pontos e para diferentes extensões últimas de compressão da camada de betão.....	179
Figura 5.7 - Secção transversal modelada. Nota: as dimensões encontram-se em milímetros.	180
Figura 5.8 - Vistas tridimensionais de ¼ de painel: em cima, painel com todas as camadas; em baixo, foi removido o núcleo para melhor identificação dos restantes constituintes.	181
Figura 5.9 - Condições de apoio e de simetria utilizadas na modelação: perspetiva tridimensional do painel com alguns pormenores (em cima) e respetivos alçados (em baixo). Notas: os códigos “0” e “1” presentes na figura dizem respeito aos graus de liberdade em que existem condições de apoio (deslocamentos segundo X Y Z e rotações segundo X Y Z), sendo que os graus de liberdade impedidos têm o código “1”. A malha utilizada encontra-se também visível.	182
Figura 5.10 - Deslocamentos (plano ZX): em cima encontram-se os deslocamentos na direção Z e em baixo encontram-se os deslocamentos na direção X. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores encontrados na escala encontram-se em milímetros.....	183
Figura 5.11 - Evolução da tensão na direção longitudinal ao longo da altura do painel na zona de meio vão.....	184
Figura 5.12 - Distribuição das tensões axiais na direção X, na camada inferior e nervura em GFRP.....	185
Figura 5.13 - Distribuição das tensões axiais na direção X, na camada superior (matriz cimentícia) e no núcleo (PUR). Notas: na imagem do lado esquerdo, a camada com os respetivos elementos finitos, diz respeito à camada superior; no lado direito encontra-se apenas representada as camadas separadamente.	185

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens gerais dos painéis sanduíche (Davies, 2001; Peters, 1998; Zenkert, 2005).	15
Tabela 2.2 - Propriedades típicas de alguns tipos de FRP (adaptado de (Correia, 2013)).	38
Tabela 2.3 - Valores típicos das propriedades das fibras (Ascione <i>et al.</i> , 2016b; Bank, 2006).	39
Tabela 2.4 - Valores indicativos das propriedades de alguns polímeros (adaptado de (Ascione <i>et al.</i> , 2016b; Correia, 2004)).	44
Tabela 2.5 - Intervalos usuais das principais propriedades dos perfis de GFRP produzidos pelos maiores fabricantes (Correia, 2004).	46
Tabela 2.6 - Vantagens e desvantagens dos perfis pultrudidos (ALTO; Correia, 2004).	48
Tabela 2.7 - Coeficiente de viscosidade devido às deformações longitudinal e de corte, para diferentes estágios de tempo (CNR-DT 205/2007).	65
Tabela 3.1 - Caracterização geométrica e designação dos provetes ensaiados à compressão. ..	81
Tabela 3.2 - Caracterização geométrica e designação dos provetes ensaiados à tração.	83
Tabela 3.3 - Propriedades elásticas dos materiais utilizados nas modelações.	87
Tabela 3.4 - Cálculo do módulo de distorção e do respetivo erro tendo como base os deslocamentos verticais (Z) na zona central do provete.	95
Tabela 3.5 - Designação genérica e caracterização geométrica-tipo para as diferentes séries dos provetes ensaiados ao corte (t-espessura do provete, b-largura do provete, L-comprimento do provete).	98
Tabela 3.6 - Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compressão para o PUR.	104
Tabela 3.7 - Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de tração do PUR.	107
Tabela 3.8 - Valores médios dos principais parâmetros obtidos para as séries que compõem o Grupo I de ensaios.	115
Tabela 3.9 - Valores médios dos principais parâmetros obtidos para as séries que compõem o Grupo II de ensaios.	121
Tabela 3.10 - Propriedades do PUR utilizadas na simulação numérica.	135
Tabela 4.1 - Características gerais dos provetes extraídos para a realização de ensaios, incluindo dimensões médias e respetiva covariância (L_c - comprimento; b - largura; e - espessura).	143
Tabela 4.2 - Principais resultados obtidos dos ensaios de flexão em provetes de GFRP e C/GFRP.	148

Tabela 4.3 - Características gerais dos provetes extraídos para ensaio, incluindo as dimensões médias e respectivas covariâncias entre parênteses (L_c - comprimento; b - largura; e - espessura).....	153
Tabela 4.4 - Resultados médios obtidos para cada um dos provetes tipo de GFRP.	158
Tabela 5.1 - Modelos não lineares de materiais (Sena-Cruz, 2013).	174
Tabela 5.2 - Propriedades adotadas na modelação para os diversos materiais.	176
Tabela 5.3 - Propriedades adotadas na simulação numérica.....	182
Tabela 5.4 - Deslocamento vertical a meio vão determinado pelo modelo de elementos finitos e analiticamente.....	184
Tabela 5.5 - Tensão axial determinada analiticamente através das expressões analíticas descrita no Capítulo 2 e do modelo numérico.	186

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

A reabilitação reveste-se de grande importância um pouco por todo o mundo, tendo vindo a ganhar cada vez mais preponderância na América do Norte e Europa, particularmente em Portugal. No contexto nacional, verifica-se que os edifícios construídos antes de 1940 são tipicamente constituídos por paredes resistentes em alvenaria e pisos em madeira (Appleton, 2003) e, em geral, encontram-se num estado de conservação precário devido à falta de manutenção e/ou reabilitação. Os sinais de degradação, nomeadamente a nível estrutural, poderão trazer consequências graves, inclusive ao colapso da estrutura. Assim, uma intervenção atempada e correta permitirá prolongar a vida útil da estrutura, devendo aplicar-se uma solução que permita reduzir o tempo de aplicação e os custos associados à mesma. Este é um problema que ocorre na Europa, sendo particularmente gravoso em Portugal, onde há cerca de 1 milhão de edifícios com grande necessidade de reabilitação (Vilhena, 2013), 41% dos quais necessitando de intervenções médias a grandes (INE, 2013).

Hoje em dia, as soluções de reabilitação mais correntemente utilizadas envolvem a substituição dos pisos de madeira por lajes em betão ou mistas de aço-betão. Contudo, estas soluções apresentam diversos inconvenientes, destacando-se (i) o elevado peso que exercem sobre as paredes resistentes em alvenaria (agravando a resposta sísmica da estrutura) e (ii) os diversos constrangimentos práticos associados à sua execução em meio urbano. Nos últimos anos, têm sido propostas soluções de reabilitação baseadas em materiais compósitos, e.g. (Correia, 2008), nomeadamente os painéis sanduíche compósitos constituídos por lâminas em GFRP e núcleo em PUR. Apesar das inúmeras e importantes vantagens, tais como leveza, elevado desempenho mecânico, fácil instalação, elevada durabilidade, este tipo de solução apresenta tipicamente alguns inconvenientes, nomeadamente: (i) uso de técnicas (infusão a vácuo e moldagem manual) que requerem muita mão-de-obra e tempo de fabrico, não garantindo uma elevada qualidade do produto; (ii) deficiente comportamento em situação de incêndio; (iii) em muitos casos, devido ao elevado rácio resistência/rigidez, a deformação em serviço condiciona o dimensionamento, tornando a solução não competitiva para vãos e sobrecargas mais elevados; (iv) complexidade da ligação entre painéis; e (v) dificuldade em assegurar em termos regulamentares o desempenho acústico devido à baixa densidade dos materiais envolvidos.

De modo a colmatar deficiências nas atuais soluções de reabilitação existentes no mercado e explicitadas no parágrafo anterior, o consórcio do projeto EasyFloor, financiado pela Agência de Inovação (ANI) - Projeto n.º 3480 – aviso 08/SI/2015 – I&DT Empresarial Copromoção - liderado pela empresa ALTO – Perfis Pultrudidos, Lda., o Instituto Superior Técnico (IST) e a Universidade do Minho (UMinho) propõe-se desenvolver uma nova geração de painéis sanduíche pultrudidos. A produção dos mesmos consistirá num processo automatizado, permitindo um custo competitivo relativamente às soluções tradicionais e às que empregam materiais compósitos de primeira geração, i.e., não recorrendo a soluções automatizadas.

A presente dissertação insere-se no âmbito de um Projeto EasyFloor, sendo que nos próximos parágrafos se efetua uma descrição do projeto em causa.

1.2 Projeto EasyFloor: breve descrição

O projeto EasyFloor tem como objetivo principal o desenvolvimento de painéis sanduíche em FRP a utilizar na reabilitação de pisos em madeira de edifícios degradados. Pretende-se assim contribuir, de forma inovadora e comercialmente competitiva, para o cumprimento dos objetivos nacionais para o setor da reabilitação urbana. Além disso, a solução proposta poderá ser exportada e aplicada na reabilitação de edifícios um pouco por todo o Mundo, nomeadamente nos mercados onde atuam as principais empresas portuguesas da Engenharia Civil (Europa e Norte de África).

Será utilizado o processo de pultrusão para produzir dois protótipos de painéis sanduíche distintos, com campos de aplicação também diferentes em termos de vãos e/ou sobrecarga (ver Figura 1.1): (i) painéis compósitos de 2ª geração, compostos por lâminas exclusivamente em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP, do inglês *glass fibre reinforced polymer*) e núcleo em espuma de poliuretano (PUR), com uma gama preferencial de vãos entre 3 e 4 m. Este painel será desenvolvido fundamentalmente pelo IST; e (ii) um painel sanduíche híbrido constituído por uma lâmina inferior em GFRP ou polímero reforçado com fibras de vidro e carbono (G/CFRP), lâmina superior em argamassa reforçada com fibras de ultraelevada resistência e ductilidade (UHPFRM, do inglês *ultra-high performance fibre reinforced mortar*) e um núcleo em PUR, com uma gama preferencial de vãos entre 4 e 5 m, a ser desenvolvido fundamentalmente pela UMinho. Com a utilização de painéis híbridos garante-se uma maior

rigidez de flexão e axial do piso, e ainda um melhor desempenho acústico e em situação de incêndio. Além disso, está previsto serem estudadas duas soluções de ligação entre painéis: (i) ligação por encaixe (que poderá ser complementado por colagem adesiva) e (ii) ligação por colagem. Os painéis serão ligados às paredes de alvenaria por cantoneiras metálicas ou em GFRP, chumbadas à parede, aparafusadas e/ou coladas aos painéis. Este sistema permitirá reduzir a invasividade e os custos da intervenção.

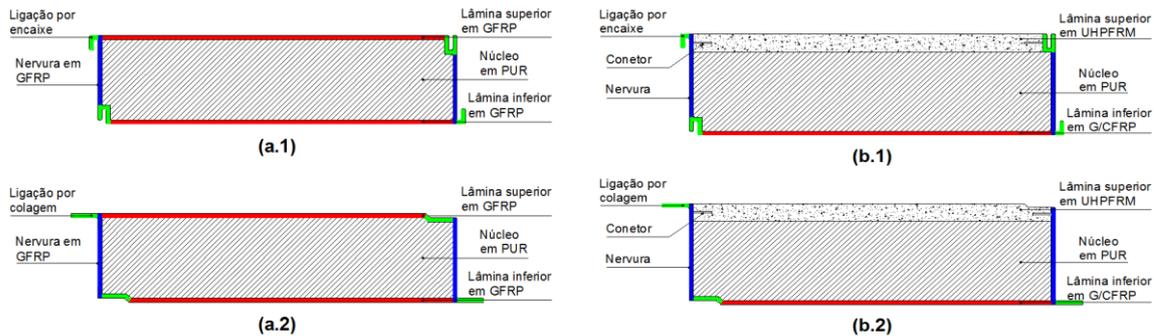


Figura 1.1 - Esquema dos painéis (a) compósitos e (b) híbridos, com sistemas de ligação por encaixe (a.1 e b.1) e por sobreposição (a.2 e b.2) (ALTO - PERFIS PULTRUDIDOS, IST e UM).

Face às soluções correntes, o produto a desenvolver tem como objetivo criar um sistema construtivo com um custo competitivo e com um desempenho melhorado ao nível de: (i) leveza; (ii) facilidade de transporte; (iii) rapidez e facilidade de montagem/desmontagem; (iv) cumprimento das exigências regulamentares de segurança estrutural e de desempenho térmico, acústico e em situação de incêndio; (v) ausência de manutenção; (vi) durabilidade; e (vii) possibilidade e facilidade de reutilização. Devido a todas as vantagens anteriormente referidas, a solução a desenvolver pretende competir com as soluções tradicionais onde é correntemente usado o betão armado, a madeira, o aço e a solução mista e os painéis sanduíche compósitos de 1ª geração.

Os painéis a desenvolver serão superiores aos painéis em compósito de GFRP convencionais (1ª geração), sanduíche ou multicelulares, no que respeita à (i) facilidade e rapidez de montagem (pelo sistema de ligação por encaixe ou sobreposição e rigor geométrico conferido pelo processo de fabrico); (ii) desempenho estrutural (dada a menor suscetibilidade das lâminas superiores de GFRP a fenómenos de instabilidade pelo travamento conferido pelas abas laterais do sistema de ligação); (iii) comportamento em situação de incêndio (pela incorporação de uma manta intumescente na lâmina inferior); (iv) desempenho térmico (pela presença do núcleo em

poliuretano, e por comparação com os painéis multicelulares); e (v) custo (pelo processo de fabrico por pultrusão, mais económico do que a infusão a vácuo ou a laminação manual). Os painéis híbridos apresentam adicionalmente vantagens específicas comparativamente com os painéis exclusivamente em GFRP: (vi) maior rigidez à flexão e rigidez axial do piso, que lhe confere superioridade quanto ao desempenho sísmico, e ainda (vii) maior resistência ao fogo e (viii) melhor desempenho acústico. A competitividade económica é mantida através da utilização de uma lâmina superior em UHPFRM e da lâmina inferior em G/CFRP, em detrimento da em GFRP dada a superioridade ao nível dos vãos e/ou níveis de sobrecarga.

Com o objetivo de assegurar a concretização do projeto EasyFloor, o consórcio definiu um conjunto de 6 atividades que, apesar de contarem com a participação de todos os parceiros, contêm tarefas específicas para cada parceiro, de modo a assegurar a execução do projeto. As atividades incluem: 1) Estudos preliminares e aquisição de novas capacidades para o desenvolvimento do projeto (coordenada pelo IST); 2) Investigação e desenvolvimento dos painéis sanduíche e dos respetivos modelos analíticos e numéricos (coordenada pela UMinho); 3) Construção de provetes e protótipos (ALTO); 4) Testes e Ensaios (coordenada pelo IST); 5) Promoção e Divulgação de Resultados (coordenada pela ALTO); e 6) Gestão técnica do projeto (coordenada pela ALTO). Às atividades atrás enumeradas, a equipa da UMinho estará envolvida nas seguintes tarefas:

- (i) **Estudos preliminares e planeamento do pré-dimensionamento dos painéis sanduíche** – nesta tarefa propõe-se analisar criticamente a conceção geral e o pré-dimensionamento das soluções a desenvolver para ambas as tipologias de painel, para que seja possível definir a secção transversal e o material a usar;
- (ii) **Investigação crítica das vantagens tecnológicas, económicas e da técnica de fabrico dos painéis sanduíche a desenvolver quando comparados com as soluções de reabilitação alternativas;**
- (iii) **Análise da modelação analítica e numérica para a previsão do comportamento estrutural dos painéis sanduíche e respetivas ligações** – pretende-se o desenvolvimento de competências numéricas (programas de elementos finitos) e analíticas (teoria de placas, teoria de vigas sanduíche, teoria clássica de laminados, comportamento estrutural das estruturas sanduíche em estado limite último e de serviço);

- (iv) **Investigação, desenvolvimento e otimização dos painéis sanduíche e dos sistemas de ligação** – com base no pré-dimensionamento e nos modelos analíticos e numéricos serão realizados estudos paramétricos tendo em vista a otimização das duas tipologias de painéis sanduíche;
- (v) **Investigação e desenvolvimento de modelos numéricos para a previsão do comportamento em serviço (estático e dinâmico) e à rotura dos painéis sanduíche e das suas ligações, com recurso a software de elementos finitos (comerciais e desenvolvidos por autores do consórcio)** – as propriedades mecânicas dos materiais constituintes dos painéis serão avaliadas experimentalmente. Para prever todos os possíveis modos de rotura (rotura material ou por instabilidade das lâminas e abas, rotura na interface lâminas-núcleo, rotura coesiva do núcleo) utilizar-se-ão elementos de interface entre as lâminas e o núcleo e realizar-se-ão análises geometricamente não lineares (para além do comportamento não linear material e/ou critérios de rotura). As ações de dimensionamento e condições de ligação e apoio adequadas à simulação dos painéis e das suas ligações serão tidas em consideração. A calibração e validação destes modelos serão suportadas pelos resultados obtidos durante todo o programa experimental;
- (vi) **Desenvolvimento da UHPFRM**, nomeadamente da composição do compósito cimentício, do tipo e teor das fibras de reforço e **caraterização** preliminar do seu comportamento material;
- (vii) **Ensaio de caraterização do comportamento dos materiais constituintes dos painéis para a determinação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais constituintes dos painéis** (estas propriedades serão posteriormente utilizadas nos modelos analíticos e numéricos de dimensionamento);
- (viii) **Ensaio de caraterização da ligação entre a componente compósita (G/CFRP e PUR) e a lâmina em UHPFRM dos painéis híbridos** - serão efetuados ensaios de conexão de corte (*push-out*) entre a componente compósita do painel (lâmina inferior em G/CFRP e núcleo de PUR) e a lâmina superior em UHPFRM.
- (ix) **Ensaio de caraterização do comportamento estrutural a curto (estático e dinâmico) e longo prazo dos painéis sanduíche compósitos GFRP (IST) e dos painéis sanduíche híbridos G/CFRP-UHPFRM (UM)** – para calibrar/validar as soluções desenvolvidas numericamente;

- (x) **Ensaio de caracterização do comportamento de ligações (painel-painel e painel-apoios) em painéis sanduíche compósitos GFRP e painéis sanduíche híbridos G/CFRP-UHPFRM** - as soluções de ligação entre painéis (por encaixe e/ou sobreposição, eventualmente complementadas com colagem) e entre painéis e paredes de apoio (com cantoneiras periféricas, chumbadas às paredes e aparafusadas aos painéis, eventualmente complementadas com colagem às lâminas dos painéis) serão testadas de acordo com os esforços esperados nas mesmas (tração, compressão, corte e esmagamento). Para avaliar a rigidez, resistência e ductilidade das ligações serão utilizados troços de provetes que reproduzam condições reais.
- (xi) **Ensaio para avaliação do desempenho *in situ* de um piso reabilitado com os painéis sanduíche**
- (xii) **Preparação de um manual com regras de dimensionamento e especificações técnicas para a produção, montagem e utilização** - por último, será elaborado um manual com as regras de dimensionamento dos painéis a desenvolver no âmbito deste projeto e das respetivas ligações, (2) as especificações técnicas para a produção em fábrica dos painéis sanduíche, (3) as regras para a sua montagem em obra e (4) as recomendações para a sua utilização e manutenção durante a fase de serviço.

1.3 Objetivos e metodologia da dissertação

O principal objetivo da presente dissertação é o de contribuir para o desenvolvimento de um painel sanduíche híbrido para a reabilitação de edifícios e caracterizar mecanicamente os materiais intervenientes no mesmo. Para além disso, definiram-se objetivos específicos que têm como finalidade chegar ao objetivo final, nomeadamente:

- i. Efetuar pesquisa bibliográfica de publicações existentes sobre estudos experimentais, numéricos e analíticos, que relatem o uso de painéis sanduíche e painéis sanduíche híbridos como solução de piso estrutural;
- ii. Auxílio no desenvolvimento da arquitetura de fibras a usar no painel;

- iii. Caracterização mecânica dos materiais intervenientes no painel sanduíche, em particular a espuma de poliuretano, as lâminas de GFRP e C/GFRP e a camada de argamassa de origem cimentícia;
- iv. Simulações numéricas relativas aos ensaios de corte em espumas de poliuretano;
- v. Estudos conducentes ao dimensionamento de painéis sanduíche com recurso à simulação numérica dos painéis sanduíche, através de *software* baseado num modelo de fibras e no método dos elementos finitos.

Para a concretização dos objetivos anteriormente definidos, numa primeira fase efetuar-se-á uma pesquisa bibliográfica com recurso aos serviços de documentação disponíveis na Universidade do Minho, através publicações existentes, através de pesquisas na internet e através da bibliografia disponibilizada pelos orientadores científicos. Esta pesquisa permitirá adquirir as competências necessárias sobre o tema, nomeadamente no que se refere às soluções existentes, aos materiais e arquiteturas usuais, processos de fabrico, experimentação e simulações numéricas e analíticas. Esta fase é importante porque permitirá perceber a configuração e o comportamento das soluções existentes, bem como, qual o papel que cada componente do painel desempenha na solução global. Deste modo será possível otimizar o desenho do painel, assim como as respetivas componentes de ligação painel-painel e painel-suporte.

Numa segunda fase, irá proceder-se ao desenvolvimento da arquitetura do painel. Para tal serão realizadas diversas simulações numéricas (incluindo estudos paramétricos) com base no método dos elementos finitos, de modo a obter-se a solução otimizada do painel.

No que concerne à componente experimental da presente dissertação, numa fase inicial, será necessário proceder à caracterização dos materiais constituintes do painel sanduíche híbrido, nomeadamente as lâminas em GFRP e em C/GFRP e o núcleo em poliuretano. Estes ensaios são realizados no Laboratório de Estruturas (LEST) da Universidade do Minho com recurso a equipamentos apropriados. Todos os resultados experimentais serão devidamente analisados. Finalmente, efetuar-se-á a redação da dissertação onde serão explanados os métodos utilizados, resultados obtidos e as conclusões principais.

1.4 Estrutura da dissertação

No Capítulo 1 faz-se uma introdução ao tema, nomeadamente ao Projeto em que esta dissertação se encontra inserida, destacando-se a sua importância na Engenharia Civil.

No Capítulo 2 apresenta-se um levantamento relativo às características dos painéis sanduíche e seus constituintes, nomeadamente no que se refere aos materiais e arquiteturas usuais, processos de fabricos, trabalhos elaborados e às aplicações. Posteriormente, apresenta-se cada um dos materiais que compõe os painéis sanduíche híbridos a desenvolver. São ainda apresentados os métodos de cálculo generalizados que permitem o cálculo deste tipo de estrutura, bem como o seu comportamento mecânico.

No Capítulo 3 são apresentados os resultados da caracterização do comportamento mecânico (compressão, tração e corte) da espuma de poliuretano que compõe o painel sanduíche. Este inicia-se com a descrição do programa experimental. Posteriormente, apresentam-se os resultados obtidos e efetua-se uma análise detalhada, principalmente nos ensaios de corte. Por fim, apresentam-se as simulações numéricas em regime não linear relativas aos ensaios de corte efetuados.

No Capítulo 5 é detalhado o estudo do comportamento mecânico (flexão e tração) de provetes pultrudidos obtidos a partir de vigas em I em GFRP e C/GFRP. Assim, é apresentado o programa experimental relativo a cada ensaio, seguindo-se os resultados obtidos. Posteriormente, efetua-se a respetiva discussão de resultados.

No Capítulo 6 apresentam-se as simulações numéricas, desenvolvidas com recurso a *softwares* de elementos finitos (*FEMIX 4.0* e *SECTION 4.0*), conducentes ao desenvolvimento do painel sanduíche híbrido por intermédio de estudos paramétricos.

Por último, no Capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões do trabalho efetuado e sugerem-se trabalhos complementares a desenvolver num futuro próximo, que não foram alvo de estudo desta dissertação.

CAPÍTULO 2

ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 Introdução

O presente capítulo tem como objetivo, introduzir a temática associada a painéis sanduíche estruturais na Engenharia Civil. Deste modo é definido o que é um painel sanduíche e quais os seus constituintes. Para além da evolução dos painéis sanduíche, serão apresentados alguns exemplos de aplicação dos mesmos na Engenharia, com foco na aplicação estrutural. Posteriormente, é dada especial atenção aos trabalhos já desenvolvidos no que diz respeito à construção em sanduíche na Engenharia Civil.

A construção com estruturas sanduíche foi uma das primeiras formas de estruturas compósitas a ser profusamente aceite (Peters, 1998). O uso deste tipo de estrutura continua a aumentar e evoluir rapidamente, sendo amplamente usadas em várias indústrias, onde o peso é um fator preponderante. O seu potencial deve-se, essencialmente, ao elevado rácio resistência-peso e rigidez-peso comparativamente com as soluções correntes. A estrutura de baixo peso permite que a construção sanduíche continue a ser procurada (Davies, 2001; Thomsen *et al.*, 2006). Para além disso, fatores como a durabilidade, a versatilidade, a eficiência estrutural e energética, a estética e o fácil manuseamento contribuem para a sua extensa utilização como elemento estrutural ou não estrutural. As principais desvantagens estão relacionadas com o baixo isolamento acústico, o baixo desempenho a altas temperaturas, o preço e a falta de conhecimento sobretudo ao nível da comunidade de projetistas (de Castro *et al.*, 2012).

Nesta dissertação, os materiais em análise são os polímeros reforçados com fibra de vidro e/ou carbono (do inglês *glass fiber reinforced polymer* - GFRP e *carbon fiber reinforced polymer* - CFRP, respetivamente), a argamassa reforçada com fibras de ultraelevada resistência e ductilidade (UHPFRM) e o poliuretano (PUR) para as faces e núcleo, respetivamente. Deste modo, tira-se proveito da estrutura sanduíche, das características dos materiais compósitos de origem polimérica e cimentícia.

2.2 Descrição de painéis sanduíche

2.2.1 Definição e constituintes dos painéis sanduíche

Segundo Zenkert a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) define que uma estrutura sanduíche “é uma forma especial de um compósito laminado que compreende uma combinação de diferentes materiais ligados entre si, permitindo utilizar as propriedades de cada componente individual com a vantagem estrutural da combinação” (Zenkert, 2005). O autor Barbero diz que um material compósito é todo o tipo de soluções compostas por dois ou mais materiais e cujo principal objetivo é conjugar e alcançar propriedades físicas e químicas superiores às dos seus constituintes individuais. Incluem-se nesta categoria os painéis sanduíche, os polímeros reforçados com fibra e as estruturas compósitas de origem polimérica (lâminas e laminados) (Barbero, 2010).

Independentemente dos materiais a serem usados, a estrutura sanduíche é geralmente composta por três camadas principais: duas faces/lâminas (camadas exteriores) e um núcleo (camada interna), separadas por um adesivo, tal como mostra a Figura 2.1 (Zenkert, 2005).

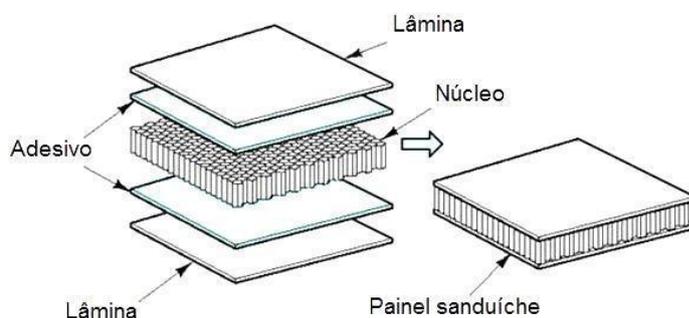


Figura 2.1 - Constituição básica de um painel sanduíche (Compósitos, 2012).

As faces caracterizam-se por serem finas, rígidas e de elevada resistência, conferindo essencialmente rigidez de flexão ao sistema. A função das faces é resistir aos esforços de compressão, tração e eventualmente de corte. O núcleo é espesso, leve, menos rígido e resistente, apresentando, contudo, uma resistência adequada ao esforço transversal. As funções primárias deste componente são estabilizar as faces e transportar a maior parte das cargas de corte através da espessura. O adesivo, não menos importante, tem como função ligar todos os

elementos, de modo a garantir a continuidade e assim a transmissão de esforço entre as camadas (Peters, 1998).

Os painéis sanduíche podem apresentar diversas configurações tendo em conta as diversas formas e materiais existentes. Estas permitem tirar o máximo proveito de cada um dos materiais, de modo a potenciar a solução final. Podem ainda ser usados elementos adicionais, como reforços (laterais, centrais) e conectores, para melhorar as características do produto (Peters, 1998).

A escolha dos materiais que constituem as camadas deve satisfazer um conjunto de requisitos, respeitando as funções desempenhadas pelos mesmos a nível funcional, estrutural e ambiental (reutilização). De acordo como o tipo de aplicação e escolha dos materiais, por vezes é necessário tomar medidas para aumentar a durabilidade à custa de tintas protetoras, entre outros.

Forma e materiais das lâminas

As lâminas podem ser lisas, pouco enrugadas ou enrugadas. Até há relativamente pouco tempo, a maior parte dos painéis de cobertura apresentava uma face superior perfilada e espessa com o objetivo de ser esse o único suporte para as cargas a longo prazo, como o peso próprio e a neve. Mais recentemente, a introdução do efeito de fluência no material do núcleo e assim a transferência de carga entre os constituintes permitiu tirar um melhor proveito do efeito sanduíche. Deste modo, enquanto no passado era considerado essencial utilizar painéis perfilados e espessos de modo a diminuir o efeito de fluência do núcleo, é atualmente possível utilizar painéis lisos ou poucos perfilados (Davies, 2001).

Os materiais das lâminas são geralmente classificados em dois grupos: (i) metálicos e (ii) não metálicos (Zenkert, 2005). O aço, o aço inoxidável, o alumínio e as diversas ligas de cobre e alumínio fazem parte do primeiro grupo, enquanto a madeira, o polímero reforçado com fibras de vidro e/ou carbono, o betão e argamassa de elevado desempenho fazem parte do segundo. As lâminas metálicas são as mais usadas nos painéis sanduíche. Estas apresentam elevada resistência e rigidez e um custo acessível, contudo são suscetíveis à corrosão e é difícil obter formas complexas. Contudo, as lâminas em FRP são as que têm criado um maior impacto desde a sua introdução (Davies, 2001; Zenkert, 2005).

Caso as lâminas sejam compostas por materiais compósitos, está-se na presença de um painel sanduíche compósito. Por sua vez, se as lâminas forem constituídas por materiais diferentes (por exemplo: matriz cimentícia e material compósito), o painel designa-se híbrido.

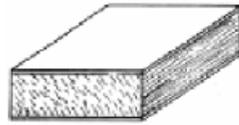
Formas e materiais do núcleo

O núcleo pode ser em qualquer arquitetura ou material, apresentando-se geralmente em duas formas distintas (Figura 2.2) (Allen, 2013; Thomsen *et al.*, 2006):

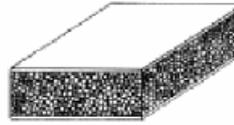
i. os núcleos homogêneos, como por exemplo o poliuretano (PUR), o polietileno tereftalato (PET), o polisocianurato (PIR), o poliestireno expandido (EPS) e extrudido (XPS), a espuma fonolítica, as lãs, os polímeros reforçados com fibras, o metal, a madeira de balsa, e o papel;

ii. os núcleos estruturados, geralmente compostas por estruturas laminares, dos quais fazem parte os núcleos em favo de mel, os núcleos corrugados e os têxteis. Os núcleos estruturados podem ser em metal, polímero, cerâmica e até cartão.

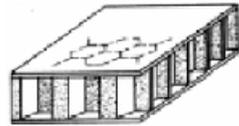
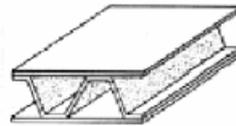
No primeiro grupo, as características mecânicas são iguais em ambas as direções. Pelo contrário, devido às inúmeras configurações disponíveis no segundo grupo, as características mecânicas podem ser iguais ou diferentes nas duas direções. O núcleo pode ainda conter elementos de reforço em treliça ou em nervuras. Caso isso se verifique, o esforço de corte é também suportado pelos mesmos. No geral, quanto maior a densidade dos núcleos, maior é a resistência mecânica e a condutibilidade térmica (Allen, 2013; Thomsen *et al.*, 2006).

Material do núcleo homogêneo:

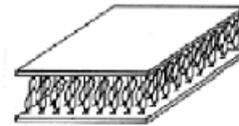
Núcleo de madeira



Núcleo de espuma

Materiais do núcleo estruturados:Núcleo em favo
de mel

Núcleo corrugado



Núcleo têxtil

Figura 2.2 - Tipologias de estruturas sanduíche mediante o núcleo (adaptado de (Thomsen *et al.*, 2006)).**Adesivos e Reforços**

Como referido, o adesivo é uma componente do painel sanduíche extremamente importante pois une todos os seus componentes. A resistência da ligação deve ser superior ou igual à resistência dos materiais do núcleo e faces (Davies, 2001).

Apesar de existirem diversos tipos de adesivos, os mais usuais são os de poliuretano de um ou dois componentes. Os primeiros são mais adequados para os núcleos flexíveis e os segundos para núcleos rígidos. A escolha do tipo de adesivo deve ter em consideração a compatibilidade química entre os materiais, as suas características mecânicas e a resistência ao fogo e temperatura. É necessário ainda considerar o processo de produção dos painéis sanduíche: quando as faces e o núcleo são produzidos separadamente, o adesivo é posteriormente usado para unir as camadas; quando as lâminas FRP e o núcleo são produzidos ao mesmo tempo numa linha de montagem, é possível tirar partido da matriz das lâminas como material adesivo. De um modo geral, o adesivo é aplicado de forma líquida, entre 200 e 350 g/m² (Davies, 2001).

Muitas das soluções que têm vindo a ser propostas para painéis sanduíche compósitos têm vindo a demonstrar algumas fragilidades, entre as quais se destaca a delaminação intercamadas prematura, em virtude, de ligações deficientes ao nível da interface lâmina/núcleo, a reduzida resistência ao corte do núcleo e a ocorrência de encurvadura global e local das lâminas comprimidas. Nesse contexto, uma das soluções estudadas para evitar esses problemas reside

na introdução de nervuras e costuras em FRP no núcleo a interligar as lâminas. Potluri *et al.*, (2003) e Lascoup *et al.*, (2006) estudaram o efeito da introdução de costuras em painéis de dimensão reduzida e concluíram que as propriedades mecânicas do painel eram melhores ao nível da resistência, rigidez e fadiga. Posteriormente, Reis e Rizkalla (2008) e Dawood *et al.*, (2010) estudaram o efeito de reforços em fibra com uma arquitetura 3D a uma escala intermédia/real. A solução mostrou ser eficaz, contudo a elevada complexidade e o custo do processo de fabrico não permitia garantir o sucesso da técnica. Fam and Sharaf (2010) estudaram mais tarde uma solução alternativa de reforço de painéis compósitos que consistia na introdução de uma grelha de nervuras longitudinais e transversais em FRP a interligar as lâminas. Do ponto de vista mecânico, esta solução mostrou-se eficaz ao nível da resistência e rigidez. Contudo, a técnica de fabrico utilizada (moldagem por transferência de resina a vácuo - VARTM) apenas permite produzir um painel de cada vez, deixando de ser uma solução competitiva.

Vantagens e Desvantagens dos Painéis Sanduíche

A Tabela 2.1 sintetiza as principais vantagens e desvantagens dos painéis sanduíche.

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens gerais dos painéis sanduíche (Davies, 2001; Peters, 1998; Zenkert, 2005).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Combinação de diferentes materiais; ➤ Facilidade de adotar formas complexas, nomeadamente quando se usam FRP; ➤ Elevado rácio resistência e rigidez-peso; ➤ Fácil manuseamento e instalação rápida, sem necessidade de equipamento pesado de elevação; ➤ Bom isolamento térmico e acústico; ➤ Sistema impermeável; ➤ Superfície de acabamento que aumenta a resistência às intempéries ambientais; ➤ Fácil reparação ou substituição em caso de danos; ➤ Elevada durabilidade com pouca manutenção; ➤ Produção em massa e com garantias de qualidade; ➤ Boa capacidade para absorver impactos (núcleos elastómeros); ➤ Boa distribuição de tensões; ➤ Boa capacidade de absorção de energia e de amortecimento. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Fraca resistência a temperaturas elevadas, nomeadamente quando constituídos por “plásticos”; ➤ Suscetibilidade a fenómenos de fluência, principalmente quando se usa fibra de vidro e núcleos de espuma; ➤ Quando se usam faces em FRP, as propriedades ortotrópicas das faces e a variedade de critérios de rotura dificultam o dimensionamento; ➤ Falta de conhecimento por parte dos engenheiros e arquitetos; ➤ Custo elevado das matérias-primas (quando se usam FRP’s); ➤ Deformações excessivas quando expostos ao calor; ➤ Isolamento acústico fraco, apesar de superior ao das soluções correntes; ➤ Elevada deformabilidade; ➤ Grande variedade de modos de rotura.

2.2.2 Processos de produção de painéis sanduíche

O processo de fabrico dos painéis sanduíche envolve, essencialmente, duas fases: 1^a) a produção das lâminas; e 2^a) a produção do núcleo. Cada fase difere de acordo com o material utilizado. O núcleo pode ser produzido em placas que são posteriormente coladas às lâminas com um adesivo ou, no caso das espumas, pode ser diretamente introduzido por injeção entre as lâminas do painel formando uma ligação natural entre as camadas. A produção destes painéis é normalmente realizada por laminação manual.

No caso de painéis sanduíche híbridos, objeto de estudo da presente dissertação, estes são constituídos por três componentes principais: (i) uma lâmina inferior p.e. em C/GFRP; (ii) um núcleo p.e. em poliuretano; e, (iii) uma lâmina superior p.e. em argamassa reforçada com fibras de ultraelevada resistência e ductilidade (UHPFRM). Tendo em conta o tipo de painel a desenvolver (híbrido), o enfoque das próximas secções irá agora recair no processo de fabrico destes.

Produção da lâmina em FRP e do painel sanduíche

De entre os diversos métodos para o fabrico dos materiais FRP e painel sanduíche, destacam-se dois processos de produção: (i) a pultrusão e (ii) a moldagem manual, uma vez que são os processos mais utilizados nas aplicações estruturais da indústria da construção (Bank, 2006). No primeiro, os produtos FRP são produzidos em fábrica numa linha de produção, seguindo-se o transporte para aplicação em obra. No segundo caso, os produtos FRP podem ser produzidos em fábrica ou em obra. Outros processos de produção importantes são: (iii) a pulverização, (iv) a moldagem por transferência de resina (RTM, *resin transfer molding*) e a moldagem por transferência de resina sob vácuo (VARTM, *vacuum assisted resin transfer molding*) e (v) a infusão a vácuo. A moldagem por infusão de resina (na sigla inglesa RIM, *resin infusion molding*), a centrifugação e o enrolamento filamentar (produtos tubulares) são usados sobretudo na produção de peças individuais de FRP (Bank, 2006; Barbero, 2010). Todos estes processos encontram-se descritos com maior detalhe em (Barbero, 2010; Zenkert, 2005), sendo que na presente dissertação se faz uma pequena resenha destes.

i. Pultrusão

A pultrusão, com aplicações comerciais desde 1950, é um processo automatizado de produção contínua de peças com secção transversal constante (Bank, 2006) que permite transformar as fibras de reforço (fibra de vidro, carbono ou aramida) e a matriz polimérica (resina poliéster, epóxi viniléster ou fenólica) num produto final, com uma relação produtividade/custo bastante elevada (Zureick e Scott, 1997). É um processo exclusivamente aplicado aos materiais compósitos que permite a produção de perfis de secção transversal aberta ou fechada (tubos), com secções diversas e complexas (algumas impossíveis de obter para perfis metálicos). Este processo permite ainda construir painéis sanduíche compósitos. Nestes últimos adicionalmente é colocado o núcleo aquando o processo de produção do material FRP. Quando o material do núcleo é uma espuma de poliuretano, é possível inseri-lo em forma de placas ou por injeção, impedindo-se o contacto com a fiação através da inserção de uma camada de fibra e resina.

O processo é muito semelhante à extrusão convencional, diferindo apenas na aplicação da pressão: enquanto na extrusão convencional a força para obrigar o material a passar pela fiação é aplicada antes da fiação, na pultrusão essa mesma pressão é aplicada após a fiação através de um sistema de tração que agarra o perfil, (ALTO).

O processo de pultrusão tradicional (Figura 2.3) é normalmente dividido em duas fases principais: (i) na primeira, as fibras de reforço são impregnadas por uma matriz no estado líquido, independentemente da forma e posição das mesmas; (ii) na segunda fase, dá-se a solidificação da matriz no interior de um molde aquecido com a forma da secção transversal a produzir.

De um modo geral, o processo de pultrusão consiste no arrasto de fibras contínuas (*roving*), manta e/ou tecidos contínuos que se encontram num sistema de manuseamento das fibras (Figura 2.3 - fases 1 e 2). Na pultrusão tradicional, estas são impregnadas num sistema de banho aberto de resina (Figura 2.3 - fases 3 e 4) passando de seguida por um sistema de guiamento e controlo, onde é retirado o excesso de resina e é dada uma pré-forma às fibras para que estas tenham a forma aproximada à secção a produzir. É de

notar que existe também a pultrusão por injeção, onde as fibras não impregnadas são puxadas para o molde metálico e as resinas (misturadas com os *fillers* e os aditivos) adicionadas por injeção, conferindo uma maior uniformidade ao material e permitindo alterar rapidamente a composição da matriz durante o processo única diferença entre os dois processos, (ALTO; Correia, 2004; PULTREX; Zenkert, 2005).

Posteriormente, estas passam numa fieira aquecida com a forma da secção transversal desejada onde se efetua a cura do material compósito. À medida que se dá o processo de cura no interior do molde, o material sofre retração e separa-se das paredes do molde enquanto a secção vai progredindo. Este avanço é conseguido à custa de um mecanismo de tração, dependendo a velocidade do tipo de equipamento e da secção transversal. Para que a cura seja efetuada completamente no tempo em que o produto se encontra na fieira, a velocidade de produção é controlada de modo a que o produto resista às forças que o mecanismo de tração provoca. Por fim, o perfil ou painel passa por um sistema de corte onde são cortados no comprimento desejado (Figura 2.3 – fase 6), (ALTO; Correia, 2004; PULTREX; STRONGWELL).

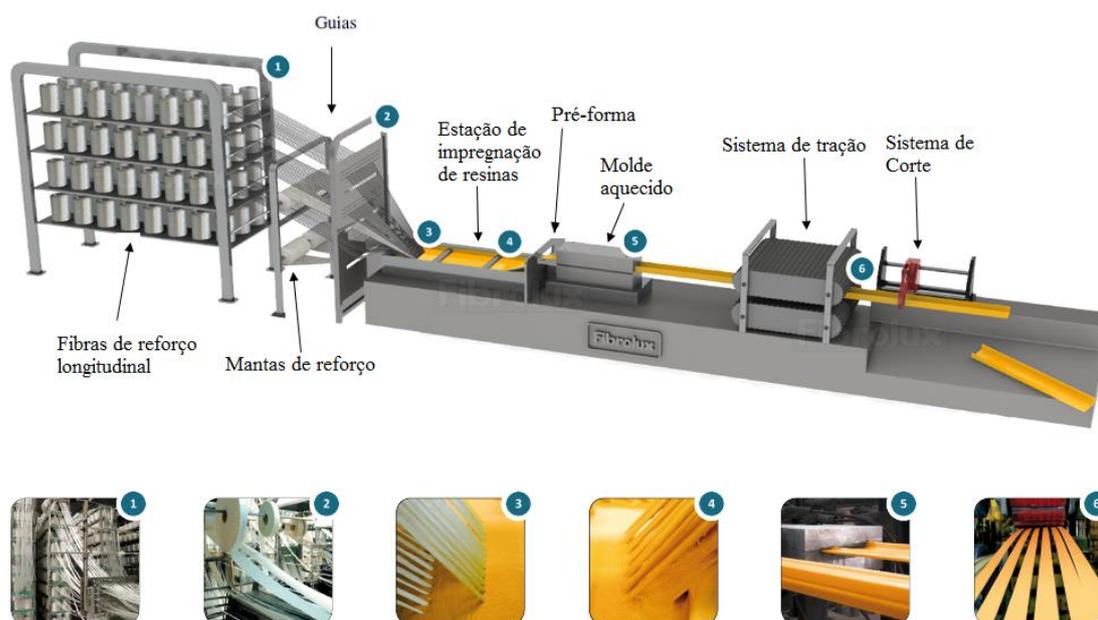


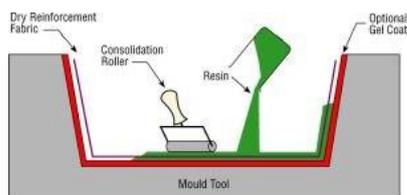
Figura 2.3 - Esquema tipo do processo da pultrusão tradicional. Destaque para o sistema de manuseamento das fibras, o sistema de guias para pré-formar e posicionar os reforços, a zona de impregnação de resina, o molde aquecido, o sistema de tração e o sistema de corte (adaptado de (Fibrolux)).

Geralmente, é possível produzir uma secção transversal corrente a uma velocidade de 2m/min enquanto que para um painel de laje pré-fabricado a velocidade é de aproximadamente 20m²/min, (Barbero, 2010) citado por (Correia, 2004).

A continuidade do processo de pultrusão apresenta vantagens inerentes à sua eficiência e controlo: podem ser produzidos perfis/painéis de qualquer comprimento, residindo a limitação apenas no seu transporte; os materiais pultrudidos são excepcionalmente resistentes, leves, robustos e com elevada durabilidade; e os perfis podem ser produzidos com diferentes cores, tamanhos e forma. Assim, estes materiais podem mostrar-se mais rentáveis do que as soluções correntes, apesar de apresentarem preços mais elevados, (ALTO).

ii. Moldagem manual (*hand lay-up*) e compressão por vácuo (*Vacuum Bagging*)

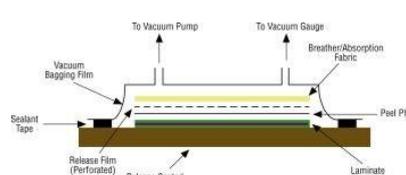
A moldagem manual (Figura 2.4a.1 e a.2) é essencialmente usada na produção de painéis sanduíche compósitos e de materiais compósitos e consiste na deposição manual e alternada de camadas de fibras de reforço e matriz polimérica que cura formando um material compósito. O processo de aplicação das sucessivas camadas é repetido o número de vezes necessário para que a lâmina adquira a espessura pretendida. No final é aplicada pressão com um rolo de compactação para melhorar a impregnação e retirar o ar. Após a construção das camadas, o material do núcleo é colado às lâminas com resina e pressionado de modo a formar a estrutura sanduíche. O painel terá a forma e as dimensões do molde ou superfície em que é aplicado (Barbosa, 2014). A cura ocorre em ambiente controlado e o processo depende do operador. Para complementar e melhorar o processo de cura, podem utilizar-se temperaturas elevadas, pressão e vácuo, nomeadamente a compressão por vácuo ou *Vacuum Bagging* (Figura 2.4b.1 e b.2). Neste caso, o produto é introduzido dentro de uma película plástica selada, à qual está associada uma bomba de vácuo que extrai o ar e consolida a estrutura, garantindo uma muito boa impregnação das fibras de reforço (Barbero, 2010; Lecture 5.4: Hand Lay-up and Spray Lay-up).



(a.1)



(a.2)



(b.1)



(b.2)

Figura 2.4 - (a.1) Esquema do método da moldagem manual e (a.2) respectiva produção de um painel sanduíche; (b.1) esquema do método “vacuum bagging” e (b.2) respectiva produção de uma prancha de surf (a.1 e b.1 (Cripps); a.2 e b.2 (Sena-Cruz, 2015)).

iii. Pulverização

O processo de pulverização (Figura 2.5) é idêntico ao da moldagem manual, contudo neste método é utilizado um pulverizador de resina pressurizada e fibra de reforço na forma de fibras cortadas. Geralmente é utilizado o *roving* de vidro que é cortado através de um mecanismo que o pulverizador contém. Os materiais podem ser pulverizados simultânea ou separadamente. Normalmente, é pulverizado um gel sobre a superfície do molde para facilitar a remoção do produto. Após a pulverização de fibra e matriz, passa-se um rolo para eliminar o ar das camadas. Segue-se o processo de cura que pode ocorrer quer à temperatura ambiente, quer a temperaturas elevadas. Após a cura, o molde é aberto e o material compósito é retirado e posteriormente processado para fazer o painel. Entre os laminados pode inserir-se o material do núcleo (madeira, espuma, outro qualquer) que fica contido entre as duas camadas que foram pulverizadas. O produto é retirado do molde após o processo de cura.

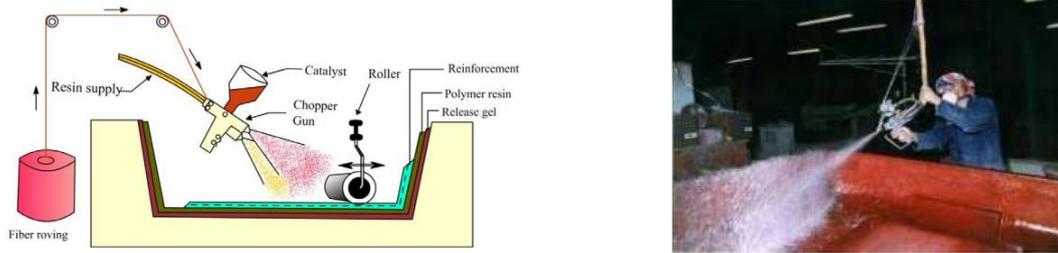


Figura 2.5 - Esquema do método de pulverização e respetiva aplicação (Lecture 5.4: Hand Lay-up and Spray Lay-up; Sena-Cruz, 2015).

iv. Moldagem por transferência de resina (RTM) e moldagem por transferência de resina sob vácuo (VARTM)

A RTM (Figura 2.6a) é mais usada para produzir as peças compósitas que compõem o painel. Este método consiste em utilizar dois moldes sobrepostos com entradas para introduzir a resina e saídas para o ar. O material é colocado entre os moldes e a resina é injetada sob pressão, embebendo o material e preenchendo o molde. Posteriormente, interrompe-se o fornecimento de resina, as entradas e saídas são fechadas e aplica-se calor para curar a resina. Com o material curado, o molde é removido. Mais uma vez, a cura pode ser feita à temperatura ambiente ou a temperaturas mais elevadas. Caso se aplica vácuo para aumentar a compactação do processo e melhorar as características do mesmo, o processo designa-se por moldagem por transferência de resina sob vácuo (VARTM) (Figura 2.6b), (Barbero, 2010).

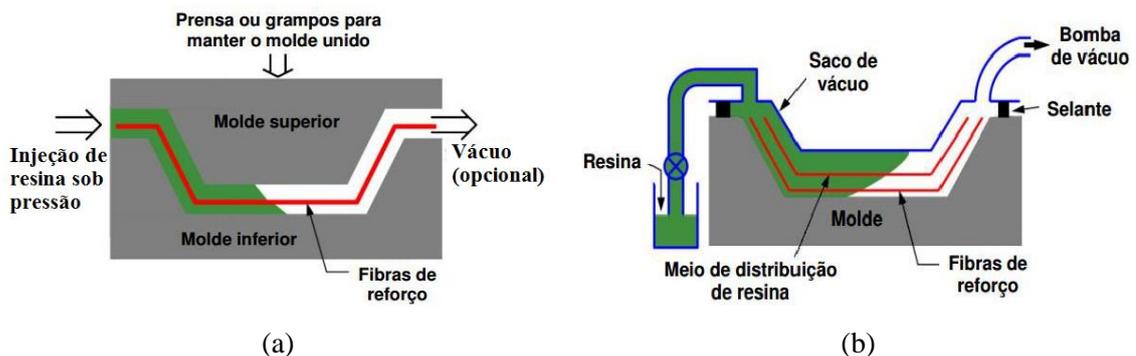


Figura 2.6 - Métodos (a) RTM e (b) VARTM (adaptado de (Song, 2003)).

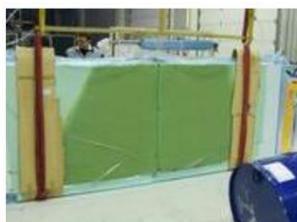
v. Infusão a vácuo

Este é um processo inovador (Figura 2.7), muitas vezes mais eficiente e rentável do que os supracitados, que é usado na produção de painéis sanduíche. Todos os materiais (fibras,

espumas, tecido) são colocados secos num molde já pronto e envolvido numa bolsa plástica de vácuo. Quando a bomba de vácuo é acionada, o ar sai do plástico e a resina é transferida através de mangueiras para dentro das camadas de fibra devido ao diferencial de pressões (Nasseh, 2014). A resina de impregnação garante a ligação coesa com o núcleo obrigatoriamente pré-fabricado. Este método permite reduzir até 50% o tempo nos ciclos de moldagem, e 30% nos custos de mão-de-obra, face às técnicas tradicionais (como a moldagem manual) (DIAB). Os laminados produzidos são mais resistentes do que os fabricados manualmente visto que a impregnação das fibras atinge os 60% do teor de fibra, por oposição aos 20 a 30% obtidos com a moldagem manual. Além disso, não há desperdício de material nem contato direto entre a resina e o operário, (Nasseh, 2014).



(a)



(b.2)



(b.2)

Figura 2.7 - (a) Processo de infusão a vácuo no casco de um navio (DIAB) e (b) Processo de infusão a vácuo na produção de lâminas (Barbosa, 2014).

2.2.3 Evolução, aplicação e desenvolvimento dos painéis sanduíche na Engenharia

Historicamente, o conceito sanduíche foi introduzido por Frenchman, Duleau em 1820, e mais tarde por Fairbain, em Inglaterra (1849), decorrendo cerca de 100 anos até à sua aplicação comercial (Zenkert, 2005). Todavia, existem relatos de que a construção em sanduíche já teria sido abordada por diversos engenheiros em períodos históricos anteriores, citando-se como exemplo os trabalhos de Leonardo da Vinci (1452-1519) (Bank, 2006). Entre 1849 e meados de 1960, a tecnologia sanduíche foi desenvolvida e extensamente aplicada principalmente para fins aeroespaciais e aeronáuticos, nomeadamente em aviões de combate utilizados na Primeira e Segunda Guerras Mundiais (Zenkert, 2005). O seu êxito deveu-se em muito ao desenvolvimento e sucesso na produção dos adesivos estruturais (Peters, 1998) e ao desenvolvimento da indústria dos plásticos e das fibras que introduziram os compósitos de origem polimérica ou FRP, constituídos essencialmente por fibras e matriz polimérica, na

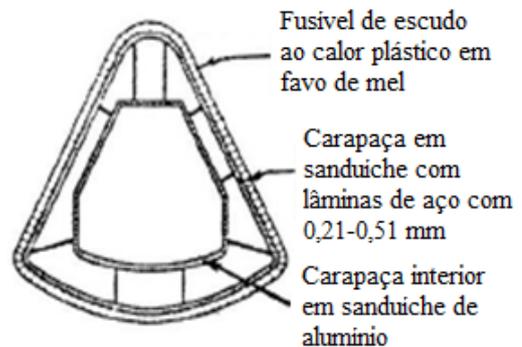
indústria. De 1940-1950, o bombardeiro inglês da Segunda Guerra Mundial De Havilland DH-98 “Mosquito” (Figura 2.8a) é frequentemente citado como sendo a primeira grande aplicação do princípio sanduíche, embora tenham existido outras aplicações menos espetaculares. A fuselagem deste avião era composta por uma estrutura sanduíche com faces em folha de madeira (*birch plywood*) e um núcleo em balsa de madeira colado por uma resina fenólica (Thomsen *et al.*, 2006). Nessa mesma altura (1943), surge nos Estados Unidos da América o avião Vultee BT-15. A fuselagem era composta por faces em poliéster reforçadas com fibra de vidro e núcleo em favo de mel tecido em fibra de vidro e balsa, (Davies, 2001; Thomsen *et al.*, 2006).

Durante e após 1960, o conceito sanduíche começou a disseminar-se pela indústria da construção, alimentar, automóvel, ferroviária, naval e petrolífera (Thomsen *et al.*, 2006).

Em 1969, apesar do foco recair sobre a tecnologia dos foguetões e informática, o sucesso da aterragem da nave espacial Apollo na lua deveu-se também à construção sanduíche. Esta permitiu construir uma cápsula suficientemente leve, rígida e resistente, capaz de suportar as tensões relativas à aceleração de descolagem e aterragem, (Davies, 2001; Thomsen *et al.*, 2006).



(a)



(b)

Figura 2.8 - (a) “Mosquito” (Compósitos, 2012) e (b) cápsula da nave *Apollo* com duas carapaças sanduíche interligadas (Davies, 2001).

Devido ao crescente desenvolvimento da indústria dos plásticos e das fibras e ao seu elevado potencial, as estruturas sanduíche têm ganho cada vez mais preponderância. Exemplo disso é a aplicação em contentores de cargas, abrigos de emergência, pranchas de surf, câmaras frigoríficas, turbinas eólicas, carruagens de comboios, entre outros. No caso da Engenharia

Civil, tem-se assistido a uma utilização crescente de painéis sanduíche compósitos para distintos fins (Almeida, 2009).

No setor da construção, os painéis sanduíche começaram por ter aplicações não estruturais ou semiestruturais. Nesse contexto têm sido desenvolvidas (i) quer para aplicações não estruturais - revestimentos (Shawkat *et al.*, 2008), fachadas (Sharaf e Fam, 2008) (Fam e Sharaf, 2010), coberturas (Keller *et al.*, 2008a) (Keller *et al.*, 2008b) e paredes (Keller *et al.*, 2004); (ii) quer para aplicações estruturais - tabuleiros de pontes pedonais (Davalos *et al.*, 2001) e rodoviárias (Freitas *et al.*, 2010). Todavia, devido às suas vantagens e desenvolvimento e ao emprego de novos materiais no setor da construção tem-se notado um crescente interesse na aplicação deste tipo de compósito na reabilitação estrutural.

Aplicações estruturais dos painéis sanduíche

Segundo Garrido (2016), dependendo do tipo de estrutura, os painéis podem ser inseridos em duas categorias: (i) painéis sanduíche pesados compostos por faces em aço e núcleo polimérico sólido, e (ii) painéis sanduíche leves compostos por faces em FRP e núcleos de baixa densidade. Deste modo, o painel sanduíche híbrido em desenvolvimento integra uma nova geração de painéis sanduíche (iii). No entanto, realça-se, que até à data, os painéis sanduíche mais desenvolvidos e aplicados são os que contêm materiais compósitos (FRP's). Deste modo, o uso de painéis sanduíche híbridos compósitos em aplicações comerciais é inexistente/escasso. Os exemplos que se seguem comprovam o potencial que a estrutura sanduíche possui para Engenharia Civil.

No âmbito dos projetos de investigação “Clickhouse” e “LEGOUSE”, da qual fez parte a Universidade do Minho, desenvolveu-se um protótipo de habitação de emergência em materiais compósitos (Figura 2.9) e um edifício pré-fabricado de custos controlados em estrutura sanduíche (Figura 2.10), respetivamente.



Figura 2.9 - “Clickhouse”: painéis sanduíche compostos por lâminas em GFRP e núcleo em PUR. Estes foram utilizados para piso, parede e teto e foram produzidos por moldagem manual. Vãos até 3 m e sobrecarga de 1.6 kN/m².



Figura 2.10 - “Legouse”: estrutura sanduíche (piso, parede e teto) composta por faces em betão autocompactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) e um núcleo em poliestireno expandidos (EPS), contendo ainda conetores em GFRP a ligar as duas camadas. Conseguiu-se atingir vãos de 8 m.

A empresa As Composit Inc desenvolveu uma habitação formada por painéis sanduíche compósitos (Figura 2.11). As lâminas são em GFRP e o núcleo em poliestireno expandido (AS COMPOSITE INC). Um outro exemplo a destacar é a “Solatrium House” (Figura 2.12) desenvolvida para a competição Solar Decathlon China 2013, cujo principal foco era o desenvolvimento de uma casa eficiente e sustentável. Uma vez que a solução foi desenvolvida e inicialmente montada em Worcester (USA), e posteriormente desmontada, transportada e novamente montada na China, onde decorreu a competição, esta tinha de responder às especificidades climáticas de ambos os locais. Com esse objetivo, foram utilizados perfis FRP e painéis sanduíche compósitos compostos por faces em GFRP e núcleo em espuma PIR (*Polyisocyanurate*), designados por TRANSONITE®, utilizados para o piso, paredes e cobertura, (Parys e Tassignon, 2013).



Figura 2.11 - Habitação desenvolvida pela As Composit Inc (AS COMPOSITE INC).



Figura 2.12 - Solatrium House (2013) (horizon).

Destaca-se também a habitação contruída com painéis sanduíche compósitos na Alemanha em 2016 (Steve, 2016). Outro exemplo é o edifício da entrada do Campus da empresa Novartis (Figura 2.13), em Basileia (Suíça) (2006) que contempla uma cobertura estrutural pré-fabricada em painel sanduíche compósito com dupla curvatura. As faces são em GFRP e o núcleo em poliuretano com inércia variável. Este novo conceito permitiu que a estrutura envolvente pudesse ser em vidro. Os painéis foram pré-fabricados num local especializado e depois transportados para a obra.



Figura 2.13 - Instalação do painel compósito da cobertura e aspeto final do edifício (CCLAB).

Por vezes, quando as condições de acesso por estrada são complicadas é necessário proceder ao transporte por via aérea ou marítima (Figura 2.14), (Gurit, 2011).



Figura 2.14 - Transporte aéreo e instalação de painel sanduíche compósito pré-fabricado com 21 m × 6 m. As faces deste painel são em GFRP e o núcleo em tereftalato de polietileno (PET) perfazem uma estrutura fina e leve, mas forte e resistente às variações extremas de temperatura (Suíça, 2011) (Gurit, 2011).

Na Figura 2.15 apresenta-se a ponte *Bex* sobre o rio *Avançon* (Suíça), contruída em 2012. O tabuleiro da ponte, em betão armado, foi substituído por um tabuleiro em estrutura sanduíche (285 mm de espessura) composta por faces em GFRP e núcleo em madeira de balsa, que foi

colada às duas vigas longarinas em aço. A construção foi efetuada na margem, tendo sido posteriormente colocada na posição final. Esta solução permitiu aumentar a capacidade de carga da ponte, aumentar a sua durabilidade e reduzir o tempo a que a mesma esteve interdita (apenas 10 dias). Sébastien Lavanchy (engenheiro projetista principal) afirma que, apesar da espessura total ser semelhante a uma solução tradicional, o peso é significativamente menor (160 kg/m^2 contra 700 kg/m^2 da solução em betão) e que a solução compósita pode ser mais económica tendo em conta o peso, a durabilidade e a longevidade, (Flynn, 2013).



Figura 2.15 - Ponte sobre o rio *Avançon* (vão com 11.4 m) (Flynn, 2013).

Recentemente tem-se verificado a aplicação em grande escala das estruturas sanduíche em infraestruturas e edifícios imponentes, tal como mostra a Figura 2.16 e Figura 2.17.



Figura 2.16 - A Makkah clock tower, torre central do Abraj-al Bait (Makkah, KSA). Edifício com 607 m em que os últimos 200 m contém mais de 40000 m^2 de painéis sanduíche compósitos e FRP, incluindo o maior relógio do mundo (com 47 m de diâmetro) (Gurit, 2012).



Figura 2.17 - Cobertura da estação Haramain High Speed Rail. O telhado é estruturalmente composto por uma estrutura compósita com faces em GFRP e núcleo em PET. Os vãos possuem até 9 m e cobrem 160000 m^2 (Gurit, 2013).

Os painéis sanduíche compósitos têm sido muito usados no setor da Engenharia Civil, como elemento de elevado valor arquitetónico e como elemento de foro estrutural. Como se aferiu,

contrariamente aos painéis sanduíche compósitos, os painéis sanduíche híbridos ainda não possuem aplicação comercial relevante. Assim sendo, é muito usual encontrar soluções cujo painel sanduíche compósito é constituído por faces em GFRP e núcleo em PUR. Contudo, apesar das inúmeras vantagens, este tipo de painel é dificilmente compatível com o uso estrutural a que os pisos de edifícios (lajes) têm de responder (vãos e cargas correntes), pelo que os painéis sanduíche não se encontram entre as aplicações mais correntes para piso estrutural, (Garrido, 2016). Face a isso, nos últimos anos, têm sido desenvolvidas investigações experimentais e analíticas com o objetivo de contornar essa tendência. Tal como se verá, as investigações desenvolvidas centram-se em aperfeiçoar e otimizar as soluções de painel sanduíche compósito, em melhorar os métodos de fabrico e no desenvolvimento de novas estruturas compósitas híbridas, como por exemplo o painel sanduíche híbrido.

Painéis sanduíche híbridos

Ao longo dos anos têm sido estudados e desenvolvidos vários tipos de elementos estruturais híbridos que contêm FRP e matriz cimentícia (p.e.: o betão e as suas variantes) com o objetivo de substituir o betão armado como principal elemento estrutural (Chen e El-Hacha, 2011).

Norton (2004) propôs um painel sanduíche híbrido composto por duas faces tecidas em fibra de vidro (*E-glass*), um núcleo em madeira de balsa com (e sem) treliças em malha de GFRP e uma camada de betão, para um tabuleiro de ponte. Cada face de GFRP é formada por dois tecidos ortogonais que foram ligados por fibras na direção perpendicular formando um material GFRP 3D, em toda a secção. No núcleo, a balsa foi introduzida entre as treliças de malha em GFRP para manter a configuração da secção durante o processo de VARTM, onde se usou uma resina epóxi. Por último, a camada superior foi rematada com uma camada de betão. Com o objetivo de ligar a camada superior de GFRP à de betão foram usados conetores compósitos e em aço. Na Figura 2.18, encontram-se os painéis tipo testados (sem o betão), assim como os conetores desenvolvidos pelo autor, Norton (2004).

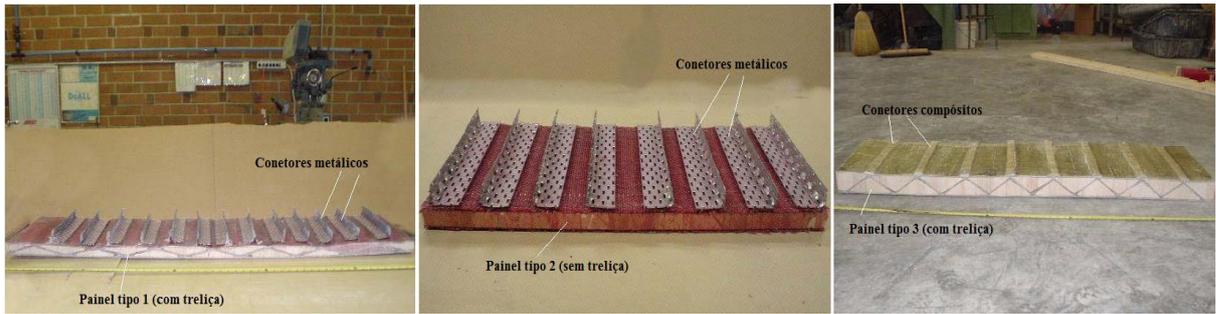


Figura 2.18 - Painel tipo 1 com treliça no núcleo e conectores metálicos (esquerda); painel tipo 2 sem treliça no núcleo e com conectores metálicos (centro); painel tipo 3 com treliça no núcleo e com o dobro da espessura do tipo 1 e com conectores compostos (direita). O painel tipo 4 resulta da metade não danificada do ensaio do painel tipo 3 (adaptado de (Norton, 2004)).

Na Figura 2.19 apresentam-se os modos de rotura dos painéis híbridos que foram estudados. De um modo, geral, verificou-se que a ligação entre o betão e o GFRP era insuficiente (Norton, 2004). Os autores propõem que se deixe a superfície de GFRP rugosa ou que se use um adesivo de modo a aumentar a conexão entre o betão e a camada superior de GFRP, (Norton, 2004).

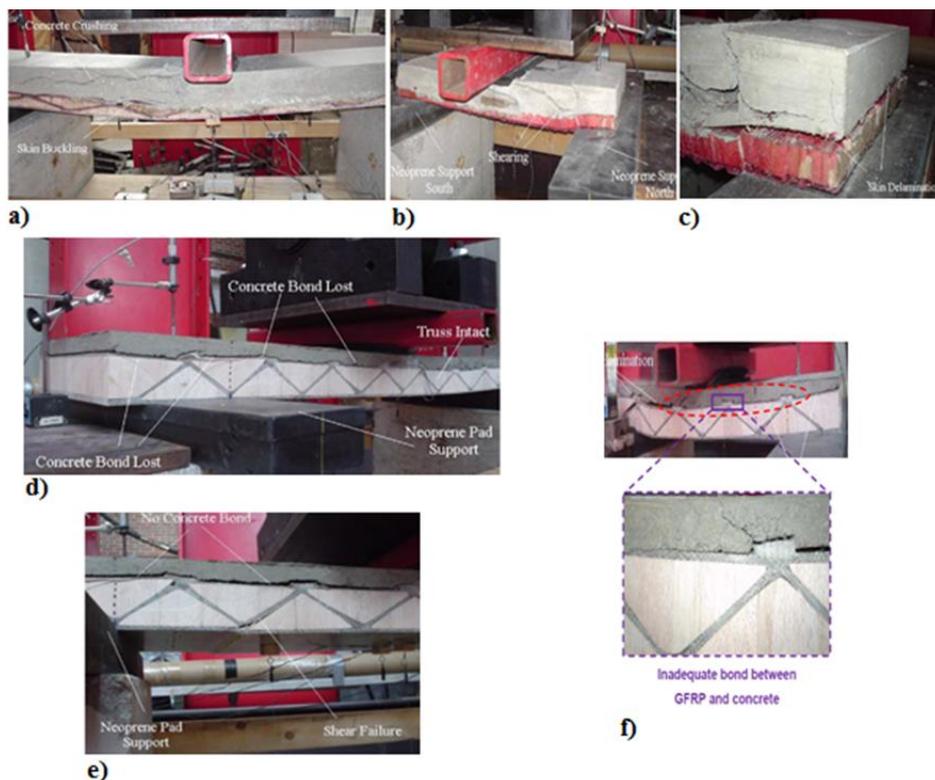


Figura 2.19 - Modos de rotura: (a) rotura do painel tipo 1 - fendilhação do betão e encurvadura local da face de GFRP; (b) rotura do painel tipo 2 - fenda de corte no betão; (c) pormenor junto ao apoio do painel tipo 2 - delaminação da face superior do núcleo; (d) perda da ligação entre o betão e treliça aos 77.84 kN no painel tipo 3; (e) rotura de corte no composto após perder a ligação com o betão no painel tipo 3 e (f) rotura da ligação GFRP-betão e delaminação do betão no painel tipo 4 (adaptado de (Norton, 2004)).

Keller *et al.* (2007) apresentaram um painel híbrido (Figura 2.20 e Figura 2.21), também para um tabuleiro de ponte, composto por uma camada inferior com nervuras tipo “T” em GFRP pultrudido, uma camada de betão leve (LC) como núcleo e uma camada de betão de elevado desempenho reforçado com fibra (UHPFRC) para a camada de compressão. O projeto da viga mostrou que não seria necessário utilizar a camada de UHPFRC, tendo sido usada para a viga experimental uma camada de betão normal (NC). A solução é 50% mais leve do que a solução em betão.

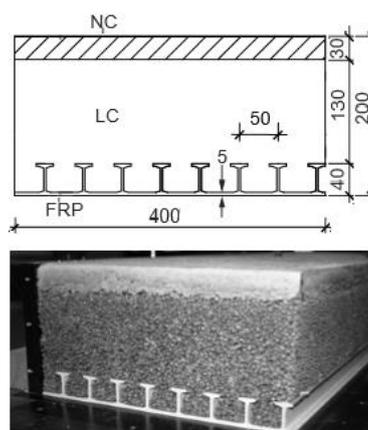
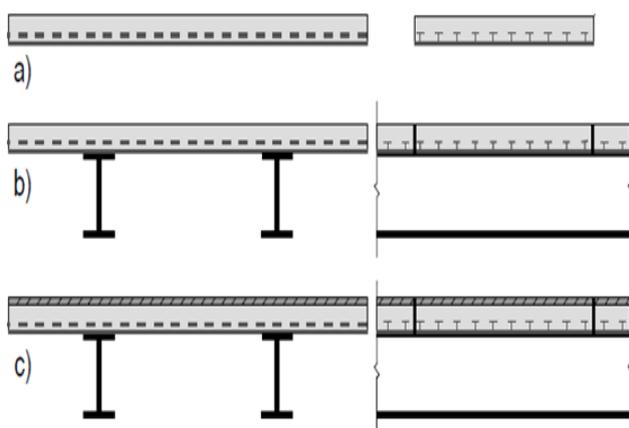


Figura 2.20 - Composição e instalação do tabuleiro: (a) Painel FRP/LC pré-fabricado; (b) Painel FRP/LC conectado às vigas e (c) colocação da UHPFRC (Keller *et al.*, 2007).

Figura 2.21 - Secção híbrida da viga ensaiada (adaptado de (Keller *et al.*, 2007)).

Foram ensaiadas à flexão 8 vigas ($3600 \times 400 \times 200 \text{ mm}^3$), tendo sido testados dois tipos de interface GFRP/núcleo: (i) uma sem ligação adesiva e outra com (ii) ligação adesiva epoxídica. Independentemente do tipo de ligação, o núcleo apresentou rotura por esforço transversal. O segundo caso revelou-se o mais eficiente, verificando-se o aumento da capacidade de carga (104% em média) e uma rotura frágil. Nas vigas sem ligação epoxídica, verificou-se um deslocamento prematuro na interface GFRP-núcleo, tendo ocorrido uma rotura dúctil, (Keller *et al.*, 2007).

Johnson *et al.* (2006) (Figura 2.22) estudaram o comportamento de um recente e inovador tabuleiro para pontes em que as lâminas de GFRP foram produzidas através de um processo de tecelagem 3-D. Estas consistem em dois tecidos ortogonais que foram cosidos juntos por fibras na direção perpendicular de modo a formar o material GFRP 3D. O painel possui núcleo de balsa e foi produzido por infusão a vácuo onde foi usado um epóxi. Também foi estudado

um tabuleiro apenas em GFRP. Foram fabricados e testados 5 painéis à flexão e estudadas diversas configurações de conectores GFRP/betão. Concluiu-se que: (i) o uso do processo de tecelagem 3D elimina a delaminação da fibra que é observada nos tabuleiros em GFRP; (ii) a ligação GFRP/betão é inadequada, devendo-se usar uma interface rugosa; (iii) demonstrou-se que o comportamento dos painéis híbridos é adequado de acordo com AASHTO. Os painéis em apenas GFRP tinham cerca de 50% da rigidez e do peso dos painéis híbridos; e (iv) os conectores de corte mais eficazes foram os verticais, (Johnson *et al.*, 2006).

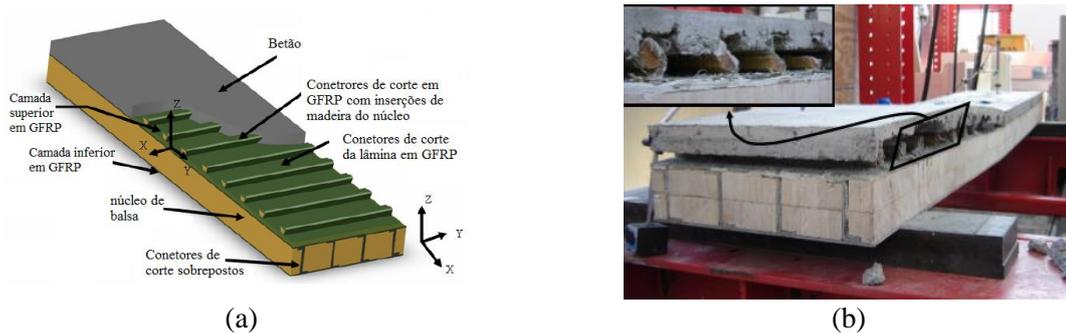


Figura 2.22 - (a) Esquema do painel híbrido e (b) delaminação na interface GFRP/betão (adaptado de (Johnson *et al.*, 2006)).

Liu *et al.* (2011) propuseram um painel híbrido para pontes composto por uma camada inferior corrugada em GFRP pultrudido com nervuras em “T”, que resiste aos esforços de tração, e por uma camada superior em betão armado para resistir essencialmente às compressões (Figura 2.23). Foram ensaiados 6 painéis com um vão de 3 m. Os autores estudaram o comportamento à flexão considerando a influência da armadura penetrante (com e sem) e o tratamento da interface GFRP-betão (com e sem revestimento de areia).

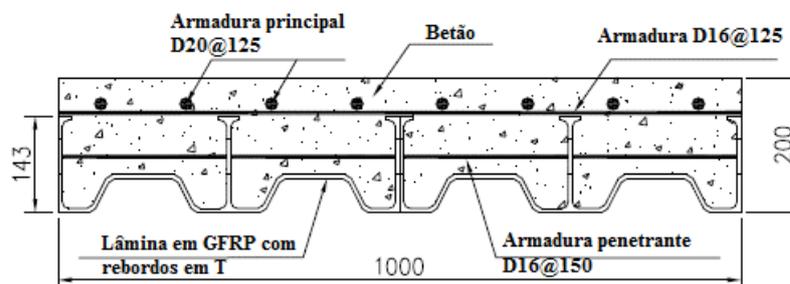


Figura 2.23 - Secção transversal do painel proposto e ensaiado. As dimensões encontram-se em milímetros (adaptado de (Liu *et al.*, 2011)).

Verificaram-se dois modos de rotura: (i) os painéis sem tratamento na interface apresentam um deslizamento em ambas as extremidades, e fendas a meio vão e de corte, (ii) os painéis com tratamento da interface não apresentaram deslizamento entre a camada de GFRP e betão para a carga última. A camada superior de betão esmagou para a carga última e observou-se uma fenda diagonal entre o ponto de carga e o de apoio. Observou-se também a rotura de compressão de corte. Os autores concluíram que: (i) o tratamento da interface influencia a conexão entre as camadas e o comportamento à flexão do painel; (ii) o uso de armaduras penetrantes aumentou em pouco a rigidez e a resistência do painel; (iii) o tratamento da interface aumento a resistência e a rigidez de flexão do painel, sendo o fator com mais influência; (iv) o tratamento da interface faz com que o eixo neutro não altere significativamente com o aumento da carga. Quando não se efetuou o tratamento da interface, o eixo neutro baixa com o aumento de carga devido à perda de rigidez e ao deslizamento entre as camadas, (Liu *et al.*, 2011).



Figura 2.24 - Modo de rotura no painel sem tratamento da interface e pormenor do deslizamento entre as componentes de GFRP e betão (adaptado de (Liu *et al.*, 2011)).



Figura 2.25 - Modo de rotura no painel com tratamento da interface e pormenor do deslizamento entre as componentes de GFRP e betão (adaptado de (Liu *et al.*, 2011)).

Entre 2013 e 2016, no projeto de cariz científico “RehabGFRP”, que contou com a participação da Universidade do Minho e a Universidade de Lisboa, desenvolveram-se dois tipos de painéis sanduíche distintos: (i) painéis compostos exclusivamente por lâminas em GFRP e diferentes núcleos (PUR, PET e balsa), incluindo nalguns casos nervuras com o objetivo de melhorar a ligação entre as lâminas e o núcleo e aumentar a resistência ao corte deste último, destacando-se o trabalho desenvolvido por Garrido (2016); e (ii) painéis híbridos, constituídos por uma camada inferior de tração e nervuras em GFRP, núcleo em PUR e por uma camada de compressão numa argamassa reforçada com fibras de ultraelevada ductilidade (na sigla inglesa, UDFRM). Neste último (Figura 2.26), destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Mastali entre 2013 e 2016. No âmbito deste projeto foram propostas soluções de colagem entre painéis e mecânicas entre painéis e entre o painel e o suporte. O painel híbrido foi fabricado por

VARTM e o painel sanduíche compósito por infusão a vácuo, (Garrido, 2016; Mastali *et al.*, 2014).

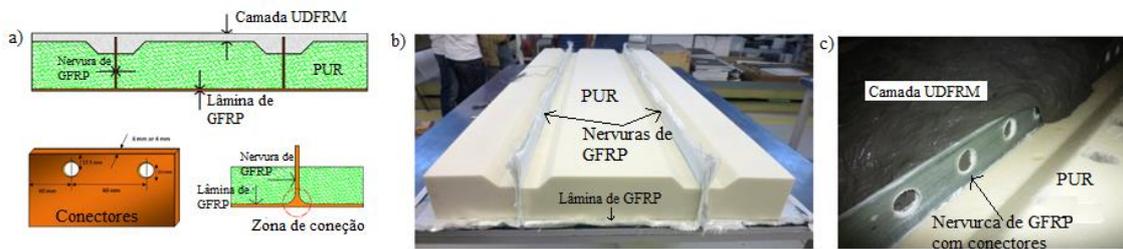


Figura 2.26 - Painel Sanduíche híbrido GFRP/UDFRM: (a) Esquema tipo e (b - c) Painel em produção (adaptado de (Mastali *et al.*, 2015)).

De modo a auxiliar a otimização do painel, Mastali (2014) fez uma série de estudos paramétricos com base em simulações numéricas (FEM). Nesse estudo alargado foi estudada a influência de parâmetros como: (i) dimensões geométricas, (ii) propriedades dos materiais, (iii) comportamento lineares e não lineares para a camada de argamassa, assim como (iv) a isotropia e ortotropia dos materiais em GFRP. De um modo geral concluiu que:

- i. O aumento da espessura de argamassa provoca uma diminuição das tensões de compressão nessa mesma camada e uma diminuição da deformação global da laje, verificando-se o aumento da capacidade de carga da mesma. Por outro lado, as tensões de tração tendem a aumentar na camada inferior de GFRP e nas nervuras. Devido à excessiva fendilhação a camada de argamassa deve ter no mínimo 10 mm;
- ii. O aumento de espessura da camada de UDFRM reduz a máxima largura de fendas;
- iii. O aumento da camada inferior de 2 mm para 8 mm reduz em 50% a deformação global máxima da laje;
- iv. A espessura das nervuras GFRP é o parâmetro que mais influencia a capacidade de carga do painel e a espessura das camadas inferior e superior são os seguintes parâmetros com maior influência;
- v. O aumento da altura total da laje incrementa a sua capacidade de carga, tornando-a mais vulnerável a fenómenos de instabilidade nas nervuras. A laje híbrida deve ter pelo menos 100 mm de espessura;
- vi. Recomenda-se o uso de leis de interface para simular o contato entre os materiais para obter uma simulação numérica mais precisa comparativamente aos resultados laboratoriais.

Após o trabalho numérico, foram construídas e ensaiadas duas lajes à flexão. Durante o ensaio, o autor observou uma sequência de danos antes da rotura, tal como é visível na Figura 2.27. Refere-se ainda que a lâmina em GFRP não sofreu danos severos, não havendo sinais de rotura ou perda de conexão com as nervuras. O estudo indica que o processo de produção dos painéis (VARTM) é muito eficiente, permitindo obter um comportamento de rotura pseudo-dúctil. Contudo, apesar do bom funcionamento estrutural, o custo de fabrico foi elevado e o rigor geométrico dos painéis reduzido, dificultando as ligações entre painel, (Mastali *et al.*, 2015).



Figura 2.27 - Sequência de danos observada durante o ensaio do painel sanduíche híbrido proposto (adaptado de (Mastali *et al.*, 2015)).

Após os ensaios cíclicos da laje à flexão, foi observado que: (i) as lajes apresentam uma resposta força-deslocamento a meio vão quase linear até à carga máxima, (ii) até à flecha correspondente ao SLS ($L/250$) não se verificaram danos relevantes, (iii) as não linearidades na resposta devem-se ao dano que ocorreu na ligação entre as nervuras de GFRP e a camada de argamassa e à fenda no alinhamento da nervura, (iv) os níveis máximos de tensão nos componentes de GFRP foram muito menores que a tensão última determinadas nos testes para o material, (v) os painéis apresentam uma boa capacidade de carga para os fins propostos. O painel em questão pesa apenas 1 kN/m^2 , que corresponde a cerca de $1/3$ de uma solução tradicional, (Mastali *et al.*, 2015).

Paralelamente ao trabalho de Mastali, destaca-se o estudo efetuado por Machado (2015) ao nível dos conectores, de modo a otimizar a ligação entre as camadas do painel híbrido supracitado. Este estudou três tipologias de conectores que garantem a ligação entre as nervuras de GFRP e a argamassa: liso, perfurado e indentedo (Figura 2.28).

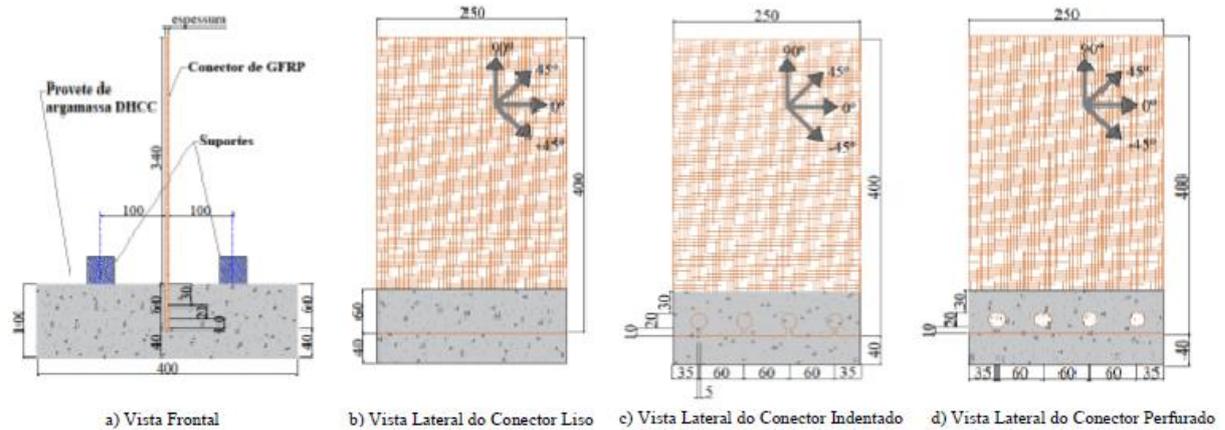


Figura 2.28 - Esquema dos conectores para o ensaio de tipo pull-out (adaptado de (Machado, 2015)).

Segundo Machado (2015) os provetes apresentam rigidez iniciais semelhantes entre si e elevadas, nas várias tipologias de provetes testadas. Após ser atingida a carga máxima segue-se uma fase de comportamento dúctil, onde se desenvolve deformação com reduzida perda de carga. Os conectores perfurados em GFRP, com espessura de 6 mm, obtiveram o melhor registo de carga máxima e também apresentam os valores de índice de ductilidade mais elevados. Pelo contrário, os conectores lisos em GFRP, com espessura de 4 mm, foram os que registaram os menores valores de carga máxima e de índice de ductilidade. Verificou-se que existe elevada variabilidade nos valores registados relativos aos vários parâmetros estudados. De um modo geral, nos provetes testados não foi visível a rotura da ligação entre o provete de argamassa e o conector GFRP, tendo o escorregamento entre os materiais provocado a separação total das peças a ligar. Nenhum conector de GFRP atingiu uma rotura associada ao próprio material e estes apenas apresentam marcas decorrentes do movimento relativo entre a argamassa e o conector, provocadas no decorrer dos ensaios de tipo pull-out efetuados, (Machado, 2015).

De um modo geral, a revisão bibliográfica mostra que a conexão FRP/betão desempenha uma função muito importante para que haja um bom desempenho do painel. Como esperado, a estrutura híbrida possui uma capacidade de carga superior à dos seus constituintes, dependendo significativamente da orientação das fibras e do processo de fabrico, (Chen e El-Hacha, 2011).

Apesar do foco ter recaído nos painéis híbridos, importa destacar o trabalho desenvolvido no âmbito dos painéis sanduíche compósitos. Nesse sentido, entre outros, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Steeves e Fleck (2004); Reis (2005); Russo e Zuccarello (2007); Reis e Rizkalla (2008); Zi *et al.*, (2008); Dawood *et al.* (2010); Fam and Sharaf (2010); Sopal *et al.*, (2012); Wang *et al.*, (2014); Shams *et al.*, (2014) e Garrido (2016).

2.3 FRP, PUR e argamassa de elevado desempenho

2.3.1 Polímeros reforçados com fibras ou FRP

Nos últimos anos, os custos associados à reabilitação, reparação e manutenção de estruturas, estruturais ou não, construídas em materiais tradicionais, tais como betão, aço e betão armado, têm vindo a aumentar significativamente. Por esse motivo, associado à limitação desses materiais anteriormente referidas e à crescente exigência da indústria, tem-se verificado um grande desenvolvimento de novos materiais compósitos, (Mendes *et al.*,2011).

Apesar do conceito de material compósito existir desde a antiguidade – o reforço de tijolos de terra com palha seca está descrito desde meados de 5000 a.C. (Barbosa, 2014) –, só no século XX, com a evolução dos materiais, nomeadamente da indústria dos plásticos e das fibras, surgiu a ideia de criar um compósito constituído por fibra e matriz polimérica: os FRP's. Estes foram utilizados pela primeira vez em 1930 (Correia, 2004) para a construção do casco de um barco, no âmbito de um projeto experimental. Desde essa data, estes materiais têm vindo a ser desenvolvidos e utilizados nas indústrias aeroespacial, naval, petrolífera, química, automóvel, de tratamento de água, da pasta do papel e estações elétricas. A crise energética, em 1980, forçou a indústria dos compósitos a reduzir os preços e a desenvolver métodos de produção mais eficientes, permitindo a utilização dos mesmos nos setores de desporto e lazer e na área da construção (Barbero, 2010), onde são utilizados em varões e cabos de pré-esforço para o reforço interior de estruturas de betão, laminados e mantas para o reforço exterior de estruturas de betão, cabos para pontes suspensas, perfis estruturais, painéis de laje pré-fabricados, existindo mesmo estruturas totalmente compósitas (pontes), (Thomsen *et al.*, 2006).

Das diversas vantagens dos FRP's destacam-se a elevada resistência mecânica, a reduzida densidade, a condutibilidade térmica, a elevada durabilidade em ambientes agrestes e a reduzida

necessidade de manutenção. Contudo, como fatores limitativos estes apresentam um comportamento frágil e um reduzido módulo de elasticidade, sobretudo quando se trata do reforço com fibra de vidro, que é o principal material utilizado como reforço em materiais compósitos para aplicações estruturais, (Correia, 2004). Apesar dos materiais FRP apresentarem um custo superior aos tradicionais, é importante realçar que este tipo de material pode ser particularmente interessante para certas aplicações como por exemplo a aplicação em ambientes agressivos e onde o peso é um fator preponderante, (Correia, 2004).

2.3.1.1 Constituintes e características gerais dos compósitos FRP

Os materiais compósitos de FRP são constituídos, essencialmente, por fibras (fase dispersa) embebidas numa matriz polimérica (fase contínua) e por uma interface muito fina que se forma à custa de reações químicas entre os dois principais constituintes (CNR-DT 205/2007). As fibras são responsáveis pelo desempenho mecânico, nomeadamente a resistência e a rigidez. A matriz, menos resistente e rígida, é responsável pela proteção da fibra e pela transferência de tensão entre as fibras e o compósito e as cargas externas aplicadas. Por sua vez, a interface controla o modo de rotura, sendo responsável pelo comportamento global do compósito em termos da resposta de tensão-deformação, (Barbero, 2010) e (Fangueiro, 2011).

Podem ser incorporados na matriz aditivos e/ou materiais de enchimento (e.g., *fillers*) com o objetivo de se obterem determinadas características, tais como a condutibilidade elétrica, a proteção eletromagnética, ou a redução de custo. A combinação criteriosa torna possível o desenvolvimento de diversos produtos, alargando o campo de aplicação estrutural dos mesmos, (Correia, 2004).

De um modo geral, as propriedades do compósito dependem das propriedades dos materiais, da geometria, da orientação das fibras de reforço em relação à direção de carregamento, das propriedades da matriz e da distribuição de material (percentagem e tipo de fibras) (Fangueiro, 2011). Num compósito, as propriedades mecânicas do compósito, nomeadamente a resistência, são mais baixas do que as propriedades das fibras e mais elevadas do que a matriz (Figura 2.29). Contudo, estes compósitos apresentam uma relação peso-resistência e peso-rigidez superior aos materiais convencionais. Na Tabela 2.2 encontram-se algumas propriedades dos tipos de FRP mais comuns.

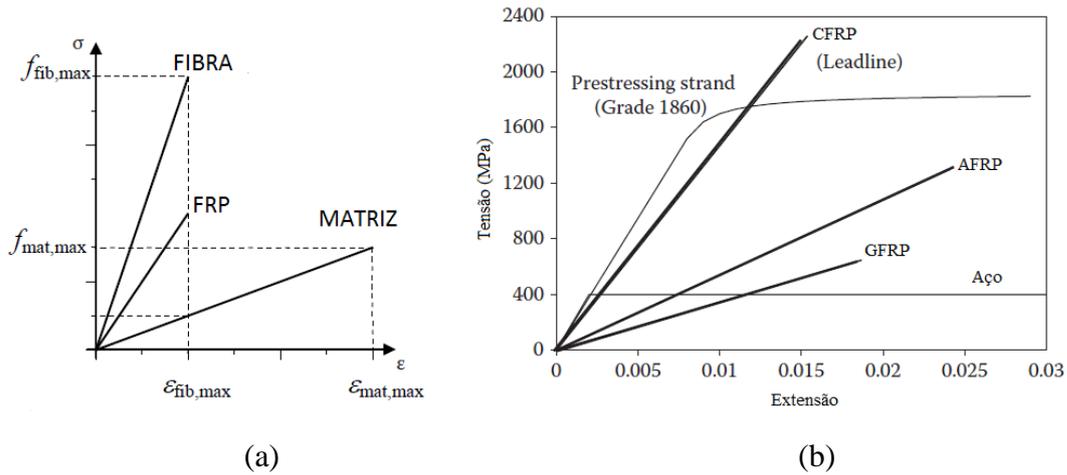


Figura 2.29 - (a) Relação entre a tensão e a extensão da fibra, matriz e FRP (CNR-DT 205/2007) e (b) relação tensão-extensão para alguns tipos de cordões de FRP e aço (adaptado de (Zoghi, 2013)).

Tabela 2.2 - Propriedades típicas de alguns tipos de FRP (adaptado de (Correia, 2013)).

	Densidade [g/cm ³]	Volume de fibra [%]	Resistência de tração [MPa]	Modulo de elasticidade axial [GPa]	Extensão axial última [%]	Coeficiente de expansão térmica [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	
						Axial	Transversal
CFRP	1,5 - 1,60	50 - 60	600 - 3690	120 - 580	0,5 - 1,7	-9 - 0,0	74,0 - 104,0
GFRP	1,25 - 1,60	50 - 60	483 - 1600	35 - 60	1,2 - 3,1	-6,0 - 10,0	21,0 - 23,0
AFRP	1,25 - 1,40	-	1720 - 2540	41 - 125	1,9 - 4,4	-2	60,0 - 80,0

Desde a escolha do tipo de fibra e matriz até à sua aplicação, os materiais compósitos seguem uma escala de análise tal como demonstrado na Figura 2.30.

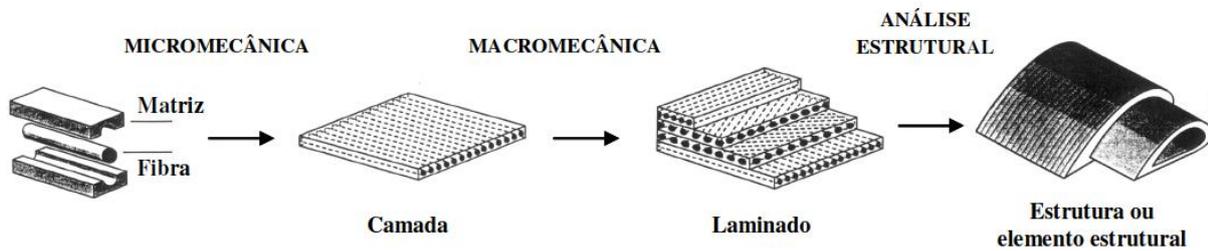


Figura 2.30 - Escala de análise na produção de um material compósito (Correia, 2004).

Fibras de Reforço

As fibras de reforço podem ser contínuas, descontínuas, “*whiskers*” ou nanotubos de carbono, (Zoghi, 2013). No geral, estas são usadas por serem leves, rígidas e resistentes, (Barbero, 2010). São constituídas por filamentos contínuos extremamente finos, de difícil manipulação individual, motivo pelo qual são comercializadas em diferentes formatos, (CNR-DT 205/2007). As fibras que constituem o FRP podem ser de origem natural ou sintética, sendo estas últimas as mais usadas. De entre estas, as mais comercializadas são a fibra de vidro, carbono e aramida (Fangueiro, 2011) internacionalmente designadas por GFRP, CFRP e AFRP - “*Aramid Fiber Reinforced Polymer*”, respetivamente. Para qualquer um destas fibras, a matriz deve ser de origem polimérica, (Zoghi, 2013). A escolha do tipo de fibra depende do seu custo, propriedades e aplicação. Na Tabela 2.3 encontram-se especificadas as características gerais de alguns tipos de fibras mais usados.

Tabela 2.3 - Valores típico das propriedades das fibras (Ascione *et al.*, 2016b; Bank, 2006).

Propriedades	Vidro - E	Carbono	Aramida
Densidade [g/cm ³]	2,57 - 2,6	1,79 - 1,9	1,4
Resistência à tração [MPa]	2750(1750)	3600 – 4700(60-135)	2800 - 4100
Módulo de Elasticidade [GPa]	73,1 - 86	238 – 410(10 – 15)	70 - 190
Coefficiente de Poisson	0.238	0,30 – 0.35	-
Extensão última de tração [%]	2,5 - 4,5 (2,4)	0,6 - 1,5(0,45 – 0,9)	2,0 - 4,0
Resistência ao corte	1700	1000 - 1200	-
Módulo de corte	3000	27000 - 50000	-
Extensão última de corte	5,6	2,4 – 3,8	-
Coefficiente de dilatação térmica [10 ⁻⁶ /K]	5,0 - 6,0	Axial: 1,3 - 0,1 Radial: 18	3,5
Diâmetro das fibras [µm]	3 - 13	6 - 7	12
Estruturas das fibras	isotrópica	anisotrópica	anisotrópica

Nota: os valores entre parênteses dizem respeito à tração perpendicular à direção da fibra.

i. Fibra de Vidro

A fibra de vidro (cor branca) é a fibra mais usada na indústria corrente (indústria de “baixo custo”), para a produção do GFRP. Tal sucesso deve-se nomeadamente à resistência química (e.g., resistência à corrosão), alta resistência (sobretudo à tração), resistência ao calor e ao fogo, dureza, flexibilidade, leveza, preço e à relação resistência e rigidez-custo. Como principais desvantagens fazem parte o baixo módulo de elasticidade, a rotura por fluência, a baixa

resistência à abrasão e a baixa adesão à matriz polimérica, especialmente na presença de humidade, (Barbero, 2010; Peters, 1998; Zoghi, 2013). Entre os diversos tipos de fibra de vidro destacam-se os tipos E-Glass, S-Glass, C-Glass e AR.

- Fibra tipo E-glass: apresenta propriedades elétricas e térmicas melhoradas, além de elevada resistência à tração, durabilidade e baixo custo. É o tipo de fibra de vidro mais usado, (Astrom, 1997) e citado por (Zoghi, 2013);
- Fibra tipo S-glass: por apresentar características mecânicas melhoradas sendo, por isso, mais utilizada no setor aeroespacial. Possui ainda uma melhor tolerância à temperatura comparativamente com as do tipo E. Por outro lado, é aproximadamente 3 a 4 vezes mais cara que as anteriores, (Correia, 2004);
- Fibra tipo C-glass: apresenta uma resistência à corrosão melhorada, contudo não é muito usual no setor da construção, (Zoghi, 2013);
- Fibra tipo A ou AR-glass: este tipo de fibra apresenta uma resistência alcalina superior, permitindo a sua utilização em compósitos de matriz cimentícia, como por exemplo o betão reforçado com fibra de vidro, (Zoghi, 2013).

ii. Fibra de Carbono

As propriedades das fibras de carbono dependem da matéria-prima e do processo de fabrico das mesmas, existindo por isso uma vasta gama de valores de rigidez. Os dois principais tipos de fibras são a PAN (*polyacrylonitrile*) e o *pitch*, este último embora mais barato é menos resistente. Apesar de menos utilizadas no setor da construção comparativamente com a fibra de vidro, as fibras de carbono são mais rentáveis em determinadas aplicações, das quais se destaca o setor aeroespacial, dada a sua elevada resistência, rigidez e leveza. Para além disso, apresentam elevados módulos de elasticidade e bom comportamento à fluência e fadiga. O comportamento anisotrópico, a baixa resistência à compressão, a baixa resistência à abrasão, o custo (15 vezes mais caras do que as fibras de vidro) e a energia necessária para a produção são as suas principais desvantagens. Na Engenharia Civil, usa-se comumente este tipo de fibra para

o reforço, reparação ou reabilitação de elementos estruturais à ação sísmica, como vigas e pilares de betão, (Barbero, 2010; Peters, 1998; Zoghi, 2013).

iii. Fibra de Aramida

A fibra de aramida (cor amarela) é o termo genérico para um tipo de “fibra de poliamida aromática”. Este tipo de fibra é também mais resistente do que as fibras de vidro, possui um módulo de elasticidade superior ao desta (50%), leveza, boa tenacidade e, portanto, boa absorção de energia (que possibilita a sua utilização, por exemplo, em coletes à prova de bala). A combinação de custo elevado (equivalente à fibra de carbono), possibilidade de rotura por fluência, sensibilidade à radiação ultravioleta, reduzida resistência à compressão comparativamente à tração, dificuldade de processamento e alta absorção de humidade torna o seu uso pouco atraente na engenharia de estruturas, (Bank, 2006).

Tipos de formas das fibras

As fibras de reforço encontram-se divididas essencialmente em duas formas:

- Mechas de filamentos contínuos quase paralelos, designado no mercado por *Roving* (Figura 2.31). Os filamentos podem encontrar-se enrolados (*yarn*) ou não enrolados (*tow*) em feixe. O *roving* pode ser utilizado para produzir fibras curtas ou tecidos, ou ser processado para a produção de mantas ou híbridos, sendo a forma mais indicada quando a produção é feita através de processos automatizados, como a pultrusão, (Barbero, 2010).

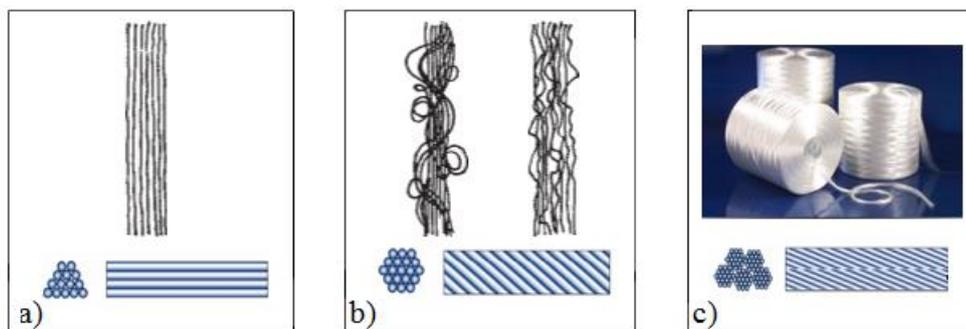


Figura 2.31 - Tipos de *Rovings*: (a) mecha de filamento contínuo não torcido (*tow*); (b) mecha de filamento contínuo torcido (*yarn*) (adaptado de (Fiberline Composites, 2003)) e (c) bobine de *roving* comercializada (FIBERGLASS).

➤ Fibras contínuas ou descontínuas.

Os compósitos podem ser reforçados com fibras contínuas, descontínuas ou partículas. Quando reforçados por fibras contínuas, assume-se que a carga é suportada principalmente pelas fibras compridas orientadas ao longo da solicitação. Por sua vez, as fibras descontínuas são fibras curtas que podem ser obtidas através do corte (*chopped*) de fibras contínuas ou pela sua produção direta. Entre estas incluem-se as *milled fibers* e as *whiskers*. A orientação das fibras curtas é assumida como aleatória devido ao difícil processo de controlo da orientação. Os compósitos que incluem este tipo de fibra apresentam um comportamento isotrópico no plano do laminado. Segundo a bibliografia, e como expectável, o comprimento das fibras influencia significativamente as propriedades mecânicas. Deste modo, as fibras contínuas permitem obter valores mais elevados de resistência e rigidez devido à anisotropia controlada, (Bank, 2006; Barbero, 2010; Fiberline Composites, 2003).

As fibras são trabalhadas em produtos tecidos, sendo dispostas em diversas configurações para garantir um reforço bidirecional. Os tecidos podem ser compostos por fibras contínuas entrelaçadas bidirecionais (*wovens fabric* - Figura 2.32b) ou não entrelaçadas (*non-woven fabrics*), (Barbero, 2010).

A manta de reforço é um material fibroso composto por filamentos cortados orientados aleatoriamente (mantas de filamentos curtos - *chopped strand mat*), fibras curtas e/ou filamentos torcidos (*swirled filaments*) (mantas de filamentos contínuos - *continuous strand mat*) e um material de impregnação, (Barbero, 2010) (Figura 2.32c e d). Um exemplo de manta de reforço é o véu de superfície (*surfacing veils*): uma manta de espessura reduzida constituída essencialmente por resina, usada para melhorar a resistência à corrosão do compósito e para um melhor acabamento superficial, (Barbero, 2010; Correia, 2004; Fiberline Composites, 2003). Na Figura 2.32, encontram-se alguns tipos de manta de reforço.

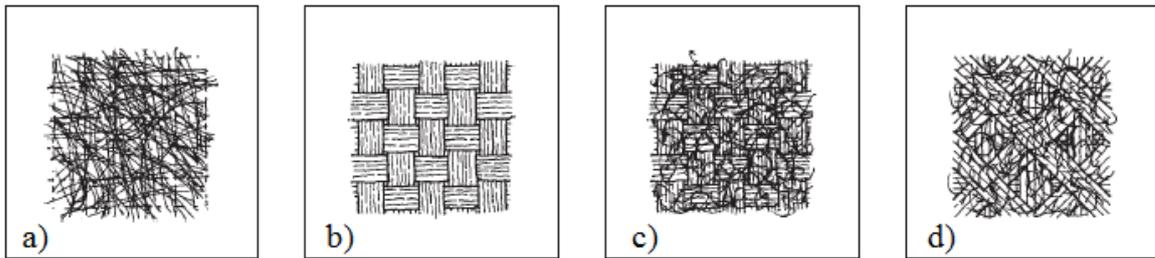


Figura 2.32 - Tipos de manta: (a) manta com fibras contínuas orientadas aleatoriamente (*continuous strand mat*); (b) manta/tecido com fibras contínuas entrelaçadas, orientadas a 0° e 90° (*woven fabrics*); (c) manta que resulta da mistura de uma manta com fibras contínuas entrelaçadas (0° e 90°) com fibras orientadas aleatoriamente e (d) manta que resulta da mistura de uma manta com fibras orientadas a 0° , 45° e 90° com fibras dispostas aleatoriamente (adaptado de (Fiberline Composites, 2003)).

Matriz Polimérica

A matriz de um material compósito é responsável por ligar e manter as fibras na posição desejada, resistir ao esforço de compressão, corte e transverso, assegurar a transferência e distribuição de tensões no compósito e pela proteção das fibras contra as intempéries ambientais e de manuseamento. As matrizes são tipicamente polímeros (termoendurecíveis ou termoplásticos), metais ou cerâmicas. A escolha do tipo de matriz está diretamente relacionada com o tipo de fibra e temperatura (muita influência) a que o compósito vai estar sujeito, uma vez que a rigidez da matriz decresce com o aumento da temperatura. Assim, na presença de temperaturas baixas (até 250°C) devem-se usar a matriz polimérica, enquanto para temperatura elevadas (800°C a 1600°C) a escolha deve recair sobre a matriz cerâmica, (Bank, 2006; Zoghi, 2013).

No fabrico de FRP's, as resinas termoendurecíveis são as mais usadas porque permitem uma boa adesão e impregnação das fibras, dando suporte e possibilitando uma melhor transferência de tensões às fibras. Além disso, superam os termoplásticos em termos de propriedades mecânicas, químicas, estabilidade térmica e durabilidade, (Zoghi, 2013). É ainda possível recorrer ao uso de aditivos (*fillers*) quando se pretende conferir propriedades como a pigmentação, retardador de chama, redução da retração, redução do calor durante a cura, redução do custo, aumento da viscosidade, entre outras (Correia, 2004).

Os polímeros termoplásticos são compostos por longas cadeias de polímeros ligadas por ligações intermoleculares fracas (ligação de *wan der waals*) com comportamento tensão-deformação viscoelástico. No geral, eles são mais dúcteis do que os termoendurecíveis,

contudo, devido à alta viscosidade, torna-se mais difícil a impregnação das fibras. Os termoplásticos incluem o polietileno, o policarbonato, o *nylon* e o poliuretano, (Barbero, 2010; Zoghi, 2013).

Os polímeros termoendurecíveis são estruturas cruzadas complexas (*cross-linked*), com cadeias moleculares unidas através de fortes ligações covalentes atômicas. Estas formam uma rede tridimensional contínua irreversível, isto é, que não pode ser novamente processada (aquecida e amaciada) em uma forma diferente. O facto de não serem recicláveis, apresentarem longos tempos de cura e de apresentarem comportamento frágil são as principais desvantagens, (Zoghi, 2013).

É também importante referir que as propriedades mecânicas dos termoendurecíveis dependem tanto do tempo como da temperatura, característica típica dos materiais viscoelásticos, o que os torna suscetíveis a efeitos de fluência, (Zoghi, 2013). São exemplos deste tipo de resinas o poliéster insaturado, o viniléster, as epóxicas e as fenólicas, (Bank, 2006). Na tabela que se segue, encontram-se as propriedades típicas das principais resinas.

Tabela 2.4 - Valores indicativos das propriedades de alguns polímeros (adaptado de (Ascione *et al.*, 2016b; Correia, 2004).

Propriedades	Poliéster	Viniléster	Epóxi	Fenólicas
Densidade [g/cm ³]	1,2 - 1,3	1,12 - 1,16	1,20 - 1,30	1,00 - 1,25
Resistência à tração [MPa]	20-70	68 - 82	60 - 80	30 - 50
Módulo de Elasticidade [GPa]	2,0 - 3,0	3,5	2,0 - 4,0	3,6
Extensão última [%]	1,0 - 5,0	3,0 - 4,0	1,0 - 8,0	1,8 - 2,5
Coefficiente de Poisson	0.38	0.26	0.39	
Temperatura de transição vítrea [°C]	70 - 120	102 - 150	100 - 270	260

Material de enchimento e aditivos

Os materiais de enchimento (*fillers*) reduzem o custo do compósito e melhoram o seu desempenho, nomeadamente no que respeita à dureza, resistência química, resistência à fadiga e fluência, transferência de tensão da matriz e resistência ao fogo. Reduzem ainda a retração e previnem o aparecimento de fissuras nas zonas de descontinuidade. De entre os materiais de

enchimento fazem parte a argila (silicato de alumínio), o carbonato de cálcio, o caulino, a alumina e as microesferas de vidro, entre outros, (Peters, 1998; Zoghi, 2013).

Podem ainda ser usados aditivos, como inibidores de ultravioletas, retardadores de chama, antioxidantes, catalisadores, pigmentos e descofrantes, (Zoghi, 2013). Contrariamente ao que se verifica com os *fillers*, os aditivos são utilizados em quantidades muito pequenas, (Correia, 2004).

Disposição da fibra na matriz

Segundo Jones (1998), existem três modos de fazer o arranjo da união das fibras com a matriz, esquematizados na Figura 2.33.

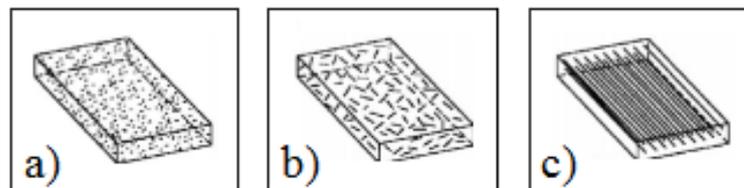


Figura 2.33 - Arranjo da matriz com as fibras: (a) arranjo por partículas: as fibras encontram-se dispersas pela matriz (reforço não direcional); (b) arranjo com fibras curtas: apesar de as fibras curtas encontrarem-se dispersas de modo aleatório, elas já apresentam uma certa orientação e (c) arranjo orientado com fibras longas: as fibras são longas e estão dispostas de forma orientada de modo a responder à carga a que vai ser sujeito (Jones, 1998).

2.3.1.2 Os perfis pultrudidos em GFRP

i. Constituintes e propriedades gerais

Dentro dos materiais FRP, os GFRP produzidos por pultrusão são aqueles que apresentam maior potencial como materiais estruturais, uma vez que aliam um bom comportamento mecânico a custos de produção bastante competitivos, (Bank, 2006). Na Figura 2.34 apresenta-se esquematicamente a disposição típica das camadas que constituem o perfil pultrudido.



Figura 2.34 - Disposição típica das camadas num perfil pultrudido (esquerda e direita) (adaptado de (Correia, 2013)).

As propriedades dos perfis GFRP, tal como nos outros FRP's, dependem dos materiais que o constituem (tipo, teor e formas da fibra e tipo de matriz polimérica), da orientação, processo de fabricos do perfil, entre outros. Na Tabela 2.5 estão apresentados os intervalos típicos das propriedades dos perfis GFRP. Refere-se que as propriedades são mais elevadas na direção da pultrusão do que nas restantes (anisotropia).

Tabela 2.5 - Intervalos usuais das principais propriedades dos perfis de GFRP produzidos pelos maiores fabricantes (Correia, 2004).

Propriedades	Unidades	Direção paralela às fibras	Direção transversal às fibras
Resistência à tração	MPa	200 - 400	50 - 60
Resistência à compressão	MPa	200 - 400	70 - 140
Resistência ao corte	MPa		25 - 30
Módulo de elasticidade	GPa	20 - 40	5 - 9
Módulo de distorção	GPa		3 - 4

Apresenta-se na Figura 2.35 a relação tensão-extensão, a tensão última de tração e o módulo de elasticidade em flexão dos perfis pultrudidos de GFRP (da empresa Fiberlines), comparando-se com a madeira, alumínio, PVC e o aço, este último constituindo o concorrente direto.

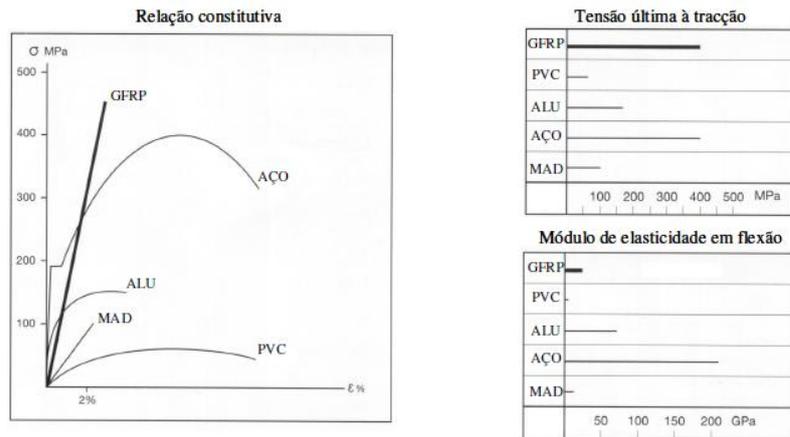


Figura 2.35 - Comparação das propriedades mecânicas dos perfis de GFRP produzidos pela empresa *Fiberline* e outros materiais (Correia, 2004).

Enquanto o aço apresenta um comportamento dúctil, o GFRP apresenta um comportamento elástico-linear até à rotura em termos de tensão-extensão e como é sabido na Engenharia Civil os materiais devem apresentar alguma ductilidade. Por sua vez, o perfil pultrudido em GFRP apresenta uma tensão última superior e um módulo de elasticidade em flexão inferior a qualquer material um dos materiais em análise. Além disso, o GFRP tem uma densidade inferior ao aço (20-25%), (Correia, 2004).

Comparativamente aos materiais tradicionais (betão armado, aço) os perfis de GFRP têm como principais vantagens e desvantagens as que se destacam na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 -Vantagens e desvantagens dos perfis pultrudidos (ALTO; Correia, 2004).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reduzido peso próprio (cerca de 4 vezes mais leve que o aço e 2/3 do que o alumínio); ➤ Elevada relação entre a resistência mecânica e o peso próprio; ➤ Possibilidade de produzir qualquer forma estrutural; ➤ Elevada resistência à fadiga; ➤ Excelente resistência à corrosão; ➤ Excelente isolamento elétrico, térmico e magnético; ➤ Facilidade no transporte para o estaleiro e na instalação em obra; ➤ Estes materiais são facilmente cortados, furados, colados, rebitados ou aparafusados utilizando equipamento convencional; ➤ Facilidade de pigmentação; ➤ Fácil manipulação; ➤ Estabilidade dimensional que se traduz num coeficiente de dilatação térmico baixo e resistência ao calor e ao frio; ➤ Baixos custos de manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reduzido módulo de elasticidade; ➤ Problemas associados à fluência; ➤ Elevada deformabilidade; ➤ Comportamento frágil; ➤ Necessidade do desenvolvimento de novas formas estruturais e sistemas de ligação; ➤ Ausência de regulamentação específica; ➤ Custos iniciais ainda pouco competitivos na maior parte das aplicações.

Campos de aplicação dos perfis GFRP

Tendo em conta as vantagens e inconvenientes inerentes a esta solução, os perfis em GFRP começaram por ser utilizados como elementos não estruturais ou estruturas secundárias, destacando-se o uso (i) no setor elétrico (escadas isolantes, esteiras de cabos, etc.), (ii) no setor

dos transportes (perfis para camiões e comboios, placas de sinalização, etc.), (iii) no setor da construção civil (guarda-corpos, escadas, pontes de peões, passadiços, saneamento básico, estações de tratamento de água, painéis de fachada, etc.), (iv) no setor do lazer e desporto (vara de salto, banco de jardim, etc.) e (v) na indústria petroquímica, (Figura 2.36 à Figura 2.39), (ALTO; Correia, 2004).



Figura 2.36 - Passadiços em gradil com guarda-corpos (ALTO).



Figura 2.37 - Plataforma de trabalhos com escada isolante e guarda-corpo (ALTO).



Figura 2.38 - Painel (STRONGWELL).



Figura 2.39 - Banco de Jardim (ALTO).

Devido à investigação e conhecimento destes materiais começaram-se a aplicar os perfis de GFRP em estruturas primárias como pontes (pedonais, rodoviárias) e pisos (nomeadamente nas faces dos painéis sanduíche) e coberturas de edifícios (Figura 2.40 à Figura 2.43).



Figura 2.40 - Ponte Aberfeldy- Primeira ponte pedonal 100% compósita (1992) (Correia, 2004).



Figura 2.41 - Ponte Bonds Mill –Primeira ponte rodoviária móvel (1994) (Correia, 2004).



Figura 2.42 - FRP Edifício EyeCatcher (1999) (Correia, 2004).



Figura 2.43 - Ponte Lérida (2001) (Correia, 2004).

2.3.2 Poliuretano

O poliuretano (PUR), amplamente usado em espumas rígidas e flexíveis, é um polímero termoendurecível composto por uma cadeia de unidades orgânicas unidas por ligações uretânicas. Os principais componentes são o *polyol* e o isocianato, (Davies, 2001). Face à panóplia de formas, densidades e características possíveis, as espumas de poliuretano fazem parte dos núcleos homogêneos mais utilizados na constituição do núcleo dos painéis sanduíche, (Davies, 2001). Entre os vários tipos de espuma destacam-se o poliuretano rígido e o poliuretano flexível, (Davies, 2001). O primeiro (mais usado) é um poliuretano com células fechadas, (Davies, 2001) e as densidades variam entre os 20 kg/m³ e os 750 kg/m³. Os segundos são poliuretanos com célula aberta e as densidades variam entre os 8 e os 50 kg/m³.

Como principais vantagens destacam-se o baixo peso específico, o bom isolamento térmico e acústico, a resistência à compressão e a memória elástica. No entanto, são sensíveis à temperatura e humidade relativa, sobretudo para carregamentos permanentes devido à fluência, (Davies, 2001). A temperaturas elevadas as espumas tornam-se mais flexíveis e viscoelásticas, enquanto que para temperaturas baixas tendem a ser mais quebradiças, rígidas e resistentes pelo que é necessário ter em atenção caso os painéis se encontrem expostos à radiação solar. Uma das grandes vantagens é a resistência ao fogo uma vez que em caso de incêndio esta forma uma camada carbonosa protetora, (Davies, 2001).

Geralmente as características mecânicas e a condutibilidade térmica variam consoante a formulação da espuma e o seu processo de fabrico, aumentando com a densidade, (Davies, 2001). A Figura 2.44 mostra a gama de valores (apenas indicativa) para a resistências à tração, compressão, corte, módulo de elasticidade e módulo de distorção. Em compressão as espumas de PUR apresentam uma resposta cuja tensão máxima corresponde a uma extensão próxima dos 10%. Em tração, as espumas de PUR apresentam um modo de rotura frágil.

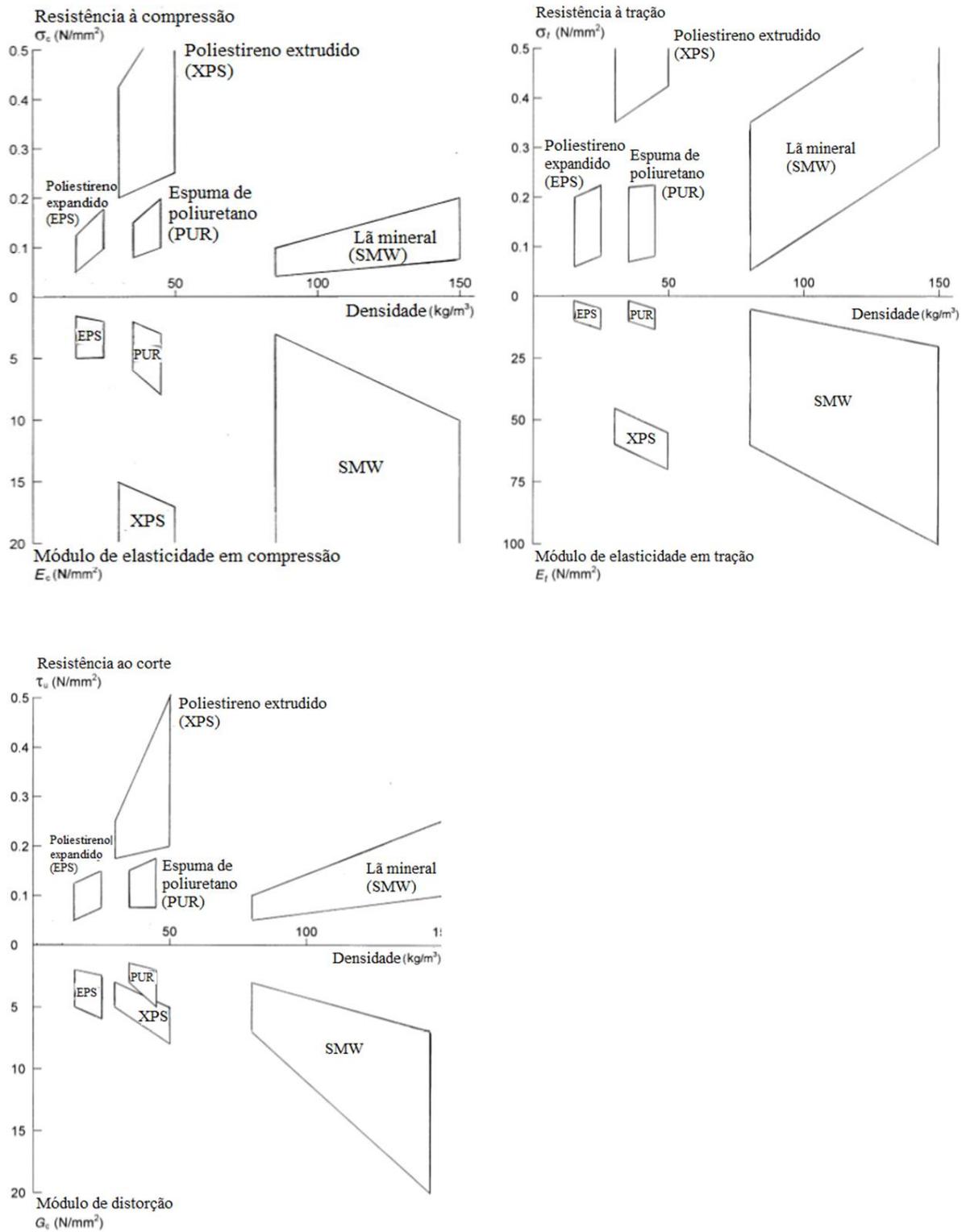


Figura 2.44 - Variação dos parâmetros mecânicos: (a) em compressão; (b) tração e (c) corte (adaptado de (Davies, 2001)).

2.3.3 Argamassas de elevado desempenho

Nos últimos anos tem-se assistido ao desenvolvimento e otimização de materiais de matriz cimentícia. Esses esforços têm como objetivo aumentar a ductilidade e a resistência a ações mecânicas deste tipo de materiais, devido à introdução de fibras cuja resistência última à tração e flexão são superiores. Estes materiais são designados por materiais de matriz cimentícia reforçados com fibras (*FRC – Fibre Reinforced Concrete*). Este tipo de compósito apresenta grandes vantagens relativamente aos betões convencionais, (Barros, 2011).

Com o avanço dos materiais de matriz polimérica reforçada com fibras, é possível combinar e otimizar a solução, de modo a formar uma estrutura leve, durável e de elevada resistência e dúctil. Inicialmente, as fibras (com baixo módulo elasticidade) eram usadas para controlo de fendilhação por retração plástica. No entanto, com o desenvolvimento de fibras sintéticas de maior módulo e dos super-plastificantes de última geração, têm-se verificado que os *FRC`s* apresentam propriedades em estado fresco e endurecido bastante melhores. Posteriormente, surgiram estudos relativos ao betão auto-compactável (SSC, na literatura inglesa *self-compacting concrete*), nomeadamente no que concerne à introdução de fibras (aço ou sintéticas) (FRSCC). Deste modo, é possível combinar um betão altamente fluido (sem perda de estabilidade) com as vantagens inerentes ao reforço. Para além disso, têm sido desenvolvidos betões ultrafluidos reforçados com mais de que um tipo de fibras de modo a maximizar cada tipo de fibra, (Barros, 2011). É possível classificar os *FRC`s* da seguinte forma:

- i. Compósitos de matriz cimentícia com um comportamento de amolecimento (*Strain Softening*). Caso a resistência de tração (provete *dogbone*) não aumenta com a extensão, após o início da fendilhação;
- ii. Compósitos de matriz cimentícia que apresenta um comportamento de endurecimento (*Strain Hardening*). Quando solicitados, inicialmente, antes de atingirem a formação de uma macro fenda caracterizam-se por formarem padrões de fendilhação difusos (desenvolvimento de múltiplas micro-fendas). Estas micro-fendas devem-se à interação entre as fibras que impedem a abertura destas. Assim, é possível obter *FRC`s* com uma resistência última à tração superior à da matriz, com abertura máxima de fissura inferior aos limites recomendados até níveis de deformação de tração de cerca de 2%. Em flexão, este tipo de argamassa de ultra elevada ductilidade pode ser classificada como *deflection*

softening e *deflection hardening*, apresentando nesta última fase várias micro-fendas. Segundo Zollo (1997), o nível de *deflection hardening* é influenciado pelos mecanismos de reforço e pelas propriedades da matriz das fibras. O fato de se desenvolverem múltiplas fissuras até atingir níveis de deformação superiores, possui grandes vantagens em termos de durabilidade do material, pois quanto menor for a dimensão da fenda, menos suscetível se encontra à penetração dos agentes ambientais envolventes.

Segundo Zollo (1997), neste tipo de argamassas é muito importante ter em conta o tipo de material, geometria, orientação, teor de volume de fibras e respetiva distribuição e ligação entre a matriz e o material de reforço.

2.4 Comportamento mecânico dos painéis sanduíche

2.4.1 Considerações iniciais para o dimensionamento

No dimensionamento de painéis sanduíche é necessário complementar as respetivas regras técnicas de dimensionamento, comumente usadas no dimensionamento de perfis FRP e painéis sanduíche compósitos, com as regras existentes nos Eurocódigos Estruturais, nomeadamente no que diz respeito ao tipo de edifício, solicitação (cargas permanente e sobrecarga), combinação de ações e respetivos coeficiente de segurança, entre outros (Ascione *et al.*, 2016a; CNR-DT 205/2007). Além disso, e tal como nas restantes estruturas é necessários cumprir os critérios relativos à deformação máxima ($\delta/500$ ou $\delta/250$), e às tensões admissíveis nos materiais. Pelo facto dos núcleos correntes apresentarem uma performance mecânica relativamente reduzida quando compara com as lâminas, é frequente negligenciar a sua contribuição para a rigidez de flexão e axial em estado limite último (*ULS*), quando este núcleo é em espuma, madeira de balsa ou favo de mel. Além disso, e num estudo preliminar a extensão máxima admitida é de 1.2% nos materiais em FRP. Em estado limite de serviço (*SLS*) deve ser tido em conta os efeitos da fluência e a relaxação para a combinação quase-permanente de ações, (Ascione *et al.*, 2016a; CNR-DT 205/2007).

No caso de laminados ou estruturas FRP e em estado limite último, o coeficiente parcial do material, γ_M , é dado por:

$$\gamma_M = \gamma_{M1} \cdot \gamma_{M2}$$

em que, $\gamma_{M1}=1$ se o processo de produção e qualidade forem certificados pela *EOTA*; se as propriedades dos materiais forem obtidas por meios de ensaios experimentais, então $\gamma_{M1}=1.35$. No caso de estruturas sanduíche com núcleo em espuma, o coeficiente à aplicar à espuma varia entre 1.2 e 1.7 (Tabela 2.2 de Ascione *et al.*, (2016a)). Em estado limite de serviço, γ_{M1} e γ_{M2} podem tomar o valor de 1.0.

De seguida, são apresentadas as expressões que possibilitam o dimensionamento de estruturas sanduíche (princípios convencionais da mecânica estrutural). Serão também apresentadas as equações relativas ao estado limite de serviço (SLS) e estado limite último (ULS).

2.4.2 Princípios do comportamento estrutural

O comportamento de um painel sanduíche pode ser comparada com o de uma viga em secção I (Figura 2.45). Tal como na viga em “I”, a função dos banzos repercute-se nas faces (lâminas) do painel sanduíche enquanto a alma assemelha-se ao núcleo do painel. No painel sanduíche, a rigidez à flexão aumenta com o aumento da espessura do núcleo, tal como acontece numa viga em “I” com o afastamento dos banzos. Em ambos os casos, quanto mais alta for a alma e o núcleo, maior é a inércia e, portanto, a rigidez de flexão, sem que haja um aumento considerável de peso. As diferentes relacionam-se então com o comportamento dos materiais que constituem as vigas.

Assim, o desenvolvimento das teorias de vigas sanduíche baseou-se nas teorias de *Euler-Bernoulli* (não considera deformação de corte) e de *Timoshenko* (considera a deformação de corte), (Zenkert, 2005).

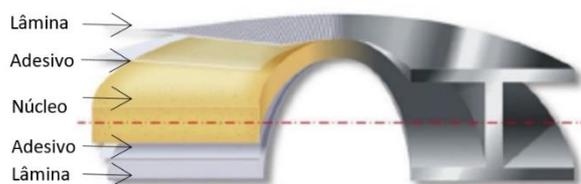


Figura 2.45 - Analogia entre uma estrutura sanduíche e uma viga em secção I.

A eficiência estrutural, nomeadamente da flexão de um painel está relacionada com os materiais do qual o painel é composto e da interação entre as suas componentes que é normalmente designada por “efeito sanduíche”. A Figura 2.46 mostra os ganhos inerentes ao aumento da espessura do núcleo.

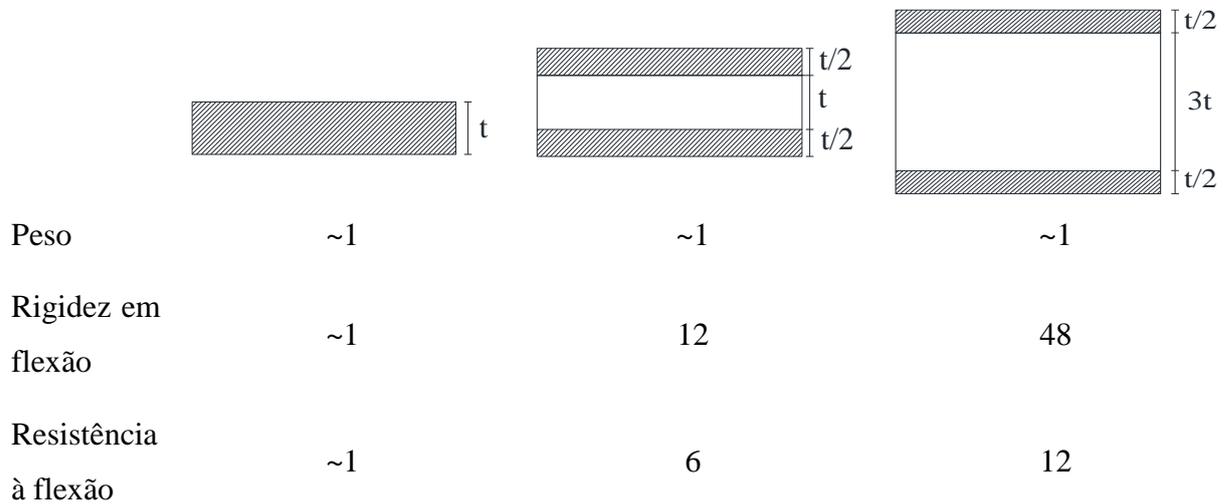


Figura 2.46 - Ilustração do “efeito sanduíche” (adaptado de (Zenkert, 2005)).

Segundo Allen (2013), o comportamento (tensão e deformação) de uma viga sanduíche pode ser analisada, numa primeira fase, utilizando as teorias clássicas de flexão de vigas, desde que sejam tomados alguns cuidados. Assim, esta analogia só é válida quando se assume que:

- (i) as camadas estão bem ligadas;
- (ii) a rigidez das faces é muito superior à rigidez do núcleo;
- (iii) as lâminas e o núcleo são isotrópicos, embora isso não aconteça nos materiais FRP;
- (iv) a secção transversal é plana e ortogonal ao eixo longitudinal da viga e permanece-o quando a viga é fletida (hipótese de *Euler-Bernoulli*);
- (v) deve-se considerar o efeito de corte no cálculo da deformada (Teoria de *Timoshenko*).

2.4.2.1 Viga sanduíche simétrica

Nesta fase e com o objetivo de simplificar o problema, admite-se a secção transversal simétrica presente na Figura 2.47.

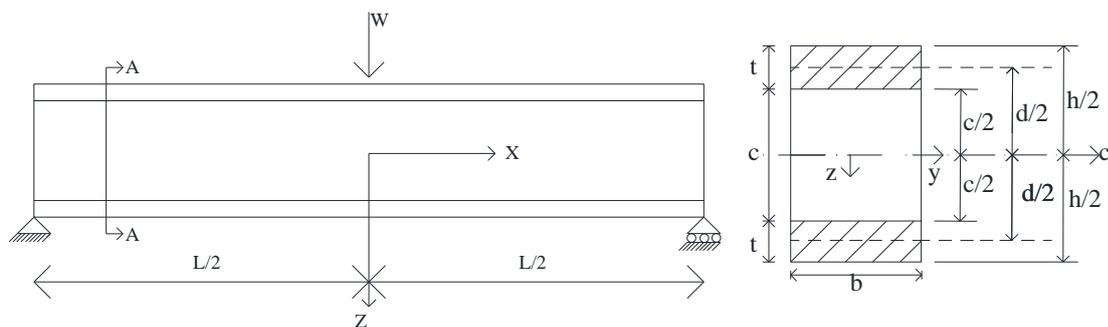


Figura 2.47 - Viga sanduíche simplesmente apoiada. Seção AA à direita (adaptado de (Allen, 2013)).

➤ Rigidez de Flexão

Em qualquer elemento, a rigidez de flexão é o produto entre o módulo de elasticidade e o momento de inércia. Numa viga sanduíche, estrutura heterogênea, a rigidez de flexão é a soma da rigidez das diferentes componentes medidas a partir do eixo baricêntrico da seção. Portanto:

$$D = D_{faces} + D_{núcleo} = E_f \times \frac{bt^3}{6} + E_f \times \frac{btd^2}{2} + E_c \times \frac{bc^3}{12} \quad (2.1)$$

em que, E_f e E_c são os módulos de elasticidade das lâminas e do núcleo, respetivamente, b é a largura da viga, t é a espessura das lâminas, c é a espessura do núcleo e d é a distância entre os centros de gravidade das lâminas.

Do lado direito da equação, o primeiro termo representa a rigidez de flexão da face em torno do seu próprio eixo, o segundo termo representa a rigidez das faces associadas à flexão em relação ao eixo central da viga sanduíche. O terceiro termo representa a rigidez de flexão do núcleo (Zenkert, 2005). Contudo, é possível efetuar algumas simplificações na rigidez de flexão uma vez que nas estruturas sanduíche, usualmente, as faces são muito mais finas e rígidas do que o núcleo ($t \ll c$, $E_f \gg E_c$). Assim, o primeiro termo da equação 2.1 é por isso bastante pequeno e inferior a 1% do segundo se, (Allen, 2013; Zenkert, 2005):

$$3 \left(\frac{d}{t} \right)^2 > 100 \text{ ou } \frac{d}{t} > 5.77 \quad (2.2)$$

O terceiro termo é na maioria dos casos menos de 1% do segundo termo quando se verifica a seguinte condição:

$$6 \frac{E_f t}{E_c c} \left(\frac{d}{c}\right)^2 > 100 \quad (2.3)$$

Na maioria dos painéis, $(d/c)=1$ e t/c varia entre 0.02 e 0.1 e, se a condição acima for satisfeita, E_f/E_c estará compreendido entre 835 e 167, o que não é válido para todas as combinações de materiais do núcleo e das lâminas. Esta condição deve, portanto, ser verificada pois nem sempre é possível desprezar esse termo, (Allen, 2013).

Caso o primeiro e terceiro termo sejam desprezados, a rigidez é dada pela seguinte expressão:

$$D = E_f \times \frac{btd^2}{2} \quad (2.4)$$

Dado que a secção se mantém plana e perpendicular ao eixo longitudinal, a extensão axial é dada por:

$$\varepsilon = \frac{M \times z}{D} \quad (2.5)$$

em que, ε é a extensão a uma distância z , M é o momento aplicado, z a localização do ponto onde estão a ser efetuados os cálculos das extensões e D a rigidez de flexão.

Como se observa, as expressões dependem essencialmente das propriedades físicas e geométrica e do afastamento das lâminas. Normalmente, a relação c/t varia entre 10 a 50 e E_f/E_c entre 50 e 1000, (Zenkert, 2005).

As tensões normais nas faces e no núcleo podem ser determinadas utilizando a teoria clássica de flexão, adaptada à secção transversal compósita. Assim,

$$\sigma_f = \frac{M \times z}{D} \times E_f, \quad \left(\frac{c}{2} \leq z \leq \frac{h}{2}; -\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{c}{2}\right) \quad (2.6)$$

$$\sigma_c = \frac{M \times z}{D} \times E_c, \quad \left(-\frac{c}{2} \leq z \leq \frac{c}{2}\right) \quad (2.7)$$

As tensões máximas encontram-se a $c/2$ para o núcleo e a $h/2$ para as faces. As tensões encontradas devem ser inferiores ou iguais às tensões admissíveis pelos materiais.

➤ **Tensão de corte**

Segundo Allen (2013), para uma viga sanduíche, as tensões de corte numa dada secção são dadas por:

$$\tau = \frac{Q}{Db} \sum (S_i E_i) \quad (2.8)$$

sendo, τ a tensão de corte, D a rigidez de flexão da secção, Q o esforço de corte e S_i o momento estático do elemento i (núcleo ou lâmina) e E_i o módulo de elasticidade do material do elemento i (núcleo ou lâmina).

No núcleo, as tensões de corte em qualquer ponto são dadas pela expressão (2.9). Quando $z=0$, a tensão de corte é máxima. As tensões de corte máximas nas lâminas são dadas pela expressão (2.10).

$$\tau = \frac{Q}{D} \left\{ E_f \frac{td}{2} + \frac{E_c}{2} \left(\frac{c^2}{4} - z^2 \right) \right\} \quad (2.9)$$

$$\tau_{f\text{máx}} = \frac{Qtd}{D2} E_f \quad (2.10)$$

Analisando estas duas equações conclui-se que a tensão máxima no núcleo é um pouco superior que a tensão máxima de corte nas faces. Assim sendo, o esforço de corte ao longo da espessura do núcleo pode ser considerada constante se verificar-se a seguinte condição:

$$4 \frac{E_f t d}{E_c c c} > 100 \quad (2.11)$$

Como d/c é usualmente próximo da unidade, as condições da equação (2.3) e (2.11) são semelhantes. Conclui-se, que quando o núcleo é muito fraco e a sua contribuição para a rigidez à flexão é insignificante, a tensão de corte pode ser considerada constante ao longo da espessura do núcleo, como ilustrado na Figura 2.48. Para um núcleo fraco, pode-se considerar $E_c=0$ e a tensão de corte no núcleo passa a ser dada por:

$$\tau = \frac{Q}{D} E_f \frac{td}{2} \quad (2.12)$$

Se, além disso a rigidez de flexão das faces em torno do próprio eixo for pequena, então a tensão de corte é dada por:

$$\tau = \frac{Q}{bd} \quad (2.13)$$

Pode-se notar que esta tensão é média e a condição $E_c = 0$ (condição de simplificação) resulta também numa distribuição linear de tensões nas faces. Na presença deste estado de tensão, o núcleo é designado como antiplano ($\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = 0$). Neste caso o núcleo não contribui na rigidez à flexão da estrutura sanduíche, (Allen, 2013).

Na Figura 2.48 apresenta-se a distribuição da tensão ao nível da secção para as considerações acima referidas.

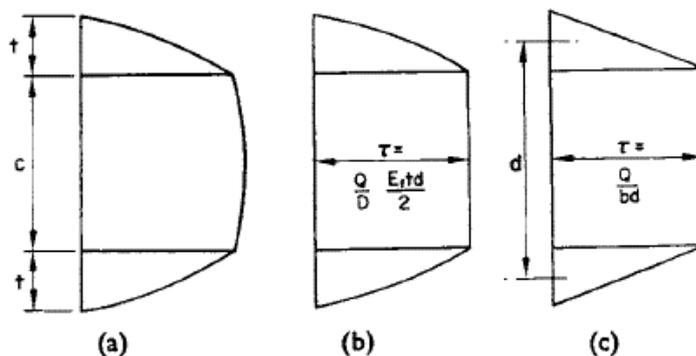


Figura 2.48 - Distribuição de tensões de corte na viga sanduíche: (a) verdadeira distribuição de tensões; (b) tensões de corte constantes ao longo do núcleo (consideração das condições (2.3) e (2.11) e da hipótese de $E_c=0$) e (c) diagrama aproximado (consideração de (ii), desprezando ainda a rigidez de flexão local das lâminas) (adaptado de (Allen, 2013)).

2.4.2.2 Viga sanduíche assimétrica

Caso a viga sanduíche não seja simétrica em relação ao seu eixo longitudinal, a formulação anterior requer pequenas alterações. Para o efeito, considera-se a formulação apresentada por (Zenkert, 2005) (Figura 2.49). A formulação apresentada por Allen segue os mesmos princípios, embora com variáveis diferentes.

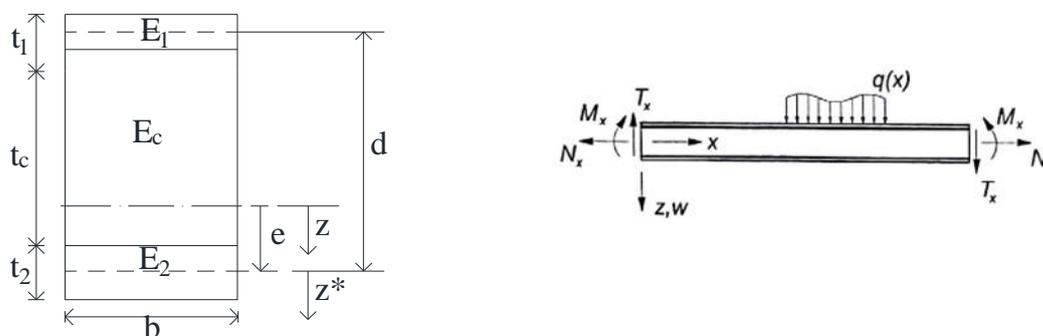


Figura 2.49 - Secção da viga sanduíche assimétrica (adaptado de (Zenkert, 2005)).

➤ Rigidez de Flexão

Inicialmente é necessário determinar a posição do eixo neutro, uma vez que ele não se encontra no centro de massa da mesma. Considere-se que a largura da viga (b) é 1. A rigidez de flexão, D , é dada por:

$$D = \frac{E_1 t_1^3}{12} + \frac{E_2 t_2^3}{12} + \frac{E_c t_c^3}{12} + E_1 t_1 (d - e)^2 + E_2 t_2 e^2 + E_c t_c \left(\frac{t_c + t_2}{2} - e \right)^2 \quad (2.14)$$

Para um núcleo fraco ($E_c \ll E_f$) e sendo:

$$e = \frac{E_1 t_1 d}{E_1 t_1 + E_2 t_2}; \quad d - e = \frac{E_2 t_2 d}{E_1 t_1 + E_2 t_2}; \quad d = \frac{t_1}{2} + t_c + \frac{t_2}{2}$$

Então, a rigidez de flexão é regida pela seguinte equação:

$$D = \frac{E_1 t_1^3}{12} + \frac{E_2 t_2^3}{12} + \frac{E_1 t_1 E_2 t_2 d^2}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \quad (2.15)$$

Se a faces forem finas, os dois primeiros termos podem ser desprezados. Deste modo, as tensões normais nas faces e no núcleo podem ser determinadas utilizando a teoria clássica de flexão, adaptada à secção transversal compósita. Assim:

$$\sigma_1 = -\frac{M_x \times (d - e) E_1}{D} = -\frac{M_x \times E_1 E_2 t_2 d}{D(E_1 t_1 + E_2 t_2)} \approx -\frac{M_x}{t_1 d} \quad (2.16)$$

$$\sigma_2 = -\frac{M_x \times e E_2}{D} = -\frac{M_x \times E_1 E_2 t_1 d}{D(E_1 t_1 + E_2 t_2)} \approx -\frac{M_x}{t_2 d} \quad (2.17)$$

As tensões encontradas devem ser inferiores ou iguais às tensões admissíveis pelos materiais.

➤ Tensão de corte

As tensões nos diversos constituintes são dadas por:

Na face 1 (ver Figura 2.49): $-d + e - \frac{t_1}{2} \leq z \leq -d + e + \frac{t_1}{2}$

$$\tau_1(z) = \frac{T_x E_1}{D} \frac{1}{2} \left[\left(-d + e - \frac{t_1}{2} \right)^2 - z^2 \right] \quad (2.18)$$

Nota: $T_x = dM_x/dx = V$

Na face 2 (ver Figura 2.49): $e - \frac{t_2}{2} \leq z \leq e + \frac{t_2}{2}$

$$\tau_1(z) = \frac{T_x E_2}{D} \frac{1}{2} \left[\left(e + \frac{t_2}{2} \right)^2 - z^2 \right] \quad (2.19)$$

No núcleo para: $-d + e - \frac{t_1}{2} \leq z \leq 0$

$$\tau_c(z) = \frac{T_x}{D} \left[E_1 t_1 (d - e) + \frac{E_c}{2} \left(-d + e - \frac{t_1}{2} \right)^2 - z^2 \right] \quad (2.20)$$

No núcleo para: $0 \leq z \leq e - \frac{t_2}{2}$

$$\tau_c(z) = \frac{T_x}{D} \left[E_2 t_2 e + \frac{E_c}{2} \left(e - \frac{t_2}{2} \right)^2 - z^2 \right] \quad (2.21)$$

Quando se assume que o núcleo é fraco e a tensão de corte é constante, então:

$$\tau_c(z) = \frac{T_x E_1 t_1 E_2 t_2 d}{D E_1 t_1 + E_2 t_2} \quad (2.22)$$

E quando se assume que as faces são finas, então:

$$\tau_c(z) = \frac{T_x}{d} \quad (2.23)$$

Se o material das lâminas for diferente e se existirem elementos de reforço como sejam as nervuras laterais e centrais, é necessário introduzir algumas alterações em ambas as formulações.

2.4.3 Estado Limite de Serviço - Critério de deformação

Em estado limite de serviço, tanto as deformações (elásticas e a longo prazo) como a resistência constituem critérios condicionantes muito importantes no dimensionamento, pelo que é indispensável limitar os seus valores. Embora a rigidez esteja relacionada com a deformabilidade, a resistência (modos de rotura) já não. Ou seja, é possível ter um painel com uma rigidez elevada (deformabilidade reduzida) com uma resistência à rutura reduzida ou, pelo contrário, um painel com uma rigidez reduzida (deformabilidade elevada) e uma elevada resistência à rotura, (HONEYCOMBS, 2003).

Os deslocamentos transversais em vigas sanduíche podem ser calculados com base na teoria clássica de *Timoshenko*. Numa viga sanduíche com lâminas planas e finas, a deformação total elástica é soma da deformação por flexão e por corte, uma vez que as flechas resultam sobretudo da deformação do painel causada por esforços axiais e de flexão das lâminas e por esforços de corte do núcleo. Caso se esteja na presença de lâminas corrugadas e/ou espessas o cálculo da deformada é mais complexo uma vez que as lâminas apresentam uma rigidez de flexão local. Neste caso, não é possível separar a parcela de deformação devida à flexão e ao corte, (Allen (2013); Davies (2001)).

Assim sendo, e tendo em conta as simplificações acima referidas (caso seja praticável) é possível calcular o deslocamento vertical da viga (w_1) com base na teoria clássica de flexão de vigas. A Figura 2.50 mostra o deslocamento vertical de uma viga sanduíche quando sujeita a uma carga concentrada simétrica. No deslocamento devido à flexão pura, verifica-se que as seções permanecem perpendiculares ao eixo longitudinal antes e após o carregamento. Relativamente ao deslocamento de corte, verifica-se que o deslocamento é apenas vertical (w_2), não permanecendo perpendicular ao eixo longitudinal.

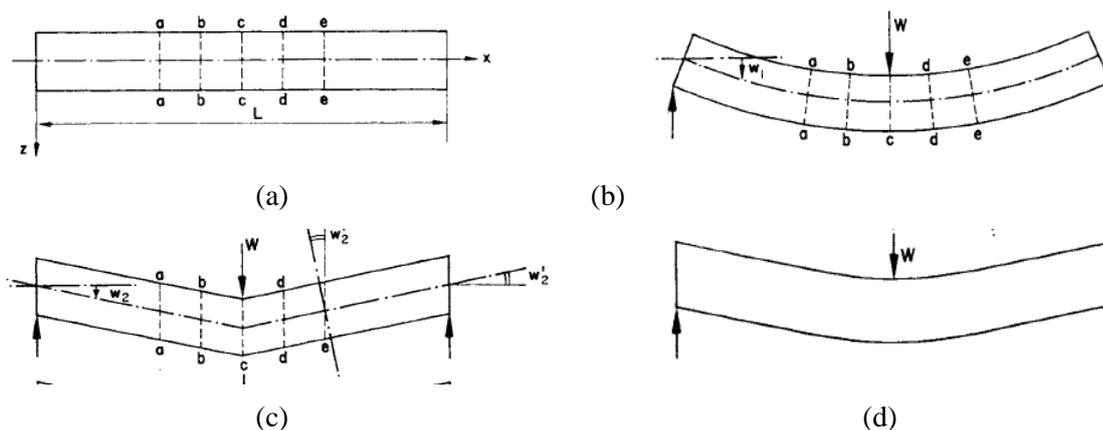


Figura 2.50 - Deslocamento transversal da viga sanduíche: (a) secção indeformada; (b) deformação devido à flexão pura; (c) deslocamento devido ao esforço de corte e (d) deformada global (flexão + corte) (Allen, 2013).

Para uma carga pontual e para uma viga simplesmente apoiada, o deslocamento a meio vão é dado por, (adaptado de (Allen, 2013)):

$$\delta = \delta_{flexão} + \delta_{corte} = \frac{WL^3}{48D} + \frac{WL}{4GA} \quad (2.24)$$

Na presença de uma carga distribuída, q , o deslocamento total a meio vão é:

$$\delta = \delta_{flexão} + \delta_{corte} = \frac{5qL^4}{384D} + \frac{qL^2}{8GA} \quad (2.25)$$

Geralmente, no dimensionamento de estruturas sanduíche com núcleo em espuma polimérica, a deformação máxima é um critério condicionante. No caso da combinação quase-permanente, o critério de deformação máxima (δ_{max}) varia entre $\delta/500$ (mais restrita) e $\delta/250$, dependendo do tipo de edifício, (CNR-DT 205/2007).

Salienta-se que certos materiais, como é o caso de algumas espumas e do GFRP, apresentam uma fluência considerável. Nesse sentido, o dimensionamento dos painéis sanduíche deve considerar o efeito de fluência. Na prática é comumente usada a teoria da elasticidade em prol da teoria da viscoelasticidade (modelos viscoelásticos). Assim, e numa fase inicial, a fluência pode ser tida em conta pela redução do módulo de elasticidade e de distorção através dos

respetivos coeficientes de fluência (variam consoante o tempo), tal como se mostra na expressão abaixo, (CNR-DT 205/2007):

$$E_L(t) = \frac{E_L}{1 + \phi_E(t)} \quad (2.26)$$

$$G_{LT}(t) = \frac{G_{LT}}{1 + \phi_G(t)} \quad (2.27)$$

Segundo a CNR-DT 205/2007, o coeficiente de viscosidade devido à deformação longitudinal, $\phi_E(t)$, e deformação de corte, $\phi_G(t)$, podem ser obtidos dos fabricantes. Alternativamente, podem ser usados os valores indicados na tabela abaixo (*Table 6-2* da CNR-DT 205/2007).

Tabela 2.7 - Coeficiente de viscosidade devido às deformações longitudinal e de corte, para diferentes estágios de tempo (CNR-DT 205/2007).

t (tempo)	$\phi_E(t)$	$\phi_G(t)$
1 ano	0.26	0.57
5 anos	0.42	0.98
10 anos	0.50	1.23
30 anos	0.60	1.79
50 anos	0.66	2.09

2.4.4 Estado Limite Último – Critérios dos modos de rotura

Num painel sanduíche existem diversos modos de rotura que podem limitar e condicionar a capacidade resistente do mesmo. A capacidade de carga depende dos materiais das lâminas, do núcleo e da aderência entre eles. Além disso, depende também das dimensões do painel, como a espessura, a largura ou a forma das lâminas, e da geometria da estrutura em si, nomeadamente do vão, da largura dos suportes ou das fixações. Conjuntamente, a idade do painel, a história de carregamento, a humidade e temperatura influenciam a capacidade resistente. Com o objetivo de determinar o desempenho do painel é possível realizar ensaios experimentais; contudo, é importante prever esse comportamento por meio analítico e numérico. Assim sendo, é essencial

conhecer as propriedades dos materiais que compõem o painel em questão, assim como o processo de produção envolvido, (Davies, 2001).

De um modo geral, de entre os diversos modos de rotura destacam-se, (Ascione *et al.*, 2016a; Davies, 2001):

(i) Rotura das lâminas

a. Tracionadas

Este modo de rotura deve-se à insuficiente espessura do painel e à espessura e resistência das faces, (Ascione *et al.*, 2016a). Normalmente este tipo de rotura não é condicionante uma vez que os materiais utilizados nas faces de um painel sanduíche providenciam uma elevada resistência de tração (metal e materiais compósitos). Contudo, no caso de certos materiais, como a madeira e o betão, este modo de rotura pode ser relevante uma vez que estes materiais apresentam uma resistência à tração inferior aos anteriormente mencionados. No caso de esforços combinados de tração e flexão este efeito é agravado. Assim, este tipo de rotura é suscetível de acontecer a meio vão (momento positivo) e na zona de apoio (momento negativo) (Figura 2.51), (Davies, 2001).

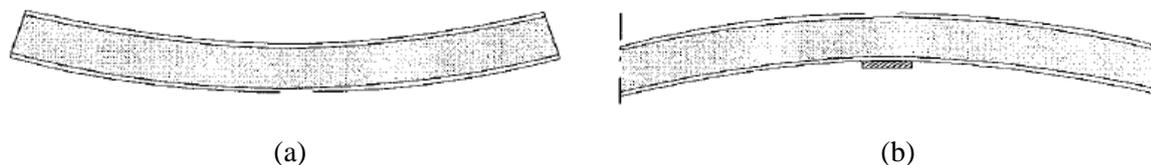


Figura 2.51 - Rotura por tração das faces: (a) meio vão e (b) na zona do apoio intermédio (adaptado de (Davies, 2001)).

Na presença de painéis sanduíche simétricos (faces idênticas), e se a contribuição do núcleo para a rigidez flexão e axial for desprezada, então a tensão última de tração na face “i” é, (Ascione *et al.*, 2016a):

$$\sigma_{sd}^i = \frac{M_{sd}}{t_i h b} + \frac{N_{sd}}{2 b t_i} \tag{2.28}$$

onde M_{sd} é o momento de flexão máximo, N_{sd} é a carga axial máxima, t_i é a espessura da face “i”, b é a largura do painel sanduíche e h é a distância entre o centro da lâmina superior e o centro da lâmina inferior. A equação que se segue deve ser satisfeita.

$$\sigma_{sd}^i \leq f_{i,d}, \text{ para } i=1,2 \quad (2.29)$$

onde, $f_{i,d}$ é o valor da resistência de compressão ou tração da face “i”.

No caso dos painéis sanduíche não simétricos (faces com espessuras e/ou materiais diferentes), a expressão (2.24) não é válida uma vez que a posição do eixo neutro muda e existe uma distribuição de tensão nas faces diferente. Além disso, o eixo neutro, é diferente na direção X e Y devido à anisotropia das camadas. Deste modo, é preciso estimar uma nova repartição de tensões com base numa análise mais detalhada.

b. Comprimidas

Segundo Davies (2001), a força de compressão de uma face pode ser limitada pela cedência do material (Figura 2.52). A resistência da lâmina depende do tipo de material, forma e espessura da mesma.

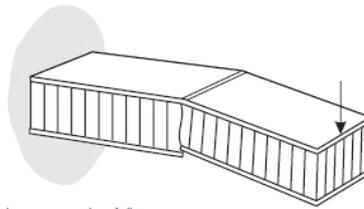


Figura 2.52 - Ruptura da lâmina comprimida (COMPOSITES, 2000).

(ii) Encurvadura global

Este modo de ruptura (Figura 2.53) deve-se à insuficiente espessura do painel ou à insuficiente rigidez de corte do núcleo quando o painel é sujeito a esforços de compressão, (Ascione *et al.*, 2016a).



Figura 2.53 - Encurvadura global (Ascione *et al.*, 2016a).

Em Ascione *et al.* (2016a), é apresentada uma expressão aproximada que permite estimar a carga de encurvadura fatorizada de uma forma aproximada, $P_{c,Rd}$ (provavelmente diferente na direção x e y) de uma estrutura sanduíche com faces finas ou espessas:

$$P_{c,Rd} = \frac{P_{cb,Rd} \times P_{cs,Rd}}{P_{cb,Rd} + P_{cs,Rd}} \quad (2.30)$$

onde,

- $P_{cb,Rd}$ representa a parte da carga crítica devido à flexão:

$$P_{cb,Rd} = \frac{\eta_c}{\gamma_M} \frac{\pi^2 D}{(L_0)^2} \quad (2.31)$$

- L_0 é o comprimento de encurvadura na direção analisada, que depende das condições de fronteira;

- D é a rigidez de flexão equivalente e é calculada tendo em conta a variação do módulo de Young ao longo da coordenada Z, e a posição e momento de inércia de cada camada, tal como na teoria clássica de laminados. Para estruturas sanduíches simétricas, D é dado como, (adaptado (Allen, 2013; Ascione *et al.*, 2016a)):

$$D = D_{faces} + D_{núcleo} = \frac{E_f b t_f^3}{6} + \frac{E_f b t_f h^2}{2} + \times \frac{E_c b t_c^3}{12} \quad (2.32)$$

em que, E_f e E_c são os módulos de elasticidade das lâminas e do núcleo, b é a largura (em muitas formulações considera-se $b=1$), t_f é a espessura das lâminas, t_c é a espessura do núcleo e h (na formulação de Allen é d) é a distância entre os centros de gravidade das lâminas.

Para estruturas sanduíche com lâminas finas e núcleo fraco, então, (Ascione *et al.*, 2016a):

$$D = \frac{E_f b t_f h^2}{2} \quad (2.33)$$

Para estruturas sanduíche com faces diferentes (não simétrica) a posição do eixo neutro, d , tem de ser determinada. Devido à anisotropia das faces, o eixo neutro pode ser diferente na direção x e y do painel. A posição do eixo neutro na direção x é medido desde a camada extrema da face inferior:

$$\begin{aligned} & d(E_{f1}t_{f1} + E_{f2}t_{f2} + E_c t_c) \\ & = E_{f1} \left(\frac{t_{f1}^2}{2} + t_{f1}(t_{f2} + t_c)t_c \right) + E_{f2} \left(\frac{t_{f2}^2}{2} \right) + E_c \left(\frac{t_c^2}{2} + t_{f2}t_c \right) \end{aligned} \quad (2.34)$$

Com o índice 1 para a face superior e 2 para a inferior. Deste modo, a rigidez à flexão equivalente é dada por, (Ascione *et al.*, 2016a):

$$\begin{aligned} D = & \frac{E_{f1}t_{f1}^3}{12} + \frac{E_{f2}t_{f2}^3}{12} + \frac{E_c t_c^3}{12} + E_{f1}t_{f1} \left(h + \frac{t_{f2}}{2} - d \right)^2 + E_{f2}t_{f2} \left(d - \frac{t_{f2}}{2} \right)^2 \\ & + E_c E t_c \left(\frac{h + t_{f2}}{2} - d \right)^2 \end{aligned} \quad (2.35)$$

$P_{cs,Rd}$ diz respeito à carga crítica devido ao esforço transversal e assume-se que é igual à rigidez de corte factorizada S_d , que é dada como, (Ascione *et al.*, 2016a):

$$s_d = \frac{\eta_c G h}{\gamma_{M2} k} \quad (2.36)$$

em que,

- G é o módulo de corte global
- k é um fator de corte adequado, que para placas retangulares homogéneas é igual a 6/5.

Para estruturas sanduíche k pode ser estimado por:

$$k = \frac{t_c}{h^2} \approx 1 \quad (2.37)$$

se $G_{\text{iff}} \gg G_{\text{ctc}}$. Com G_f , e G_c representando o módulo de corte das faces e núcleo, respetivamente. Para outras situações, k pode ser calculado por outros métodos (por exemplo, método dos elementos finitos ou equilíbrio de energia). Isto porque a expressão (2.33) não tem em conta o efeito das imperfeições geométrica e só dever ser usado numa fase preliminar, (Ascione *et al.*, 2016a).

(iii) Encurvadura global

Por vezes este modo de rotura (Figura 2.54) ocorre no seguimento, e como consequência, da encurvadura global. Este modo acontece na presença de estruturas sanduíche com lâminas muito finas, baixa resistência ao corte do núcleo e baixa resistência do adesivo ao corte, (Ascione *et al.*, 2016a).

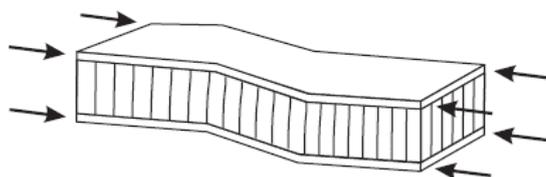


Figura 2.54 - Instabilidade por corte (Davies, 2001).

A carga crítica para que este tipo de rotura ocorra é deduzida a partir da expressão geral da encurvadura global. Contudo, este caso apenas se contabiliza a componente da tensão de corte ($P_{cs,Rd}$):

$$P_{cr,Rd} = P_{cs,Rd} \quad (2.38)$$

e consequentemente, a instabilidade por corte não acontece se:

$$\sigma_{i,cd} < f_{i,cd} \quad i = 1,2, \quad (2.39)$$

onde $\sigma_{i,cd}$ representa o estado de tensão de compressão fatorizada na face “i” e $f_{i,cd}$ a resistência de compressão dessa mesma face. A verificação deve ser feita para ambas as direções (X e Y).

(iv) Rotura por instabilidade local das lâminas (face *wrinkling*), devido a esforços de compressão

Segundo Davies (2001), a força de compressão de uma face pode ser limitada pela cedência do material ou, mais provavelmente, pela encurvadura local da mesma (Figura 2.55). A resistência de compressão, quando limitada pela *wrinkling failure*, depende da espessura e forma das lâminas bem como da resistência e rigidez do material do núcleo.

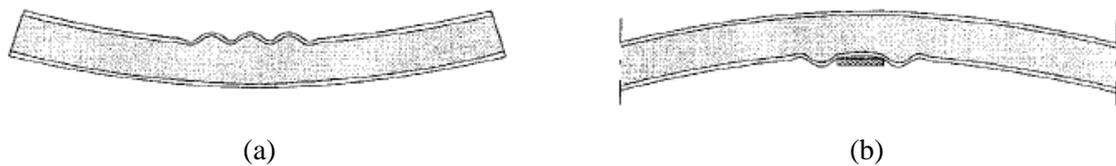


Figura 2.55 - Rotura por (a) encurvadura local a meio vão e (b) encurvadura local na zona de apoio intermédio, devido a esforços de compressão (Davies, 2001).

Quando o material atinge a tensão limite de enrugamento, as faces comprimidas podem enrugur tanto para dentro como para fora. Quando a lâmina enrugur para dentro esta comprime o núcleo (Figura 2.56a), provocando o esmagamento do mesmo. Pelo contrário, se enrugur para fora, então a rotura pode ser condicionada pela rotura do adesivo caso este não suficientemente resistente (Figura 2.56), (Davies, 2001).



Figura 2.56 - (a) Instabilidade local: falha de compressão do núcleo e (b) instabilidade local: falha da ligação adesiva (adaptado de (Ascione *et al.*, 2016a)).

De modo a evitar esta falha, a tensão de compressão fatorizada, $\sigma_{wr,Rd}^{(i,\alpha)}$, na direção α ($=x,y$) da lâmina “i” não deve ser maior do que, (Ascione *et al.*, 2016a):

$$\sigma_{wr,Rd}^{(i,\alpha)} = \min \left\{ 0.5 \frac{\eta_c}{\gamma_{M2}} \sqrt[3]{E_\alpha^{(i)} E_c G_c}, 0.82 \frac{\eta_c}{\gamma_{M2}} E_\alpha^{(i)} \sqrt{\frac{E_c t_f^{(i)}}{E_\alpha^{(i)} t_c}} \right\} \quad (2.40)$$

onde $E_\alpha^{(i)}$ corresponde ao módulo de Young equivalente da face “i” na direção α , E_c e G_c são o módulo normal e de corte do núcleo, t_c e t_f representam a espessura do núcleo e das faces.

(v) Rotura por instabilidade devido ao enrugamento entre células do núcleo (*intracell buckling ou dimpling*) devido a esforços de compressão

Este modo de rotura (Figura 2.57) acontece quando os núcleos são apenas celulares ou corrugados. Acontece quando as faces são muito finas e as células do núcleo grandes (*large core cells*), (Ascione *et al.*, 2016a).

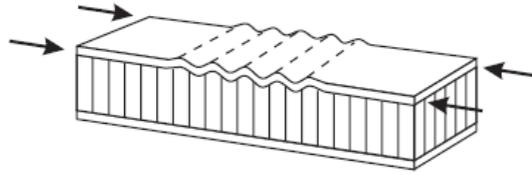


Figura 2.57 - Enrugamento entre células do núcleo (Davies, 2001).

Segundo Ascione *et al.* (2016a), na ausência de uma análise mais complexa, para que este tipo de rotura não aconteça, a tensão de compressão da lâmina não deve ser maior do que:

$$\sigma_{D,Rd}^{(i,\alpha)} = \frac{\eta_c}{\gamma_M} k \frac{E_\alpha^{(i)}}{\lambda_f} \left[\frac{t_f}{\Delta} \right]^2 \quad (2.41)$$

onde $\sigma_{D,Rd}^{(i,\alpha)}$ é o tensão de enrugamento crítico na direção $\alpha(=x,y)$ da face “i”, $E_\alpha^{(i)}$ é o módulo de young de compressão equivalente na direção α da face i, $\lambda_f = 1 - \nu_x \nu_y$, (ν_x e ν_y representam os rácios de Poisson na direção x ou y, respetivamente), t_f é a espessura da face. A variável Δ é dada em função do tamanho da célula do núcleo:

- para uma célula em favo de mel quadrado, Δ é o comprimento do lado da célula e $k \approx 2.5$;
- para uma célula em favo de mel hexagonal, Δ é o diâmetro inscrito da célula e $k \approx 2$.

(vi) Rotura por corte do núcleo ou do material de aderência entre o núcleo e a lâmina (delaminação)

Este modo de rotura pode ocorrer se a resistência de corte do núcleo ou a espessura do painel for insuficiente, (Ascione *et al.*, 2016a). As seções críticas para este tipo de rotura encontram-se a meia altura do núcleo, onde as tensões de corte são máximas e a densidade de algumas espumas é mínima, ou na ligação entre o núcleo e as faces devido à descontinuidade existente. Caso a espessura do núcleo e a sua rigidez de corte não sejam adequadas, pode dar-se uma rotura por corte do material de núcleo. A curva típica tensão-extensão do núcleo é aproximadamente linear, apresentando uma parte não linear. Se o comportamento do núcleo for não linear ou se a sua deformação de corte for muito elevada, pode tomar-se como critério de resistência última a tensão correspondente a 10% da deformação do núcleo. Dependendo do tipo de material, a rotura do núcleo pode acontecer de modo frágil ou por plastificação do núcleo, (Davies, 2001).



Figura 2.58 - Rotura por corte do núcleo (Davies, 2001).

De modo a evitar este tipo de rotura, deve ser verificada a seguinte equação, (Ascione *et al.*, 2016a):

$$V_{sd} \leq V_{Rd} \quad (2.42)$$

onde V_{Rd} representa a capacidade resistente e V_{sd} o esforço atuante. Tendo em conta a teoria de vigas sanduíche anteriormente referida e com base na expressão que reflete a tensão de corte é possível obter a força de corte máxima ($Q=V_{Rd}$). Caso se trate de uma secção simétrica com

faces finas e na eventualidade de se poder considerar uma tensão de corte constante ao longo do núcleo, o esforço de corte é dado por, (Ascione *et al.*, 2016a):

$$V_{Rd} = \tau_c b d \quad (2.43)$$

em que V_{Rd} representa a força de corte último; τ_c a resistência de corte do núcleo; b a largura e d a distância entre os centros de gravidade das lâminas.

De forma análoga, para uma secção assimétrica, é possível determinar o esforço de corte máximo. Na presença de lâminas planas e espessas, o esforço de corte é também suportado por estas. Contudo, é conservativo estimar a resistência de corte do painel com base na equação acima uma vez que é o núcleo que absorve a maior parte desse esforço. Para fins práticos, o comportamento não linear da resposta tensão-extensão do material do núcleo em estado limite último põe em causa a sua precisão, pelo que é suficiente estimar um valor aproximado da resistência, (Davies, 2001).

Caso as lâminas sejam perfiladas então a distribuição de tensões de corte ao longo da largura do painel não é constante. As tensões de corte tendem a concentrar-se nos locais onde a distância entre lâminas é menor. Neste caso, deve-se recorrer aos métodos numéricos uma vez que são mais eficazes. Se existir uma variação de densidade e rigidez da espuma no núcleo ao longo do painel, a análise torna-se ainda mais complexa. Mais uma vez, pode estimar-se a resistência de corte com a equação acima, uma vez que é conservativo. Contudo, deve-se validar experimentalmente a mesma, (Davies, 2001).

Outro modo de rotura relaciona-se com a componente de corte na ligação entre as faces e o núcleo. Associado às tensões de corte no painel geram-se tensões tangenciais na interface entre os materiais. Se as tensões tangenciais forem superiores à resistência última do adesivo, então a rotura é condicionada pela zona de ligação entre os materiais (Figura 2.59).

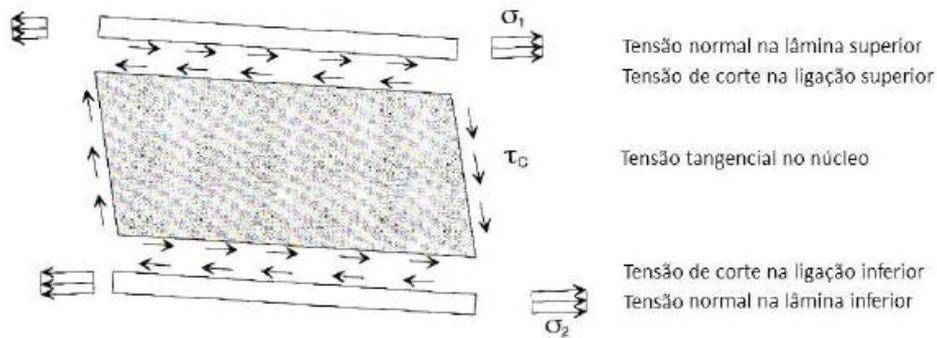


Figura 2.59 - Tensões nas faces, interface e núcleo (Davies, 2001).

(vii) Rotura por esmagamento da lâmina e do núcleo junto a um apoio

A reação de apoio pode causar forças de compressão ou tração na ligação entre o suporte e o painel sanduíche (Figura 2.60).

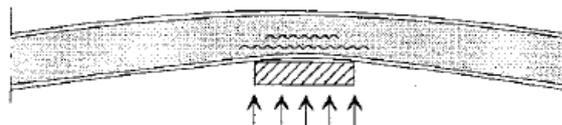


Figura 2.60 - Resistência da face e núcleo no apoio (Davies, 2001).

Como mostra a Figura 2.61, na zona de apoio, o painel pode romper por (a) por corte, (b) por esmagamento do núcleo ou (c) por enrugamento da lâmina devido à sua compressão. Além disso, a capacidade de carga pode ser condicionada pela combinação destes modos de rotura.

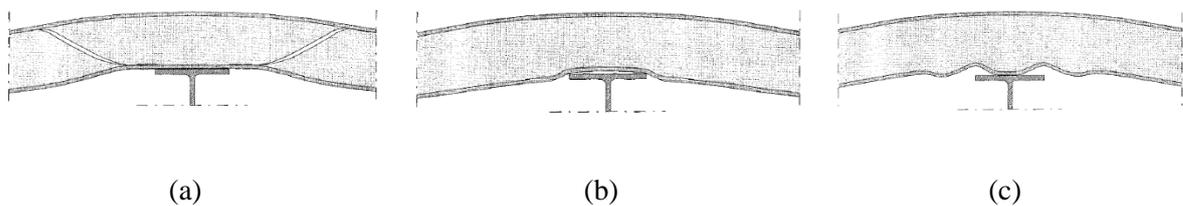


Figura 2.61 - Três modos de rotura diferentes devido ao apoio: (a) por corte; (b) por esmagamento do núcleo e (c) por enrugamento da lâmina comprimida (Davies, 2001).

A distribuição da pressão de contacto entre a estrutura de suporte e o painel sanduíche depende da flexibilidade face superior da viga, (Davies, 2001).

A força de reação do apoio (F) provoca uma distribuição de tensões (q_s) na zona de contacto que, por sua vez, provocam esforços de compressão e de corte no núcleo e momentos fletores e esforços de corte nas faces. Se se desprezar a interação entre as forças de compressão na face e a reação de apoio no cálculo, podem-se admitir 4 distribuições de tensões de compressão no núcleo (Figura 2.62). As formulações associadas a cada uma dessas distribuições encontra-se em (Davies, 2001).

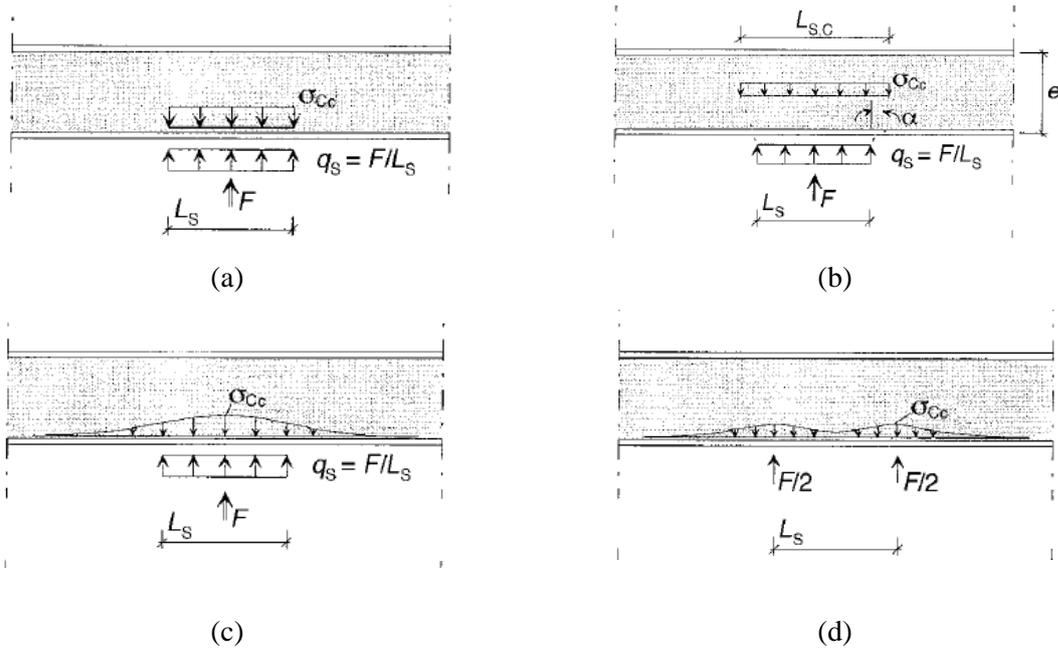


Figura 2.62 - Diferentes suposições para a distribuição de tensão no núcleo devido à reação de apoio: (a) distribuição de tensões no núcleo igual à que se desenvolve ao longo da largura de apoio; (b) degradação das tensões de compressão ao longo do núcleo; (c) distribuição mais precisa das tensões no núcleo e (d) distribuição mais parecida com o real (Davies, 2001).

Davies (2001), apresenta ainda um outro modelo que contempla a interação entre a força axial de compressão e a reação de suporte (Figura 2.63).

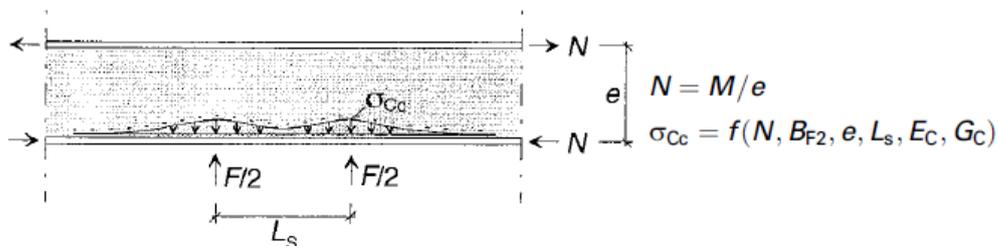


Figura 2.63 - Distribuição de tensões no núcleo mais realística (Davies, 2001).

(viii) Esmagamento local do núcleo

De modo análogo à reação de apoio, a camada superior pode estar sujeita a cargas concentradas. Assim sendo, é conveniente que o núcleo possuía uma resistência à compressão adequada para que não haja o esmagamento local do núcleo, (Ascione *et al.*, 2016a) (Figura 2.64).

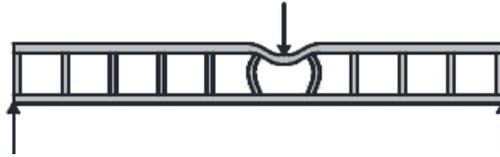


Figura 2.64 - Esmagamento local do núcleo (Ascione *et al.*, 2016a).

O esmagamento local pode ser causado por forças transversais distribuídas em pequenas áreas. Na prática, a carga deve ser aplicada sobre uma área suficiente grande (A_{cr}). Esta área é dada como, (Ascione *et al.*, 2016a):

$$A_{cr} = \frac{P}{f_{c,d}^{(core)}} \quad (2.44)$$

onde P é a carga e $f_{c,d}^{(core)}$ a resistência à compressão do material do núcleo fatorizada.

(ix) Rotura por tração ou corte nas zonas de fixação

O modo de rotura das faces e do núcleo na zona de apoio dependem em muito do sistema de fixação utilizado. Geralmente os painéis sanduíche são fixados a uma estrutura de suporte através de conetores de ligação, como por exemplo os parafusos e os encaixes. Se o painel for suportado por uma ligação contínua e rígida, então é possível analisar a resistência do painel como se tratasse de uma reação de apoio. Contudo, se a ligação for aparafusada, a flexibilidade e a resistência do painel naquela zona também diferem. Na presença de esforços de tração, surgem imperfeições significativas nas faces e conseqüentemente uma redução da resistência de compressão que dependerá da espessura e geometria da face e da localização dos parafusos. Também a cabeça do parafuso pode causar tensões de compressão no núcleo, resultando num esmagamento local do núcleo. O modo de rotura final, por arrancamento, é afetado pela

resistência do núcleo e faces. A combinação do modo de rotura de instabilidade da face e de arrancamento do parafuso encontra-se em fase de estudo uma vez que estes fenómenos têm sido estudados isoladamente, (Davies, 2001).

Quando se utilizam parafusos para ligar o painel sanduíche a uma outra estrutura de suporte os esforços a ter em conta são os de tração e corte. Enquanto as forças de tração se devem à ação do vento e à variação térmica, as forças de cortes relacionam-se com a expansão térmica das faces, efeito diafragma e peso próprio. Os modos de rotura associados a estes esforços estão representados na Figura 2.65, (Davies, 2001).

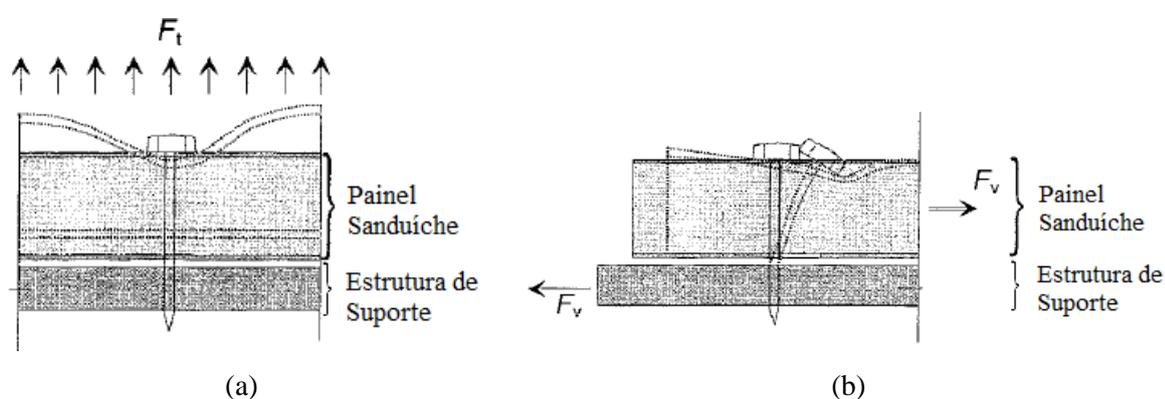


Figura 2.65 - Rotura pela ligação (i) por tração e (ii) por corte (adaptado de (Davies, 2001)).

Davies (2001) apresenta expressões que permitem calcular a resistência de corte dos parafusos, uma vez que estes apenas transmitem o esforço de corte entre a lâmina inferior e o suporte. Também ostenta expressões para calcular a tensão de compressão do núcleo e a interação entre o esforço de corte introduzido pelos parafusos e o esforço axial da lâmina.

CAPÍTULO 3

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM PUR

3.1 Introdução

Nas diversas reuniões realizadas pelo consórcio do Projeto EasyFloor, foi estabelecido que o painel sanduíche híbrido a desenvolver é constituído por um núcleo em espuma de poliuretano com uma densidade de 70 kg/m^3 . Neste contexto face ao pouco conhecimento que existe sobre este material, torna-se fundamental proceder à sua caracterização do ponto de vista mecânico. Como se sabe, as principais funções do núcleo consistem em estabilizar ambas as faces e transportar a maior parte das cargas de corte. Dado que um dos modos de rotura mais frequentes está relacionado com a resistência ao corte do núcleo é, portanto, fundamental caracterizar o material ao corte para que seja possível avaliar o comportamento do painel sanduíche quando solicitado ao esforço transversal a curto e a longo prazo. Assim, no âmbito do presente trabalho será realizado o estudo experimental ao corte de uma espuma de poliuretano (PUR). De modo a complementar a análise experimental, é realizada a caracterização mecânica à compressão e à tração do PUR em estudo. O presente capítulo inclui também dois tipos de simulações numéricas com recurso a *software* de elementos finitos: (i) uma componente das simulações está relacionada com a necessidade do desenvolvimento da configuração de ensaio ao corte e outra componente (ii) com as simulações, em regime não linear, dos ensaios de corte realizados, onde se compara a resposta numérica com a experimental.

Com os ensaios de corte pretende-se determinar a resistência ao corte, a tensão máxima de corte e correspondente distorção, bem como o módulo de distorção. Importa referir que os ensaios de corte até à rotura, nomeadamente o nível de carga, servirão de base para os ensaios de fluência a serem realizados numa fase posterior à presente dissertação. Com os ensaios de compressão e tração pretende-se determinar a resistência e módulo de elasticidade em compressão, assim como a resistência e o módulo de elasticidade em tração, respetivamente.

A campanha experimental foi realizada no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST). Esta campanha tem um papel relevante do ponto de vista da caracterização material, em particular do PUR, pois os materiais que constituem os painéis sanduíche apresentam uma elevada variabilidade nas suas propriedades, devido aos processos de produção e matérias-primas usadas.

3.2 Programa experimental

3.2.1 Ensaios de compressão

Os ensaios de compressão realizaram-se de acordo com as recomendações indicadas na ASTM C 365/C 365M - 05 “*Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores*”, (ASTM, 2005). Este método de ensaio consiste em colocar a amostra entre dois pratos metálicos, submetendo-a a uma compressão uniaxial. A força é medida pelo equipamento e a extensão é dada pelo quociente entre deslocamento axial entre pratos de carga e a altura inicial do provete. A norma recomenda a utilização de pelo menos 5 provetes, no entanto permite a sua redução caso os ensaios sejam válidos e os resultados regulares. Os provetes podem ser de secção quadrada ou circular com uma área máxima de 10000 mm². No entanto, no caso de materiais do núcleo contínuos como as espumas, a área mínima das faces deve ser de 625 mm². A norma ASTM C 365/C 365M - 05 ressalva ainda as interferências e a possível dispersão de resultados devido à existência de imperfeições do provete como a rugosidade, os vazios, a curvatura e outras descontinuidades. É referido ainda que os resultados podem ser afetados pelas condições ambientais em que os provetes se encontram e em que o ensaio é efetuado, sendo conveniente efetuá-los sob as mesmas condições. Relativamente aos modos de rotura, a norma ASTM C 365/C 365M - 05 refere que a rotura deve ser uniforme em toda a espessura, pois se o provete apresentar irregularidades geométricas, a deformação será superior junto a um dos bordos (provável encurvadura do provete). Na eventualidade da rotura estar confinada a um canto ou à borda do espécime, o ensaio deve ser considerado inválido.

Foram ensaiados 7 provetes cúbicos com 60 mm de aresta. Inicialmente mediram-se os provetes com um paquímetro e pesaram-se com uma balança digital, com uma precisão de 0.01 mm e 0.01 g, respetivamente (Tabela 3.1). Como se observa na tabela abaixo, os provetes não possuem as dimensões inicialmente previstas, ficando a dever-se este facto à dificuldade em o operador conseguir assegurar cortes precisos. Calculou-se a densidade do material e constatou-se que variava entre os 66.41 kg/m³ e os 68.32 kg/m³. Posteriormente, colocou-se o provete entre os pratos da máquina de ensaio e deu-se início ao mesmo. Na Tabela 3.1 encontra-se a caracterização geométrica dos provetes assim como a sua designação. A designação genérica é PUR70_CP_NN, em que PUR refere-se a material, CP diz respeito ao tipo de ensaio (*‘compression test’*) e NN representa o número do ensaio.

Os ensaios de compressão foram realizados sob controlo de deslocamento a uma velocidade de 0.50 mm/min até uma extensão que representa pelo menos aproximadamente metade da altura do provete. Para isso, foi utilizada uma máquina universal de ensaios hidráulica do LEST, modelo C12-DE-25KN-50-36-200 (versão 124), com 25 kN de capacidade de carga. O registo dos dados (força e deslocamento entre pratos), foi efetuado num computador através de uma unidade de aquisição de dados da marca RDP GROUP e modelo modular 600. A Figura 3.1 apresenta o sistema de ensaio e o respetivo equipamento utilizado.

Tabela 3.1 - Caracterização geométrica e designação dos provetes ensaiados à compressão.

Provete	Largura - b_1 [mm]	Largura - b_2 [mm]	Espessura - t [mm]	Densidade [kg/m ³]
PUR70_CP_01	61.08	61.83	54.61	67.00
PUR70_CP_02	61.30	61.80	54.92	66.41
PUR70_CP_03	61.06	61.66	58.28	66.81
PUR70_CP_04	60.36	61.16	61.40	67.67
PUR70_CP_05	60.59	61.38	55.65	66.67
PUR70_CP_06	61.51	61.27	55.80	68.32
PUR70_CP_07	61.14	61.41	56.35	66.46
Média	61.00	61.50	56.72	67.05
Desvio Padrão	0.37	0.24	2.21	0.65
CoV [%]	0.61	0.40	3.90	0.97

A Figura 3.1 ilustra uma das amostras durante as fases de ensaio.



Figura 3.1 - Configuração de ensaio: (a) fase pré-inicial do ensaio e (b) fase final do ensaio.

Segundo a norma ASTM C 365/C 365M - 05, a tensão máxima de compressão é dada pela seguinte relação:

$$F_z^{ftu} = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.1)$$

em que,

F_z^{ftu} - valor da tensão no provete, em [MPa];

P_{max} - força aplicada, em [N];

A - área contato da base, em [mm²];

O módulo de elasticidade de compressão pode ser deduzido da seguinte forma:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.2)$$

em que,

E - módulo de elasticidade de compressão [MPa];

$\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ diz respeito ao declive relativo ao ramo linear da curva tensão *versus* extensão.

3.2.2 Ensaio de tração

Os ensaios de tração realizaram-se de acordo com a ASTM C297/C297M - 04 “*Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions*”. Este ensaio consiste em submeter o material do núcleo a uma força de tração uniaxial uniformemente crescente até à rotura do material, (ASTM, 2004). A norma preconiza o uso de um sistema rotulado pois indica que a carga deve permanecer alinhada ao longo do ensaio de modo a não provocar qualquer tipo de excentricidade. Para além disso indica que, para que haja uma boa transmissão de carga para o provete, os blocos de carga devem ser suficientemente rígidos. Recomenda a utilização de pelo menos 5 provetes; no entanto permite a sua redução caso os ensaios sejam válidos e os resultados regulares. Os provetes podem ser de secção quadrada ou circular. No caso de materiais do núcleo contínuos como as espumas, a área mínima das faces deve ser de 625 mm².

Os ensaios devem ser efetuados sob as mesmas condições. Os ensaios apenas serão válidos caso a rotura não ocorra na interface blocos de carga/adetivo.

No total foram ensaiados 6 provetes cúbicos com 60 mm de aresta. Inicialmente mediram-se os provetes com um paquímetro e pesaram-se com uma balança digital, com uma precisão de 0.01 mm e 0.01 g, respetivamente. Na Tabela 3.2 encontra-se a caracterização geométrica dos provetes assim como a designação adotada. A designação genérica é PUR70_TT_NN, em que PUR refere-se a material, TT indica o tipo de ensaio (“*tensil test*”) e NN representa o número do ensaio.

Tabela 3.2 - Caracterização geométrica e designação dos provetes ensaiados à tração.

Provete	Largura - b₁ [mm]	Largura - b₂ [mm]	Espessura - t [mm]	Densidade [kg/m³]
PUR70_TT_01	61.43	60.23	60.57	68.49
PUR70_TT_02	57.89	61.76	61.67	66.16
PUR70_TT_03	61.18	60.98	61.51	67.07
PUR70_TT_04	60.74	59.45	58.43	66.78
PUR70_TT_05	59.60	61.50	55.82	66.20
PUR70_TT_06	60.67	61.37	54.36	66.82
Média	60.17	60.78	59.60	66.94
Desvio Padrão	1.30	0.85	2.22	0.85
CoV [%]	2.16	1.39	3.72	1.27

Após a caracterização geométrica, estes foram colados aos blocos de carga com recurso a adesivo de elevada aderência e resistência (SikaForce 7710 L100). Para o efeito, (i) limparam-se os provetes, (ii) preparou-se a mistura de acordo com a ficha técnica do produto e (iii) procedeu-se à colagem. De modo a garantir uma boa colagem utilizaram-se grampos. Retirou-se o excesso de adesivo e colocaram-se os provetes a curar numa câmara climática com condições climáticas controladas (HR=55% e T=18°C) até à data de ensaio.

Os ensaios foram realizados por controlo de deslocamento a uma velocidade de 0.50 mm/min. Para o efeito utilizou-se uma máquina universal de ensaios hidráulica do LEST, modelo CIL-DE-50KN-63-36-200 (versão 443) com 50 kN de capacidade de carga, do LEST. O registo de dados (força e deslocamento entre pratos), foi efetuado num computador através de uma unidade de aquisição de dados da marca RDP GROUP e modelo modular 600.

A Figura 3.2 apresenta o sistema de ensaio e a instrumentação utilizada. Tal como sugere a norma, o mecanismo concebido para o efeito é constituído essencialmente por blocos de carga e ligações rotuladas. Para medir a deformação vertical entre os blocos de carga utilizaram-se 4 LVDTs indutivos (*linear variable differential transducers* na literatura inglesa) com uma amplitude de ± 10 mm (com um coeficiente de linearidade de $\pm 0.24\%$ F.S.).

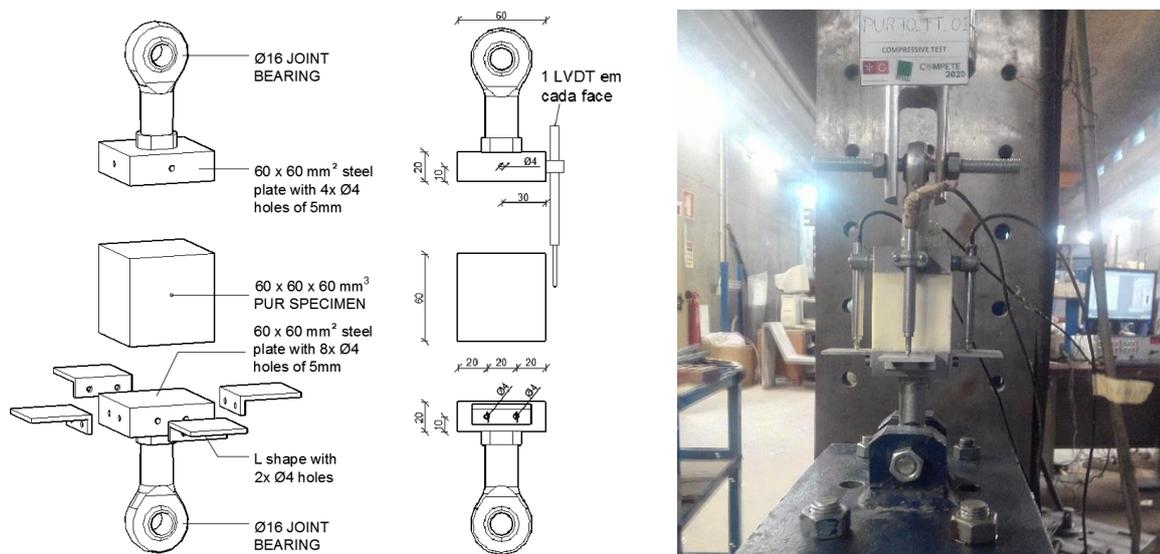


Figura 3.2 - Configuração de ensaio e a instrumentação usada: (a) esquema do provete e sistema de ensaio e (b) fotografia do ensaio com a instrumentação. As dimensões encontram-se em milímetros.

Segundo a norma ASTM C297/C297M - 04, a tensão de tração e o módulo de elasticidade podem ser calculados de acordo com a equação (3.3) e (3.4), respetivamente:

$$F_{max} = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.3)$$

em que,

F_{max} - valor da tensão máxima no provete [MPa];

P_{max} - força aplicada [N];

A - área de contato [mm^2];

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.4)$$

em que,

E - módulo de elasticidade de tração [MPa];

$\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ diz respeito ao declive relativo ao ramo linear da curva tensão *versus* extensão.

3.2.3 Ensaio de corte

As características mecânicas do PUR ao corte podem ser determinadas de forma indireta através de ensaios de flexão (ASTM C393-16) ou diretamente através de ensaios de corte em placa, e.g. em conformidade com a ISO 1922:2001(E) (espumas celulares rígidas) ou a ASTM C273-00 “*Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials*”. No presente trabalho optou-se pelo ensaio de corte em placa, por se tratar de um ensaio direto.

A ASTM C273-00 permite que o ensaio seja realizado aplicando-se uma força de compressão ou de tração. Enquanto que a ASTM C273-00 (Figura 3.3a) indica que o eixo de carregamento deve passar pela diagonal do provete, a norma ISO 1922:2001(E) (Figura 3.3b) propõe que o eixo de carregamento se encontra alinhado segundo o eixo vertical do provete. Uma outra diferença reside nas dimensões que as normas propõem para os provetes.

O ensaio de corte em placa consiste em colar um bloco de material do núcleo a duas placas metálicas. Aplicando uma carga nas extremidades rotuladas, estas sofrem uma deformação de corte devido ao deslocamento de uma placa em relação à outra por intermédio da deformação do poliuretano. Medindo o deslocamento relativo entre placas de carga, com um transdutor de deslocamentos ou extensómetro, é possível calcular a resistência e módulo de corte (cláusula 7.3 da ASTM C273-00). Para os respetivos cálculos, a norma supõe que todo o volume do material do núcleo se encontra num estado de tensão de corte uniforme (cláusula 8). Na norma ASTM C273-00 é referido que o ensaio não produz corte puro; no entanto, o comprimento do provete estipulado tem como objetivo minimizar o efeito das tensões secundárias (cláusula 3.2). Segundo esta, a largura do provete deve ser superior a 50 mm e o comprimento (L) não inferior a 12 vezes a espessura (t). A espessura deve ser igual à espessura do núcleo do painel sanduíche; contudo, é possível usar outra espessura apenas para determinar as propriedades do material (cláusula 5.1). Por fim, a presente norma refere que o ensaio deve ocorrer a uma velocidade 0.5 mm/min e que os provetes com rotura adesiva devem ser desprezados uma vez que a carga máxima não representa as verdadeiras propriedades do material. Apesar das principais diferenças supracitadas a norma ISO 1922-2001 segue o mesmo princípio de ensaio.

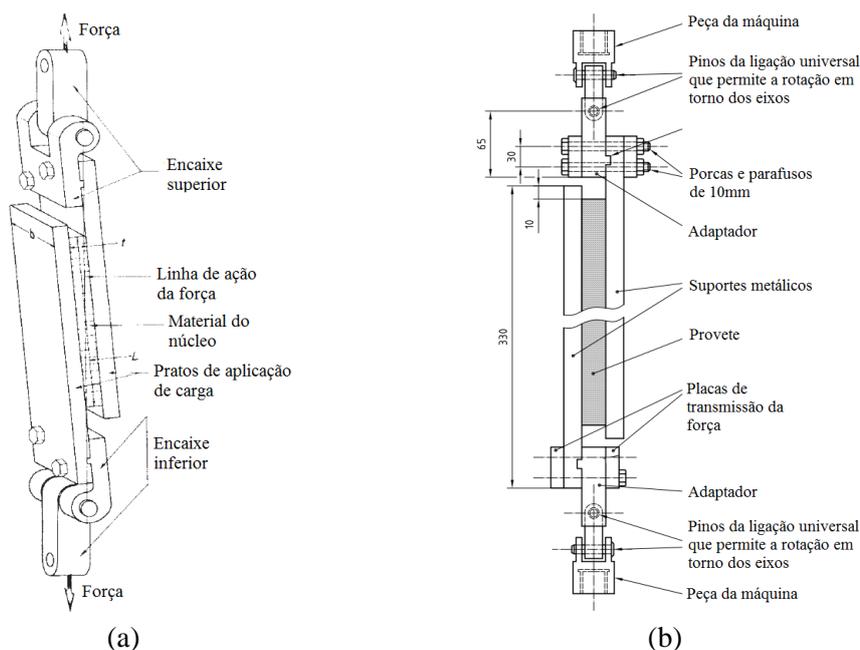


Figura 3.3 - Ensaios propostos pela (a) ASTM C273-00 e (b) ISO 1922:2001(E). Nota: as dimensões encontram-se em milímetros.

Tendo em conta as limitações económicas, materiais e laboratoriais, decidiu optar-se pelo desenvolvimento de uma configuração de ensaio similar à proposta pela ASTM C273-00 no que diz respeito: (i) ao alinhamento do carregamento e (ii) aos elementos que compõem os pratos de carga em aço. Nesse sentido, foram efetuadas simulações numéricas, baseadas no método dos elementos finitos, como objetivo de auxiliar a escolha da configuração de ensaio adequada. De seguida apresentam-se algumas das simulações efetuadas, assim como os principais resultados obtidos. As simulações numéricas foram realizadas no software de elementos finitos *FEMIX 4.0*, tendo sido usadas também as interfaces gráficas *GID* e *Drawmesh* onde se fez o pré e o pós-processamento (Sena-Cruz *et al.*, 2007).

Antes de mais, importa referir que o processo que levou à escolha do sistema de ensaio proposto (quer para os ensaios à rotura, quer para os ensaios de fluência) baseou-se nas normas referentes a este tipo de ensaio – acima referidas –, uma vez que a configuração resultou da adaptação dos esquemas de ensaio propostos nestas. O processo que levou à escolha final do sistema de ensaio foi realizado de forma faseada e iterativa até à obtenção de uma configuração que sujeitasse o provete de PUR a tensões de corte o mais uniformemente possível. Com base nos resultados obtidos a partir de cada uma das simulações efetuadas, a configuração do sistema de ensaio foi sendo melhorada em termos da geometria, dimensões do provete, condições de apoio, aplicação de carga, entre outras. Tal como referido anteriormente, apesar de se terem efetuado inúmeras

simulações numéricas, apenas se fará referência ao primeiro sistema proposto e ao sistema escolhido.

Em todas as simulações numéricas efetuadas recorreu-se a elementos finitos de 8 nós do tipo casca (*Mindlin Shell Quad*) para o aço e elementos finitos de volume com 20 nós do tipo volume (*Hexa Solid*) para a espuma de poliuretano. A integração numérica dos elementos de casca e volume, foi a *Gauss-Legendre* com 2×2 e $2 \times 2 \times 2$ pontos de integração, respetivamente. Foi adotado comportamento linear elástico para ambos os materiais (aço e PUR). Nas simulações efetuadas considerou-se ligação perfeita entre o provete de poliuretano e o perfil em aço. Por outro lado, em todas as malhas de elementos finitos procurou-se assegurar a relação entre as dimensões do elemento finito (maior/menor) inferior a 3. As simulações foram realizadas através da aplicação de uma carga pontual previamente definida (próxima da carga de corte de rotura da espuma de PUR) e das respetivas condições de apoio. Na Tabela 3.3 apresentam-se as propriedades adotadas para cada um dos materiais.

Tabela 3.3 - Propriedades elásticas dos materiais utilizados nas modelações.

	E	ν	γ	F
	[MPa]	[-]	[kg/m ³]	[N]
PUR	8	0.3	70	-6500
Aço	210×10^3	0.15	7850	

A título de exemplo, apresenta-se na Figura 3.4a e b aqueles que foram o primeiro e o último sistema de ensaio propostos. Em ambos os casos, enquanto a cor cinzenta representa as chapas de aço (elementos de casca), as cores azul e turquesa dizem respeito ao provete de poliuretano (elementos de volume).

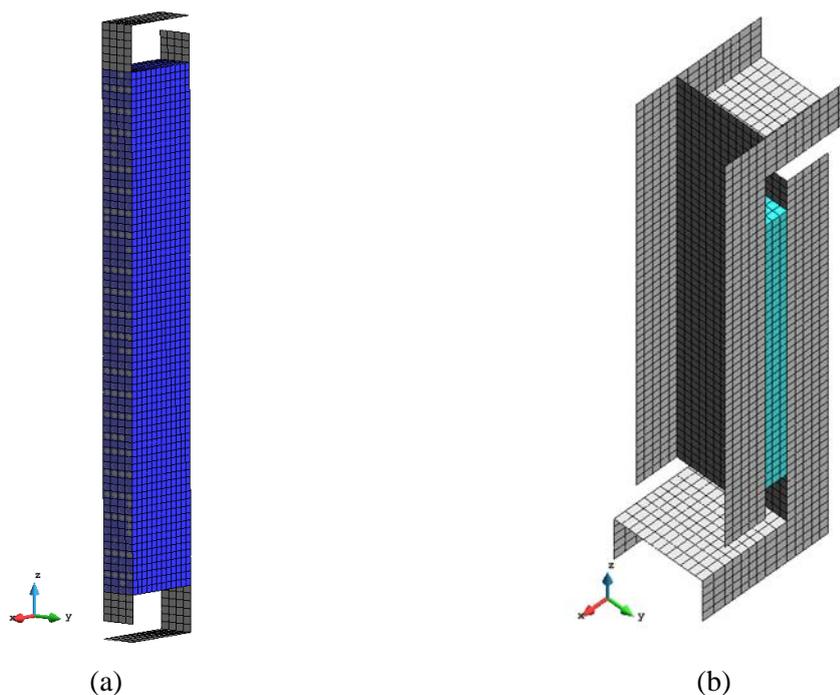


Figura 3.4 - Exemplos de modelos usados no desenvolvimento do sistema de ensaio: (a) Esquema (FEM) do 1º modelo proposto e (b) configuração em FEM relativa modelo adotado. Nota: os modelos apresentados dizem respeito ao provete com as dimensões de $120 \times 50 \times 720 \text{ mm}^3$ (a) e $30 \times 360 \times 120 \text{ mm}^3$ (b).

➤ **Simulação 1 - com recurso a chapas metálicas**

O primeiro modelo numérico consistiu no uso de chapas com uma espessura constante de 10 mm e um provete com as dimensões de $120 \times 50 \times 720 \text{ mm}^3$ perfazendo uma relação entre o comprimento do provete (L) e a espessura (t) igual a 6, relação esta próxima do recomendado pela norma (Figura 3.5b). Na presente simulação optou-se por aplicar uma força pontual numa das extremidades e fixar a outra (com todos os graus de liberdade de rotação livres) verticalmente alinhados (Figura 3.5a). Nesse contexto, foram testadas diferentes posições para a aplicação de força, nomeadamente: (i) ao longo do eixo de simetria do provete de PUR, e posteriormente (ii) ao longo de uma das faces (face de menor dimensão).

Aquando da análise dos resultados obtidos para ambas as posições de aplicação de carga, verificou-se que esta proposta não poderia ser viável, uma vez que as chapas metálicas apresentavam uma deformação demasiado elevada, i.e., não providenciavam a rigidez necessária ao sistema para que os parâmetros em análise fossem corretamente avaliados. Posteriormente, para ambas as hipóteses de carga, simulou-se a configuração de ensaio com chapas com uma espessura de 20 mm; contudo, apesar de se ter verificado uma melhoria nas

deformações obtidas (redução das mesmas), estas permaneciam elevadas. Relativamente aos diferentes casos de aplicação de força, optou-se por manter o caso (i), visto que o caso (ii) não melhorava em nada os resultados. Na Figura 3.5 apresenta-se a evolução do deslocamento vertical e a tensão de corte do modelo numérico em que as chapas possuem 20 mm de espessura. Como se observa, nas chapas onde é aplicada a carga ocorre um elevado deslocamento em Z ($\pm 3\text{mm}$) entre o menor bordo livre e o bordo ligado à chapa vertical.

Além disso, verifica-se que as chapas apresentam uma deformação de flexão não negligenciável no plano ZX. No caso das chapas verticais, tal conduz a importantes tensões de tração segundo X no provete de PUR. Consequentemente, constata-se que não é possível obter tensões de corte uniformes no provete.

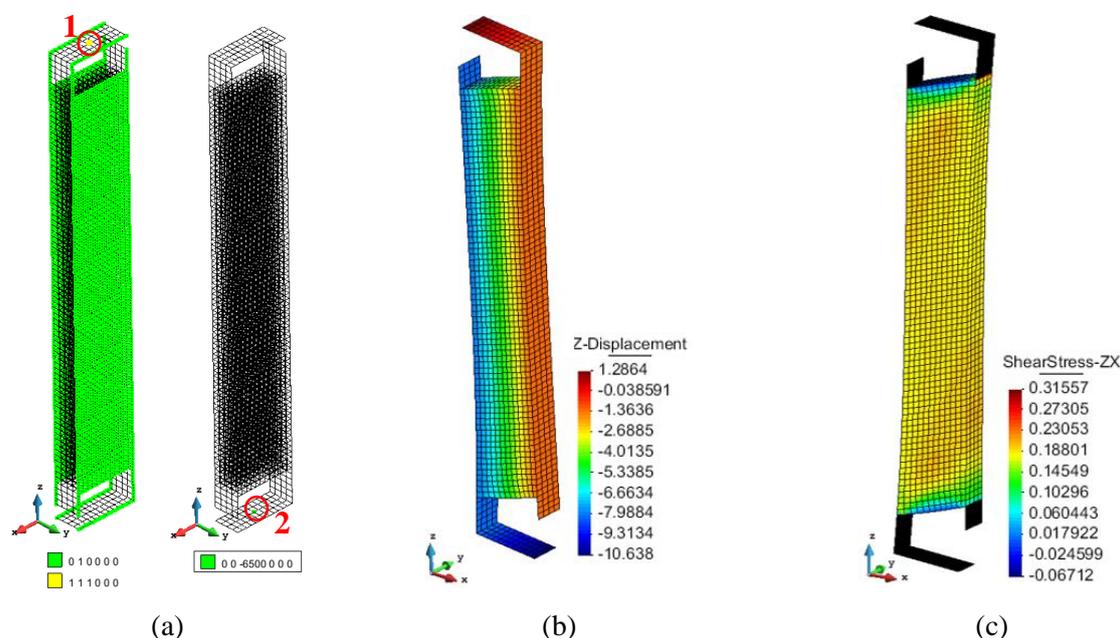


Figura 3.5 - Alguns dos resultados obtidos para a situação em que a chapa metálica possui 20 mm de espessura e a carga/reação de apoio encontram-se alinhadas verticalmente segundo os eixos de simetria do provete de PUR: (a) Apoios (esquerda) e carga aplicada em Z - 6500N (direita); (b) deslocamento em Z e (c) tensão de corte no plano ZX. Notas: os códigos “0” e “1” da figura (a) dizem respeito aos graus de liberdade em que existem condições de apoio (deslocamentos segundo X Y Z e rotações segundo X Y Z), sendo que os graus de liberdade impedidos têm o código “1”; os círculos a vermelho indicam os pontos onde foram aplicadas condições de apoio (pontos 1) e a carga (ponto 2).

Estas simulações numéricas permitiram concluir que a estrutura de suporte condiciona a resposta do provete de PUR. Nestas circunstâncias a solução passaria em aumentar a rigidez à flexão no plano XZ. Assim, optou-se pelo uso de perfis UPN120 comerciais, de modo a dar resposta aos problemas. Posteriormente procedeu-se ao estudo de viabilidade desta nova solução, tendo-se efetuado as respetivas simulações numéricas, que se apresentam de seguida.

➤ **Simulação do modelo final (com recurso a perfis UPN120). Exemplo de aplicação: provete 30×120×360 mm³**

Na presente simulação numérica, a geometria do bloco de poliuretano cumpre as recomendações da norma ASTM C273-00 e tem as dimensões de 30×360×120 mm³, ou seja, um $L/t=12$. As restantes dimensões da estrutura encontram-se apresentadas na Figura 3.10. Apesar do perfil UPN120 apresentar uma secção transversal variável, optou-se por modelar o perfil com a menor espessura que o mesmo apresenta, i.e. 7 mm.

Relativamente às condições de apoio (Figura 3.6), bloquearam-se os graus de liberdade no plano XZ dos elementos finitos que compõem o eixo de simetria do provete na direção Y, de modo a garantir a estabilidade do modelo. Adicionalmente, no nó do elemento finito onde se aplicou a carga pontual bloqueou-se também o grau de liberdade na direção X (ponto 2), para uma posterior validação da reação. No local de apoio da estrutura, tal como anteriormente referido bloqueou-se o deslocamento em X, Y e Z (ponto 1), permitindo apenas as rotações em torno de cada um dos eixos, com o objetivo de manter as forças verticalmente alinhadas, antes e após a deformação do provete.

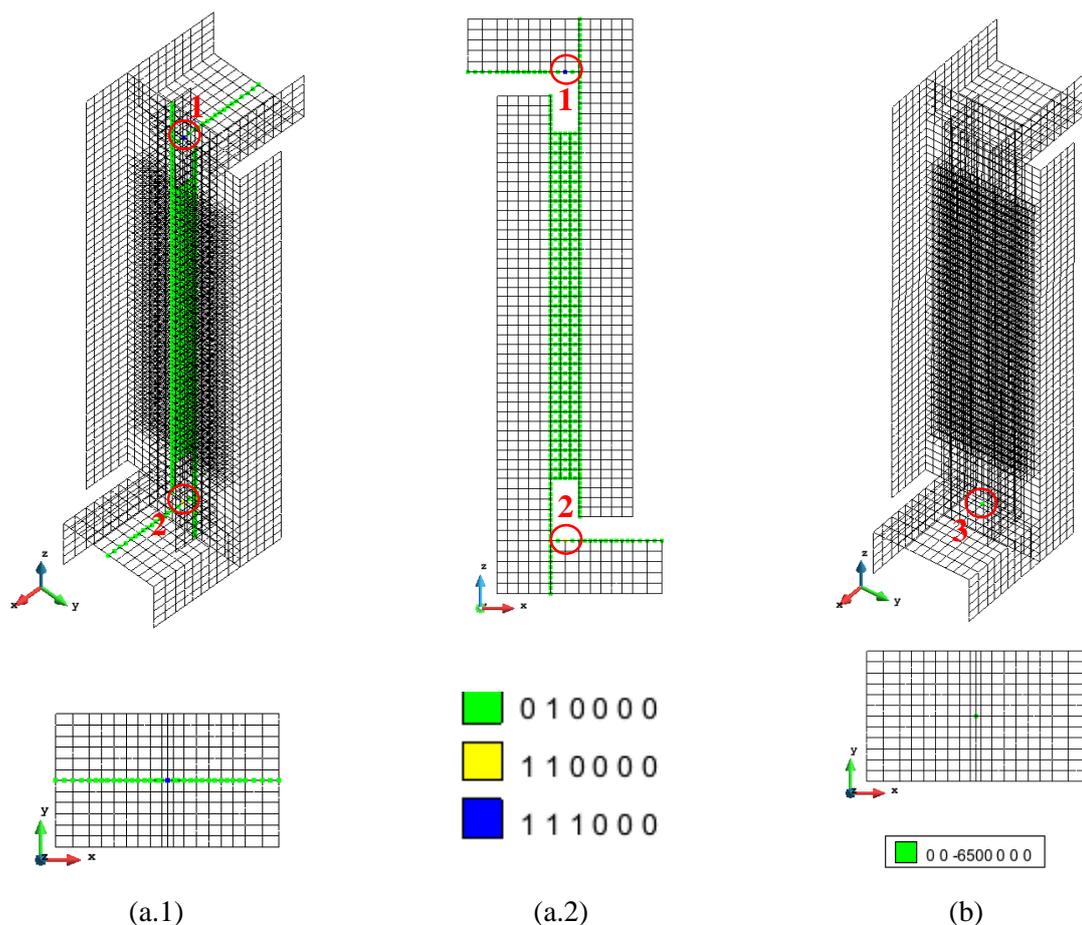


Figura 3.6 - (a) Condições de apoio e (b) carga pontual ($F=-6500N$): (a.1) perspectiva 3D (em cima) e planta (em baixo), (a.2) plano XZ (em cima) e legenda relativa aos graus de liberdade na direção X, Y, Z e respectivas rotações (1 significa que está bloqueado e 0 significa que está livre); (b) carga aplicada em perspectiva 3D. Notas: os círculos a vermelho indicam os pontos onde foram aplicadas condições de apoio (pontos 1 e 2) e a carga (ponto 3).

Pela análise dos deslocamentos nas direções X, Y e Z pode concluir-se que o sistema proposto confere uma rigidez adequada ao ensaio, expressa por uma deformação negligenciável da estrutura metálica em relação ao provete de PUR, como se constata através da observação da Figura 3.7. Numa análise mais cuidada desta figura, é visível uma ligeira deformação diferencial ao nível das abas da estrutura metálica, quer na zona de aplicação da carga quer na zona do apoio de reação (Figura 3.7b). Contudo, verificou-se que a diferença entre os deslocamentos na direção Z do ponto 1 e do ponto 2 (Figura 3.7) é reduzida (cerca de 0.6 mm). Os deslocamentos em Z apresentados pelo provete são uniformes ao longo de todo o seu comprimento, refletindo-se numa distorção uniforme dos elementos finitos, visível através da respetiva malha. A única exceção diz respeito às zonas extremas, onde os elementos apresentam uma distorção não uniforme, tal como seria de esperar devido à existência das fronteiras. Além disso, é também visível em ambas as extremidades do PUR uma pequena deformação na

direção Y dos elementos finitos (Figura 3.8a). Os deslocamentos observados no PUR na direção X confirmam que os elementos finitos que se encontram longe das extremidades deslocam-se essencialmente na direção Z, indicando que os mesmos apenas se encontram sujeitos ao corte (Figura 3.8b). Os elementos que se encontram nas extremidades do provete sofrem um pequeno deslocamento na direção X devido à flexão dos mesmos. Estes efeitos devem-se essencialmente à flexão do provete que é provocada pelas condições fronteira.

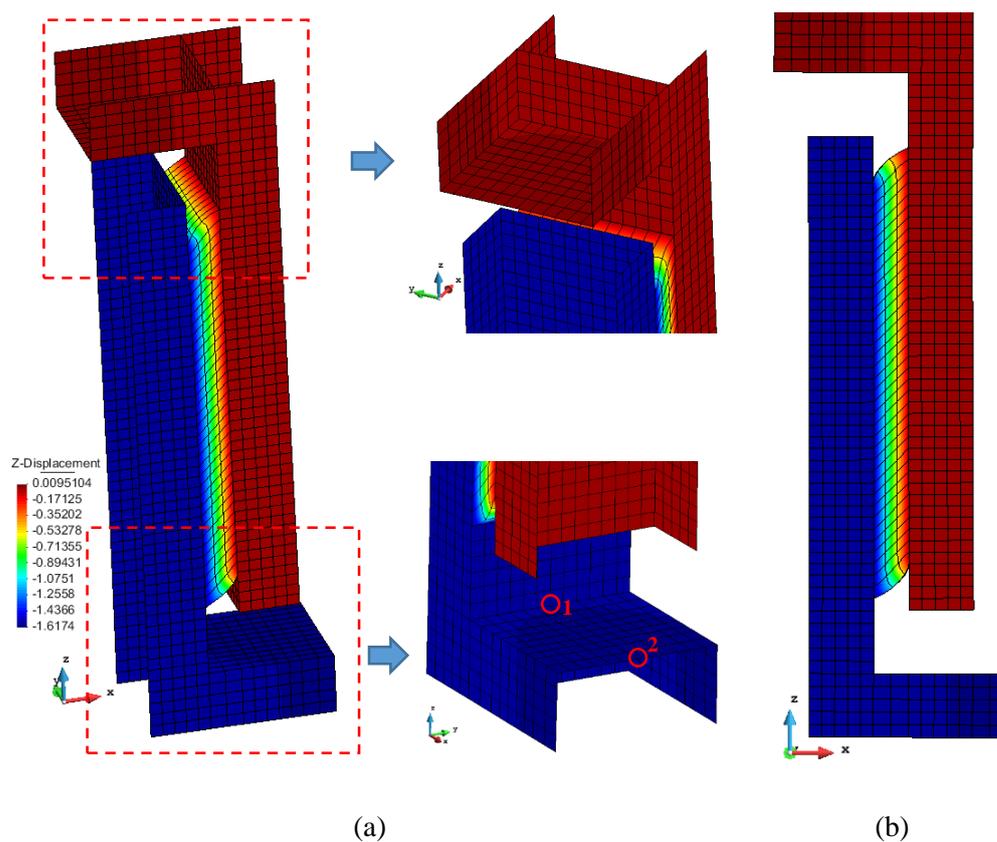


Figura 3.7 - Deslocamentos em z obtidos da simulação numérica: (a) perspetiva tridimensional e respetivos pormenores e (b) plano XZ.

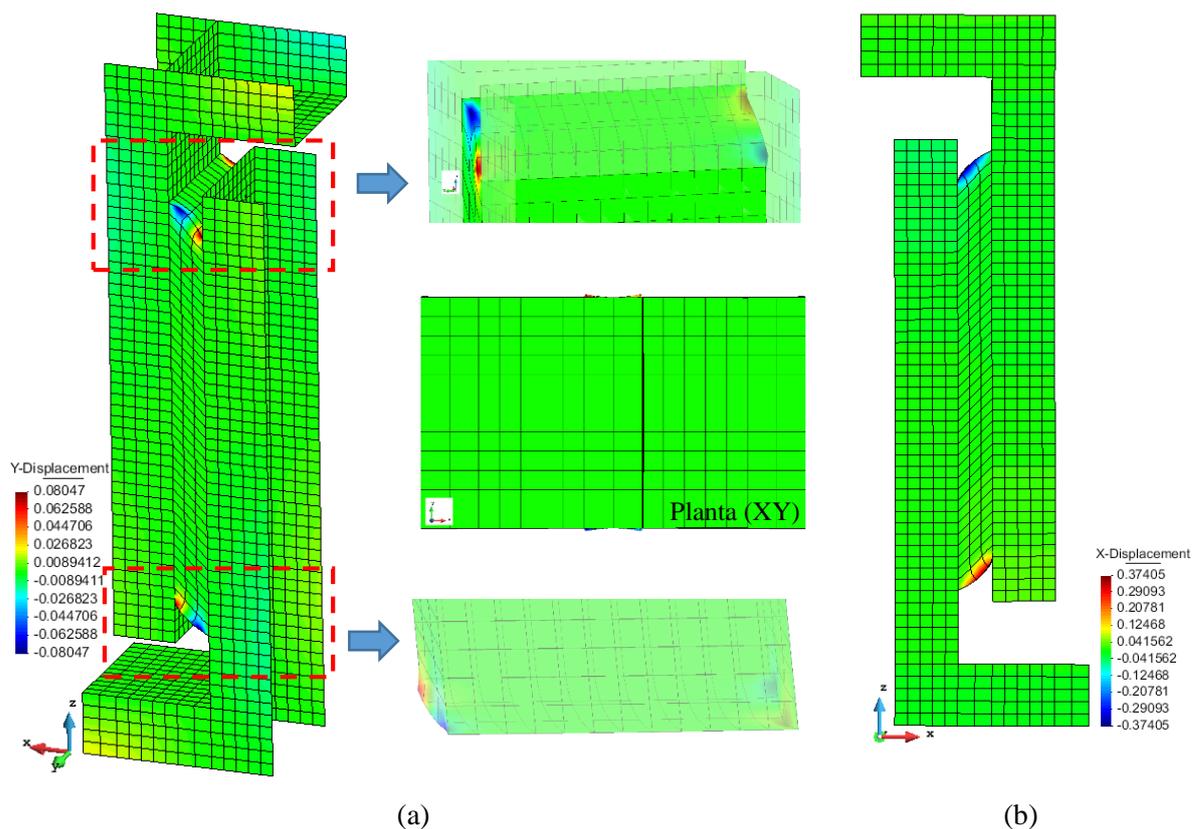


Figura 3.8 - Deslocamentos (X e Y) obtidos da simulação numérica: (a) perspectiva tridimensional e respetivos pormenores do deslocamento Y e (b) plano XZ referente ao deslocamento X.

Na Figura 3.9 apresenta-se a evolução das tensões de corte no provete de PUR no plano XZ. Analisando-se a figura conclui-se que a maior parte do provete se encontra sujeito a uma tensão de corte uniforme e constante (corte puro), principalmente na zona central. Já nas extremidades do provete ($\pm 45\text{mm}$, ou seja $1.5 \times$ espessura do provete, a partir de cada extremidade) observa-se uma concentração e distribuição de tensões não uniforme, que se deve sobretudo à flexão provocada pelas condições fronteira - entre o PUR e os perfis metálicos. Dado que o sistema de ensaio induz flexão nas extremidades do provete, haverá que posicionar os sensores de monitorização dos deslocamentos do provete junto à zona central do mesmo. A tensão de corte na zona central é aproximadamente igual a 0.1542 MPa . Em relação ao desenvolvimento total do provete, observa-se que esta tensão constante de corte ocorre numa extensão de $\pm 75\%$. Refira-se ainda que esta observação também é válida para nas direções X (espessura) e Y (profundidade).

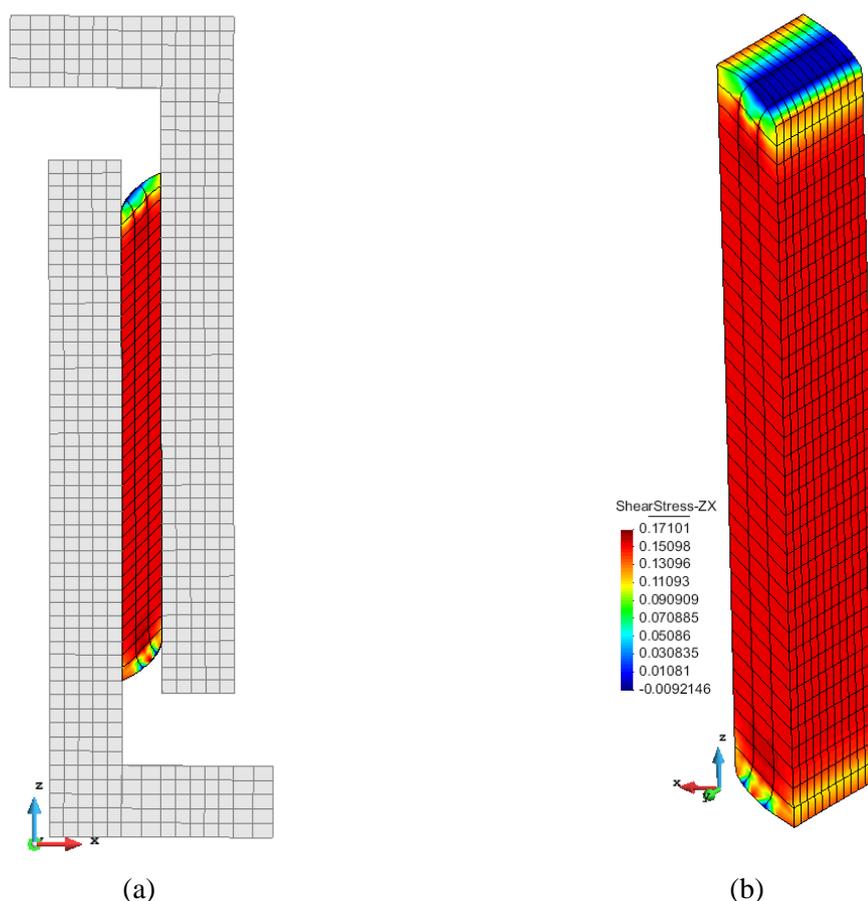


Figura 3.9 - Tensão de corte a que o provete de PUR se encontra sujeito: (a) plano XZ e (b) perspectiva geral do provete.

Com base no conhecimento da carga aplicada (P , em Newtons) e da área de corte ($L \times b$, em mm^2) do provete, é possível estimar a tensão de corte média (τ) através da expressão seguinte:

$$\tau = \frac{P}{Lb} = \frac{6500}{360 \times 120} = 0.1505 \text{ MPa} \quad (3.5)$$

Tal como esperado, o valor é muito próximo daquele que obteve na simulação numérica ($\tau=0.1542 \text{ MPa}$), sendo o erro de 2.4%.

Tendo em conta as propriedades consideradas na presente simulação numérica (ver Tabela 3.3) para o PUR e assumindo um comportamento linear isotrópico, calculou-se o módulo de distorção teórico, $G_{\text{PUR}}=(E/(1+\nu))=3.077 \text{ MPa}$, com o objetivo de comparar com o que se obteve da simulação numérica (Tabela 3.4). O módulo de distorção (G) foi obtido a partir da simulação numérica com base no deslocamento na direção Z da zona central (ver equação (3.7)). Ou seja, o G é calculado com base na tensão de corte média do provete. O erro foi calculado entre o

G_{PUR} e o G , tendo-se obtido o valor de 2.72%. Caso se comparasse o G_{num} e o G_{PUR} o erro seria de 0.31%.

Tabela 3.4 - Cálculo do módulo de distorção e do respetivo erro tendo como base os deslocamentos verticais (Z) na zona central do provete.

Distância ao longo da espessura (eixo X) [mm]	Deslocamentos verticais, u [mm]	Δu [mm]	ΔP [N]	G [MPa]	G_{num} [MPa]	G_{PUR} [MPa]	Erro [%]
0	-1.558						
10	-	1.508	6500	2.993	3.067	3.077	2.72
20	-						
30	-0.050						

Nota: O G_{num} foi calculado tendo por base a tensão de corte na zona central onde se retiraram os deslocamentos na direção Z ($\tau=0.1542$ MPa).

De um modo geral, tendo por base os resultados do modelo numérico referente à configuração de ensaio de corte, a presente proposta parece ser adequada para os objetivos pretendidos, nomeadamente no que respeita à pequena deformabilidade da estrutura metálica de suporte do provete e extensão do estado de tensão de corte constante ao longo do desenvolvimento do provete. Assim sendo, adotou-se pela presente configuração para os ensaios de corte à rotura e à fluência da espuma de poliuretano a estudar. A Figura 3.10 detalha o sistema de ensaio utilizado na presente campanha experimental.

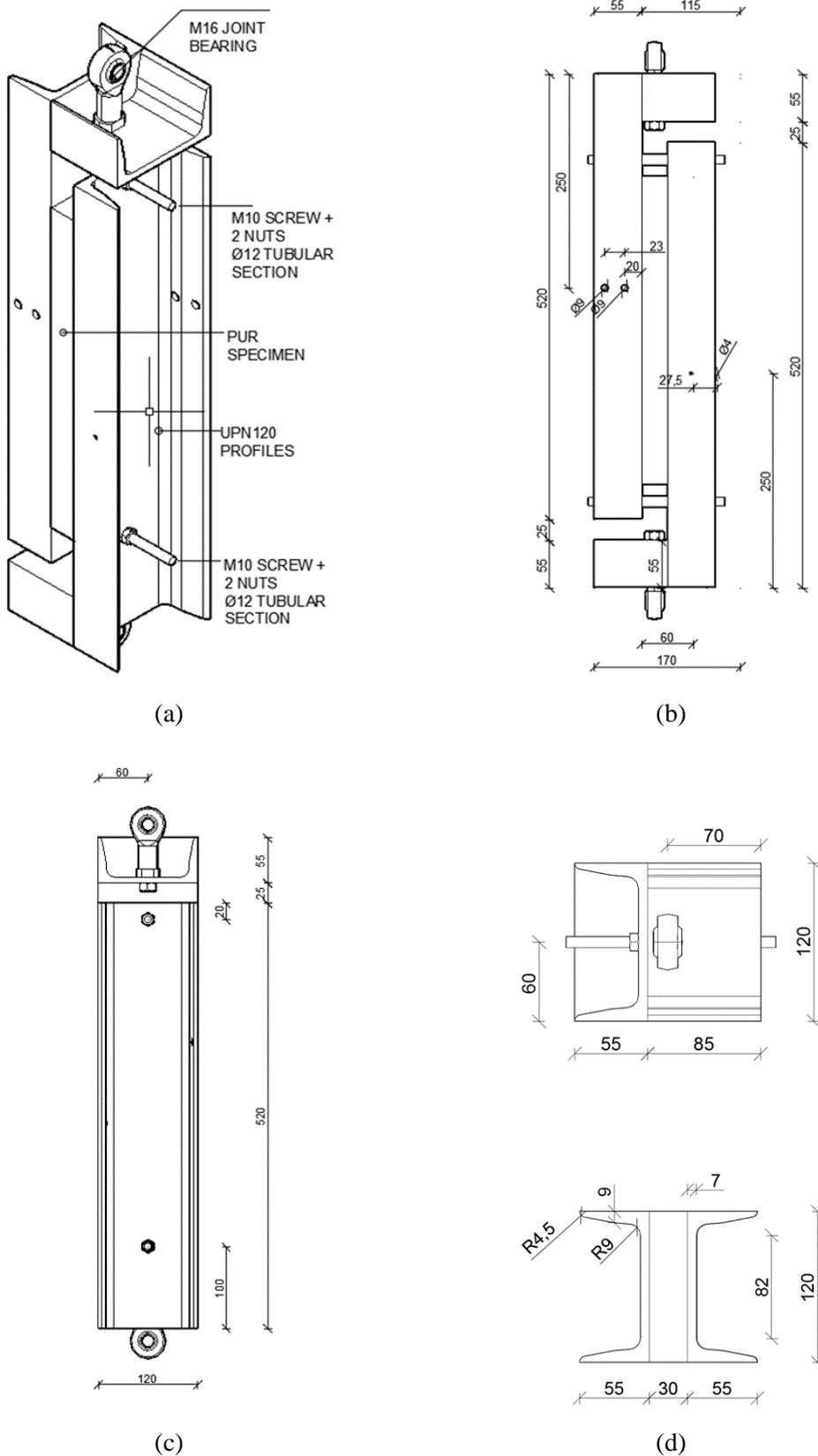


Figura 3.10 - Configuração dos ensaios de corte em placas utilizado para a série 1: (a) vista 3D; (b) vista frontal; (c) vista lateral e (d) vista em planta. Notas: (i) as dimensões encontram-se em milímetros; (ii) devido à espessura do provete, a configuração usada na série 2 contém ajustes ao nível da posição dos apoios rotulados.

Após o desenvolvimento da configuração e sistema de ensaio, procedeu-se à realização da campanha de ensaios de corte (ensaios quase-estáticos, monotônicos até a rotura). Tal como referido, os ensaios de corte foram realizados de acordo com o procedimento experimental indicado na ASTM C273 - 00 (ASTM, 2000a). Todos os ensaios foram realizados por controlo de deslocamento a uma velocidade de 0.50 mm/min. Para o efeito, recorreu-se a uma máquina universal de ensaios com 200 kN de capacidade de carga (precisão de ± 0.05 F.S), existente no LEST. O registo de dados, em termos de força aplicada e deslocamentos medidos, foi efetuado num computador que faz parte integrante de uma unidade de aquisição de dados da marca RDP GROUP e modelo modular 600.

Dada a complexidade deste tipo de ensaio, decidi aproveitar-se a campanha experimental para enriquecer os conhecimentos em termos do comportamento ao corte de espumas de poliuretano. Para tal, estudou-se a influência das proporções geométricas dos provetes de PUR – “*size effect*” – nas suas propriedades mecânicas, recorrendo a provetes com as seguintes geometrias: (i) Grupo I - provetes com 30 mm de espessura e rácios comprimento/espessura (L/t) de 2, 4, 6 e 12; (ii) Grupo II - provetes com 60 mm de espessura e rácios L/t de 2, 4 e 6. Refira-se que o ensaio de referência (padronizado pela ASTM C273-00) é aquele que apresenta a relação geométrica L/t igual a 12. Para ambas as séries, a largura nominal dos provetes é de 120 mm. Com o objetivo de analisar o campo de deformações e extensões durante o ensaio, recorre-se à técnica da correlação digital de imagem (DIC – “*digital image correlation*”) em pelo menos num provete de cada série.

Por série foram usados 2 a 6 provetes, perfazendo um total de 24 provetes ensaiados. A Tabela 3.5 apresenta a descrição geométrica de cada série, assim como, a designação adotada. A designação genérica para as séries é PUR_ST_TT_LLL_XX, em que PUR refere-se ao material, ST identifica o tipo de ensaio “*shear test*”, TT apresenta a espessura do provete, LLL representa o comprimento do provete e XX denomina o número de ordem do provete numa mesma série. De entre os provetes a ensaiar, apenas a série PUR_ST_30_360_XX cumpre as exigências normativas em termos dimensionais.

Tabela 3.5 - Designação genérica e caracterização geométrica-tipo para as diferentes séries dos provetes ensaiados ao corte (t-espessura do provete, b-largura do provete, L-comprimento do provete).

Grupo	Série	t [mm]	b [mm]	L [mm]	L/t	Nº de provetes ensaiados
Grupo I	PUR_ST_30_360_XX	30	120	360	12	6
	PUR_ST_30_180_XX			180	6	3
	PUR_ST_30_120_XX			120	4	3
	PUR_ST_30_60_XX			60	2	3
Grupo II	PUR_ST_60_360_XX	60	120	360	6	5
	PUR_ST_60_240_XX			240	4	2
	PUR_ST_60_120_XX			120	2	2

Inicialmente, todos os provetes foram medidos com um paquímetro e pesados com uma balança digital do LEST com uma precisão de 0.01 mm e 0.01 g, respetivamente. Os provetes encontravam-se numa câmara climática a uma temperatura de 18 °C e a uma humidade relativa de 55%. Os resultados da caracterização geométrica encontram-se no ANEXO II e serviram para validar não só a densidade do material e o rigor geométrico dos provetes como também, as grandezas geométricas para o cálculo da área de corte.

Foi também efetuada a avaliação geométrica (largura) da estrutura metálica de ligação aos provetes de PUR, tendo obtido o valor médio de 119 mm.

Após a caracterização geométrica dos provetes, estes foram colados aos pratos de aplicação de carga com um adesivo para painéis sanduíche do tipo SikaForce® 7710 L100 produzido pela empresa SIKA. Para esse fim, seguiram-se os seguintes passos (Figura 3.11):

1. Inicialmente limparam-se os perfis metálicos (“pratos de carga”) com acetona e delimitou-se a zona de colagem em ambas as faces de modo a garantir o correto posicionamento do provete (Figura 3.11a);
2. Seguidamente, preparou-se a mistura adesiva de acordo com a ficha técnica do produto (ANEXO I) (Figura 3.11b). Após alguns testes iniciais, decidiu-se aplicar o adesivo em ambas as faces de cada um dos perfis metálicos e nas faces do provete (Figura 3.11c). Posteriormente, colou-se uma face de PUR num dos pratos e colocaram-se espaçadores com o objetivo de garantir que o provete não ficasse comprimido, tendo-se colocado

posteriormente outra metade metálica sob a face livre de PUR. À medida que se ia “comprimindo” o provete, o adesivo em excesso que emanava da colagem foi retirado (Figura 3.11d, e). Terminado esse processo, os provetes foram colocados numa câmara climática de modo a obter-se um certo grau de cura do adesivo sob condições de temperatura e humidade controladas acima indicadas. De um modo geral, o tempo de cura variou entre 1 a 7 dias, apesar de, de acordo com o fabricante, o produto em causa atingir uma percentagem significativa de cura aproximadamente 4 horas após a aplicação do adesivo.

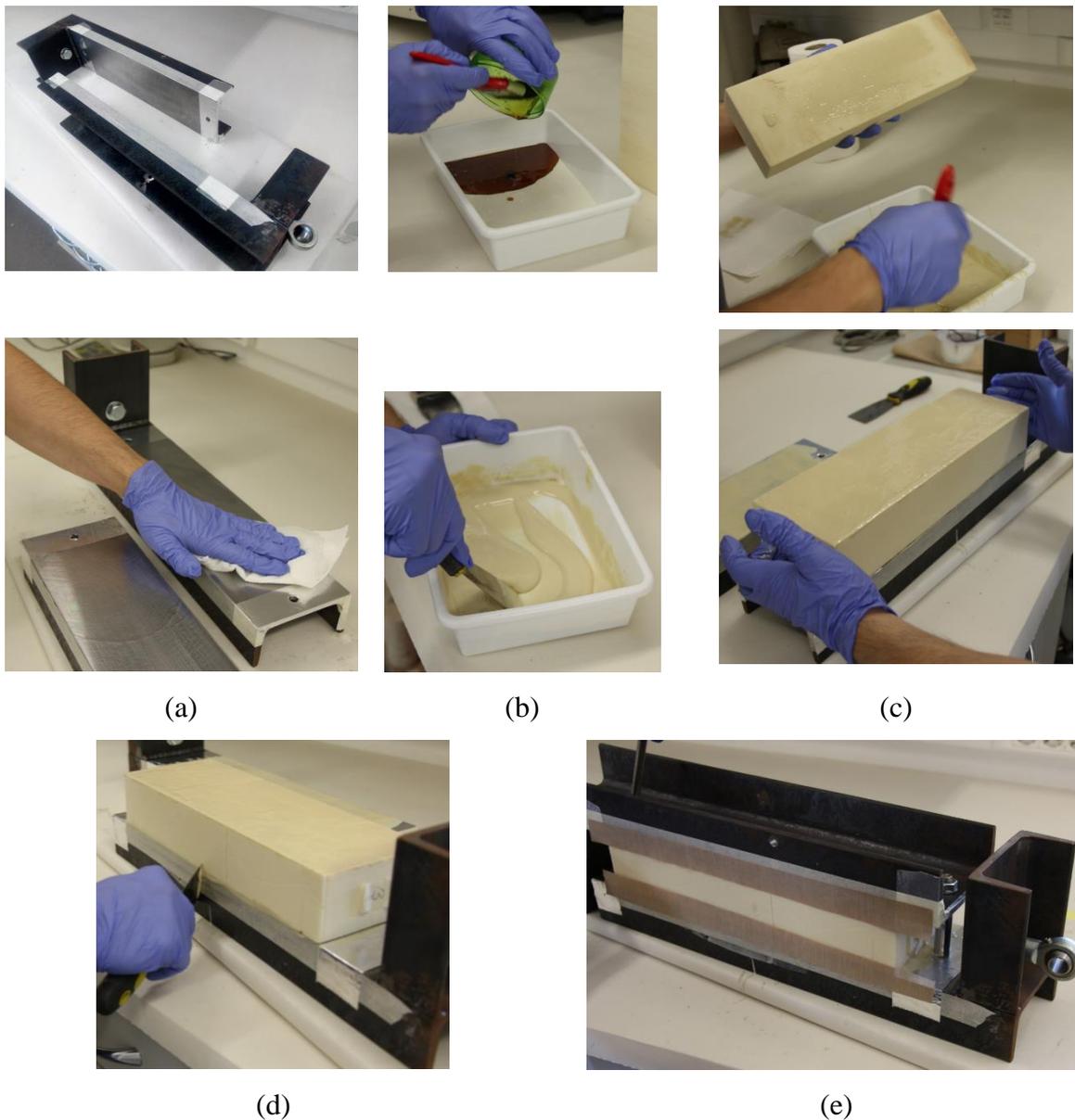


Figura 3.11 - Etapas relativas à preparação dos provetes para os ensaios de corte.

Com o processo de cura do adesivo terminado, retiraram-se os excessos deste e procedeu-se à limpeza do provete. Posteriormente o provete foi instalado na prensa universal, tendo-se instalado a instrumentação e os acessórios necessários para o ensaio. A Figura 3.12 apresenta fotografias com a configuração e a instrumentação típica utilizada nos ensaios.

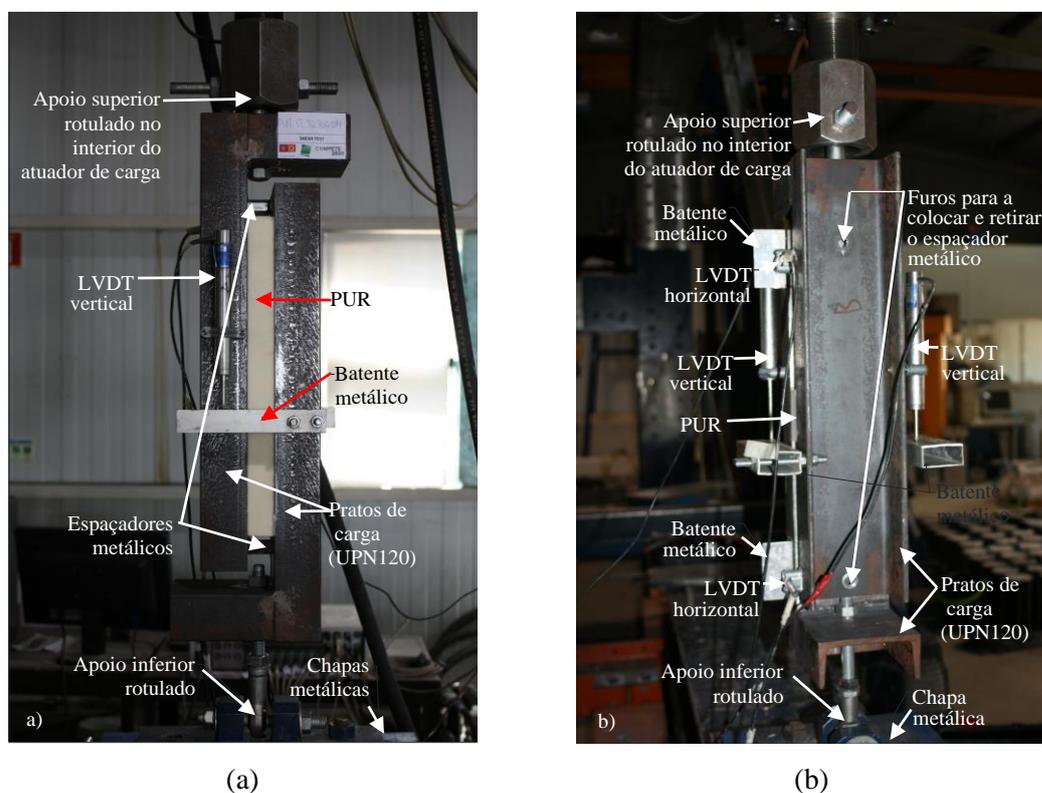


Figura 3.12 - Fotografias do ensaio de corte em espuma de poliuretano: (a) vista frontal e (b) vista posterior.

Para medir a deslocamento relativo vertical entre os “pratos de carga”, foi instalado um transdutor de deslocamentos indutivo (LVDT), com uma amplitude de ± 25 mm (coeficiente de linearidade de $\pm 0.24\%$ F.S.) em cada num dos pratos. Estes foram colocados em ambas as faces, na zona central (Figura 3.12). Além disso, para efeitos de controlo da rotação entre os perfis metálicos, também se instalaram LVDT's posicionados horizontalmente. De modo a medir todos os deslocamentos, fixaram-se batentes no perfil oposto aquele onde os LVDT's se encontravam instalados. Por fim, retiraram-se os espaçadores e procedeu-se ao ensaio até à rotura do provete.

Importa referir que os primeiros ensaios serviram para ajustar o sistema/configuração de ensaio, e.g. chapas de apoio inferior, pré-carga e o sistema de ensaio entre outros aspetos.

De acordo com a norma ASTM C273-00 é possível calcular a tensão de corte e o módulo de corte através das expressões (3.6) e (3.7), respetivamente.

$$\tau = \frac{P}{Lb} \quad (3.6)$$

onde,

τ = tensão de corte do núcleo, em [MPa];

P = carga aplicada, em [N];

L = comprimento do provete, em [mm];

b = largura do provete, em [mm].

$$G = \frac{S \times t}{L \times b} \quad (3.7)$$

onde,

G = módulo de corte do núcleo, em [MPa];

S = $\Delta P / \Delta u$, em [N/mm];

Δu = variação do deslocamento vertical, em [mm];

ΔP = variação da força para Δu , em [mm];

t = espessura do provete, em [mm].

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Ensaio de compressão

Nos ensaios de compressão do PUR, os modos de rotura observados foram considerados válidos de acordo com a norma de ensaio utilizada. A Figura 3.13 ilustra os provetes após o ensaio, assim como os seus modos de rotura.



Figura 3.13 - Provete ensaiados à compressão. Nota: a fotografia foi tirada algum tempo depois da realização dos ensaios, por isso estes, apresentam, por isso estes, a recuperação da deformação elástica.

A Figura 3.14 apresenta os resultados dos ensaios de compressão realizados nos provetes de PUR em termos da relação tensão *versus* extensão. Na Tabela 3.6 constam os valores relativos à força máxima (P_{max}), à extensão máxima (ϵ_{max}), à tensão máxima (F_{max}) e ao módulo de elasticidade de compressão (E) dos provetes. Estes parâmetros foram calculados segundo as equações (3.1) e (3.2). O módulo de elasticidade em compressão foi determinado a partir de uma regressão linear dos pontos da curva tensão-extensão, que se encontram entre uma extensão de 0.01 e 0.03 (mm/mm). Não foram utilizados os pontos sugeridos pela norma pelo facto de o gráfico não ser linear nesse troço.

Como se observa a partir Figura 3.14, existem grupos de provetes cujo comportamento é diferente, distinguindo-se, por isso, dois grupos: Grupo 1 (Provetes 1, 2, 3, 5 e 7) e Grupo 2 (Provetes 4 e 6). Apesar de ambos os grupos apresentarem o mesmo modo de rotura, é de realçar a diferença ao nível dos valores da tensão última e da rigidez, que são superiores no Grupo 2. Relativamente às curvas, embora não seja totalmente perceptível, as respostas exibem um comportamento não linear inicial que se deve ao ajuste entre o sistema de aplicação de carga e as faces do provete. Segue-se um troço com um comportamento linear elástico (fase elástica linear) até que se atinge um valor máximo de carga para uma extensão máxima próxima dos 6%, havendo depois um ligeiro decréscimo da resistência. A partir desse valor a resposta é não linear (fase elasto-plástica), observando-se o aumento da extensão para um valor de força mais

ao menos constante. A parte final da resposta caracteriza-se pelo crescimento exponencial da tensão: enquanto que a extensão máxima varia entre os 5% e os 7%, a tensão de compressão varia entre os 0.25 MPa e os 0.45 MPa (Tabela 3.6).

Os provetes 4 e 6 (Grupo 2) apresentam uma resposta diferente das dos outros provetes em termos de valores: uma tensão de cedência e um módulo de elasticidade em compressão superior em aproximadamente 69% e 124%, respetivamente, quando comparando com o Grupo 1. Adicionalmente, após a tensão máxima a resposta destes provetes é caracterizada por uma queda abrupta da força. Importa também referir que o provete 7 apresenta uma tensão de compressão e um valor de extensão máxima ligeiramente superior aos seus homólogos. Tal como ressalva a norma, um dos motivos para o sucedido pode estar relacionado com as condições em que decorreu o ensaio uma vez que o mesmo foi realizado num dia diferente.

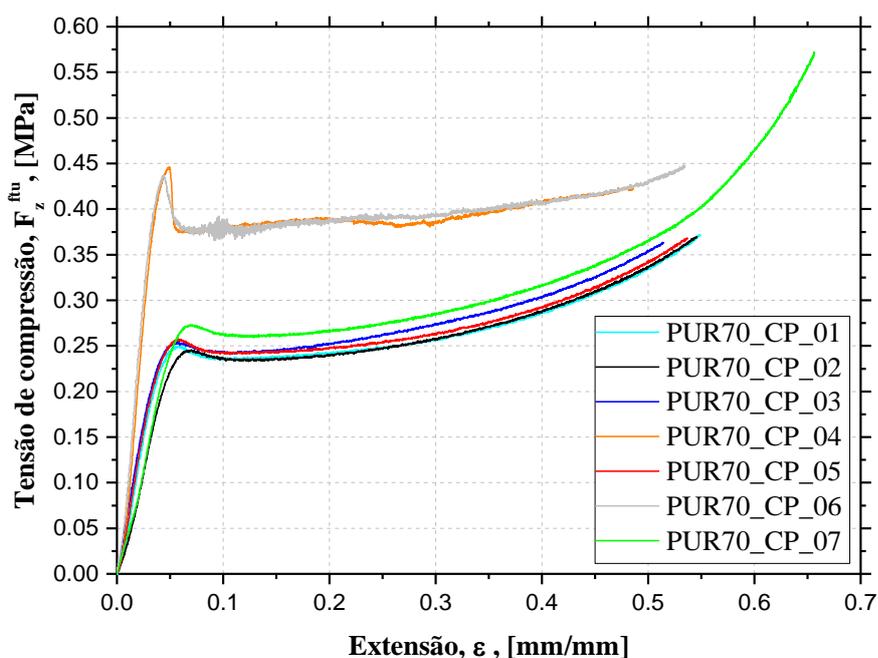


Figura 3.14 - Relação entre a tensão de compressão e a extensão axial dos provetes de PUR ensaiados.

A diferença de resultados entre o Grupo 1 e 2 deve-se ao facto de o fabricante ter fornecido provetes extraídos de blocos de PUR produzidos a partir de dois tipos de reagentes diferentes (informação dada pelo fabricante). Apesar de mecanicamente apresentarem comportamentos distintos, visualmente não é possível identificar qualquer diferença. Enquanto que os provetes do Grupo 1 apresentam uma tensão de cedência média de 0.26 ± 0.01 MPa e um módulo de elasticidade em compressão médio igual a 6 ± 0.73 MPa, os provetes do Grupo 2 apresentam

uma tensão de cedência média de 0.44 ± 0.01 MPa e um módulo de elasticidade em tração médio igual a 13.44 ± 0.10 MPa. Apesar de ambos os valores se enquadrarem no reportado pela literatura, consideram-se pelos valores do Grupo 1 uma vez que os restantes ensaios/provetes pertenciam a este grupo.

Tabela 3.6 - Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compressão para o PUR.

Grupo	Provete	P_{\max} [kN]	$F_{z,\max}^{ftu}$ [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	E [MPa]
Grupo 1	PUR_CP_01	1.40	0.25	0.06	6.75
	PUR_CP_02	1.40	0.25	0.07	5.29
	PUR_CP_03	1.37	0.25	0.05	6.40
	PUR_CP_05	1.37	0.26	0.06	6.61
	PUR_CP_07	1.03	0.27	0.07	4.95
	Média	1.31	0.26	0.06	6.00
	Desvio Padrão	0.14	0.01	0.01	0.73
	CoV [%]	11.02	3.73	11.19	12.23
Grupo 2	PUR_CP_04	1.65	0.45	0.05	13.54
	PUR_CP_06	1.69	0.44	0.04	13.34
	Média	1,67	0,44	0,05	13,44
	Desvio Padrão	0,02	0,00	0,00	0,10
	CoV [%]	1,26	1,05	5,72	0,74

3.3.2 Ensaios de tração

Os 6 provetes ensaiados para caracterizar o PUR à tração apresentaram um modo de rotura válido uma vez que esta ocorreu na zona do núcleo de um modo frágil. Dado que a maior parte dos modos de rotura ocorreu próxima da interface adesivo/PUR constata-se que essa zona apresenta algumas fragilidades (Figura 3.15). Idealmente o modo de rotura deveria ocorrer ao longo de um plano horizontal, contudo, e tal como na literatura, verifica-se que o plano de corte acontece ao longo de uma superfície inclinada, distribuindo-se a força pela mesma. Assim sendo, como a área de corte real difere da área que é usualmente utilizada no cálculo (área plana) é preciso ter em atenção os valores obtidos e a dispersão de resultados. Uma das razões para este tipo de rotura pode estar relacionada com o arranjo microcelular da espuma de PUR.

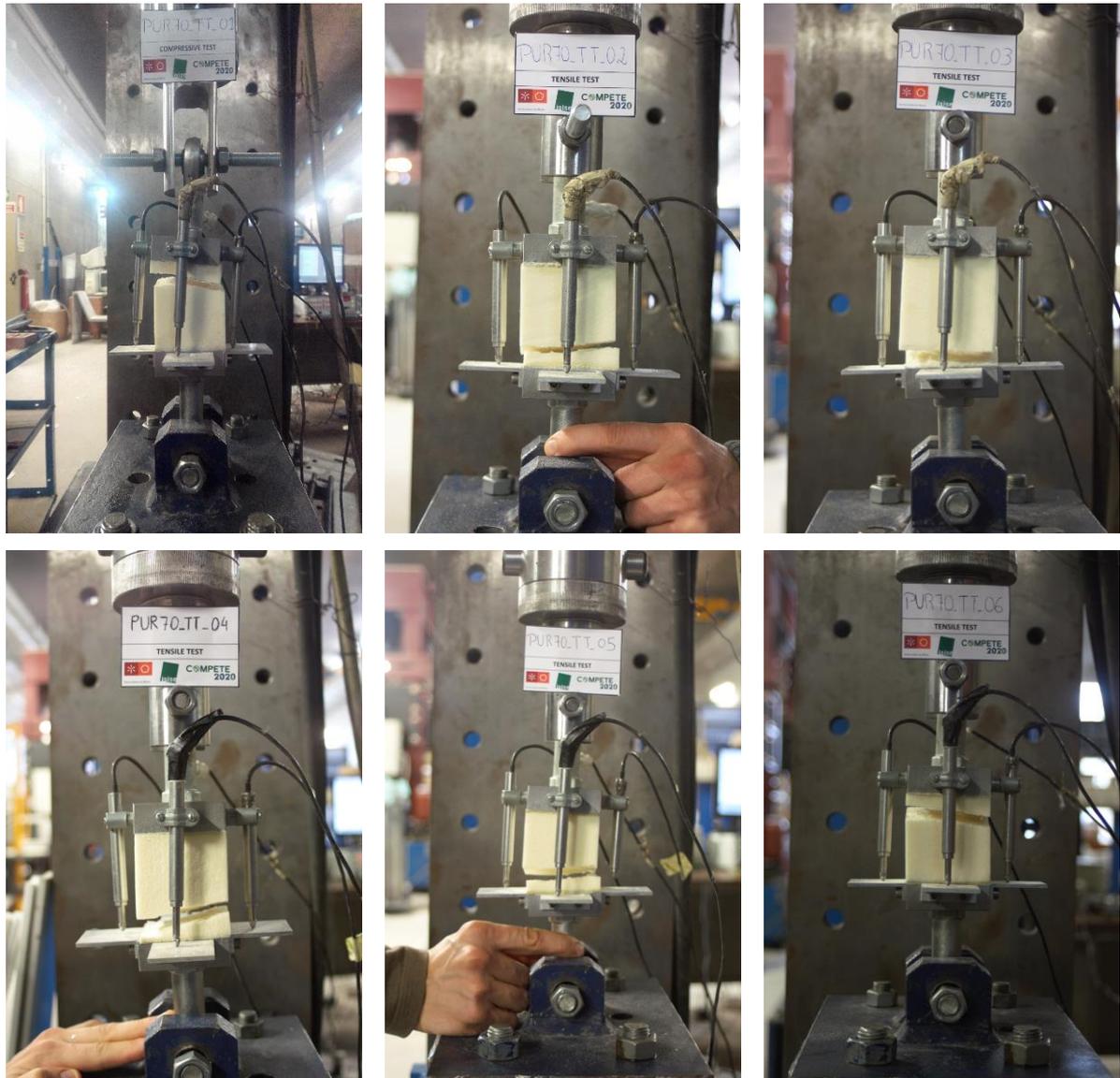


Figura 3.15 - Modos de rotura obtidos nos ensaios de tração do PUR.

A Figura 3.16 apresenta os resultados dos ensaios de tração realizados nos provetes de PUR em termos de tensão *versus* extensão. Como se observa a partir desta figura, existem provetes cujo comportamento é bastante diferente dos restantes, distinguindo-se, à semelhança do que aconteceu nos ensaios de compressão, dois grupos: Grupo 1 (provetes 1, 4, 5 e 6) e Grupo 2 (provetes 2 e 3). Os provetes de ambos os grupos apresentam o mesmo modo de rotura e valores de tensão última muito similares. Contudo, o mesmo não se passa em relação à rigidez, uma vez que os provetes do Grupo 2 apresentam um módulo de elasticidade significativamente superior. Mais uma vez, as propriedades relativas aos grupos assinalados encontram-se de acordo com a bibliografia. De um modo geral, a resposta é caracterizada por um comportamento perfeitamente linear nos provetes 2 e 3; contudo, nos casos dos provetes 1, 4, 5 e 6 observa-se

um comportamento quase linear elástico, passando a não linear para valores de extensão da ordem dos $\pm 2\%$. Enquanto que a extensão máxima varia entre os 1.36% e os 4.2%, a tensão de tração varia entre os 0.29 MPa e os 0.47 MPa (Tabela 3.7).

Os provetes 2 e 3 (Grupo 2) apresentam uma tensão última em tração e um módulo de elasticidade superiores em aproximadamente 24% e 145%, respetivamente, em relação aos outros provetes (Grupo 1). Em todas as respostas verifica-se a existência de uma zona descontínua que ocorre, dependendo dos provetes, para uma extensão que varia entre os 0.1% e os 0.3%.

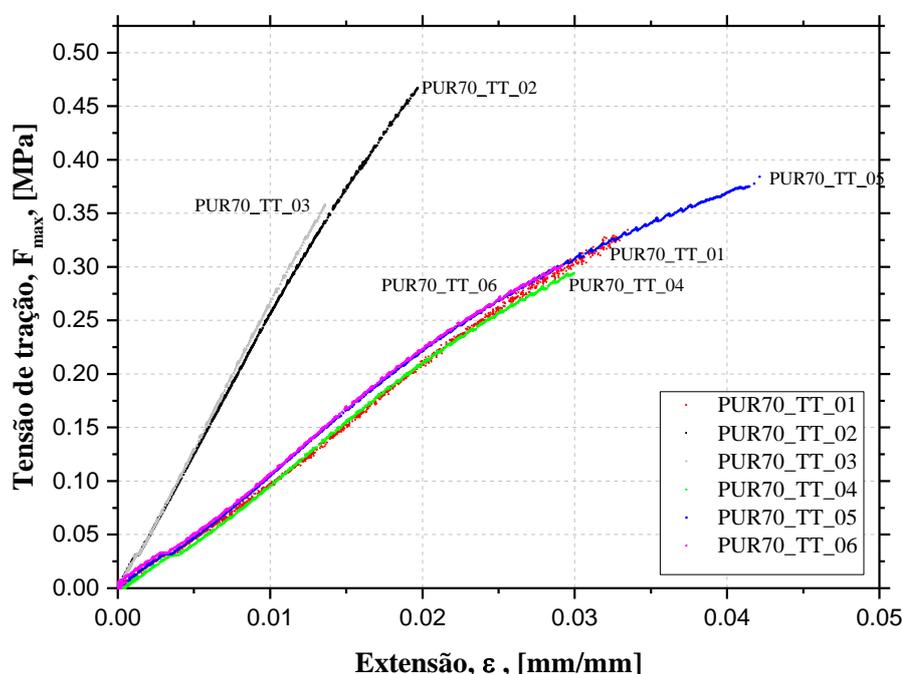


Figura 3.16 - Curvas tensão de tração *versus* extensão para todos os provetes de PUR ensaiados.

A Tabela 3.7 apresenta os valores relativos à força máxima (P_{max}), à extensão máxima (ϵ_{max}), à tensão máxima (F_{max}) e ao módulo de elasticidade de tração (E). Para o efeito utilizaram-se as equações (3.3) e (3.4). A rigidez foi determinada no intervalo entre 0.6% e 1% de extensão. Analisando os resultados (respostas experimentais e valores médios) verifica-se uma dispersão de resultados significativa. A diferença de resultados entre o Grupo 1 e 2 deve-se ao facto de o fabricante ter fornecido provetes extraídos de blocos de PUR produzidos a partir de dois tipos de reagentes diferentes (informação dada pelo fabricante). Apesar de mecanicamente apresentarem comportamentos distintos, visualmente não é possível identificar qualquer

diferença. Verifica-se que os valores obtidos para a resistência de tração e módulo de elasticidade se encontram de acordo com a literatura. Enquanto os provetes do Grupo 1 apresentam uma média de tensões máxima de 0.33 ± 0.04 MPa e um módulo de elasticidade em tração médio igual a 10.93 ± 0.85 MPa, os provetes do Grupo 2 apresentam uma média de tensões máxima de 0.41 ± 0.026 MPa e um módulo de elasticidade em tração médio igual a 26.78 ± 0.51 MPa. Apesar de ambos os valores se enquadrarem na literatura, nos estudos que se seguem irão usar-se os valores relativos ao Grupo 1, uma vez que os restantes ensaios foram feitos com provetes deste grupo. Tal como na bibliografia, apesar das propriedades em tração das espumas de PUR apresentarem concordância com as propriedades em compressão, verifica-se que as propriedades em tração são ligeiramente superiores. Cruzando as propriedades obtidas dos ensaios de compressão e de tração, verifica-se que as resistências apresentam uma gama de valores similar. Contudo, o mesmo não se passa para os módulos de elasticidade (ver Figura 3.17).

Tabela 3.7 - Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de tração do PUR.

Grupo	Provete	P_{max} [kN]	F_{max} [MPa]	ϵ_{max} [mm/mm]	E [MPa]
Grupo 1	PUR_TT_01	1.20	0.33	0.03	9.54
	PUR_TT_04	1.06	0.29	0.03	10.94
	PUR_TT_05	1.38	0.38	0.04	11.76
	PUR_TT_06	1.09	0.30	0.03	11.46
	Média	1.18	0.33	0.03	10.93
	Desvio Padrão	0.13	0.04	0.01	0.85
	CoV [%]	10.82	10.82	15.29	7.78
Grupo 2	PUR_TT_02	1.68	0.47	0.02	26.27
	PUR_TT_03	1.29	0.36	0.01	27.29
	Média	1,49	0,41	0,02	26,78
	Desvio Padrão	0,20	0,05	0,00	0,51
	CoV [%]	13,20	13,20	18,33	1,90

A Figura 3.17 apresenta a relação entre as propriedades de tração e as de compressão para os grupos identificados. Um dos objetivos prende-se com o facto de tentar perceber se existe alguma analogia entre os grupos identificados nos ensaios de tração e de compressão. No que respeita à tensão máxima os resultados são concordantes; contudo os resultados relativos ao módulo de elasticidade são bastante diferentes, pelo que qualquer correlação não poderá ser apresentada.

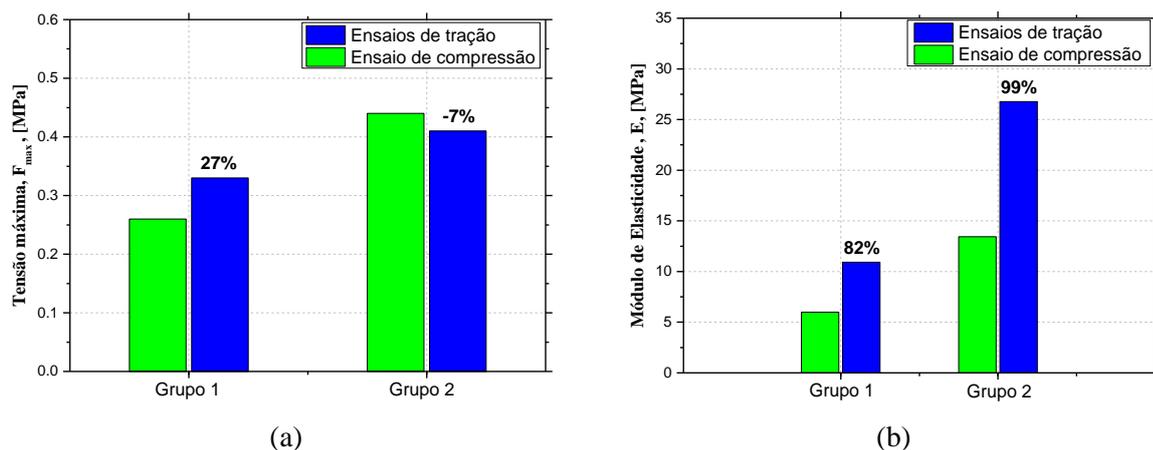


Figura 3.17 - Comparação ao nível da resistência máxima e do módulo de elasticidade entre os dois grupos identificados nos ensaios de caracterização em compressão e em tração: (a) tensão máxima e (b) módulo de elasticidade.

3.3.3 Ensaios de corte

Neste subcapítulo são apresentados os resultados dos ensaios de corte da espuma de poliuretano em estudo assim como as principais ilações retiradas. Inicialmente analisa-se separadamente cada um dos grupos. Posteriormente, é feita uma análise global dos resultados obtidos.

Na Figura 3.20 e Figura 3.24 apresentam-se as curvas tensão *versus* distorção de todos os provetes ensaiados de acordo com o respetivo grupo. Na Figura 3.21 e Figura 3.25, para cada série são apresentadas as curvas médias que relacionam a tensão de corte com a distorção, τ - γ . Os detalhes referentes a cada ensaio foram anteriormente apresentados (ver Tabela 3.5).

Na Tabela 3.8 e Tabela 3.9 apresentam-se as principais entidades caracterizadoras do comportamento ao corte do PUR por série. Os valores apresentados correspondem à média dos valores obtidos para o conjunto dos provetes analisados dentro de uma mesma série. Além disso, é também apresentado o modo de rotura de cada provete dentro de uma mesma série. Assim, nestas tabelas $F_{max,2\%}$, $\tau_{max,2\%}$ e $\gamma_{ult,2\%}$ dizem respeito à força máxima registada, à tensão de corte e à distorção obtido para uma deformação de corte igual a 2%, como recomendado pela norma ASTM C273-00 para materiais com um nível de deformação elevado (ver Figura 3.18). $F_{max,ap}$ é a força máxima registada na rotura, $\tau_{max,ap}$ representa a tensão de corte máxima na rotura e $\gamma_{ult,ap}$ é a distorção última na rotura.

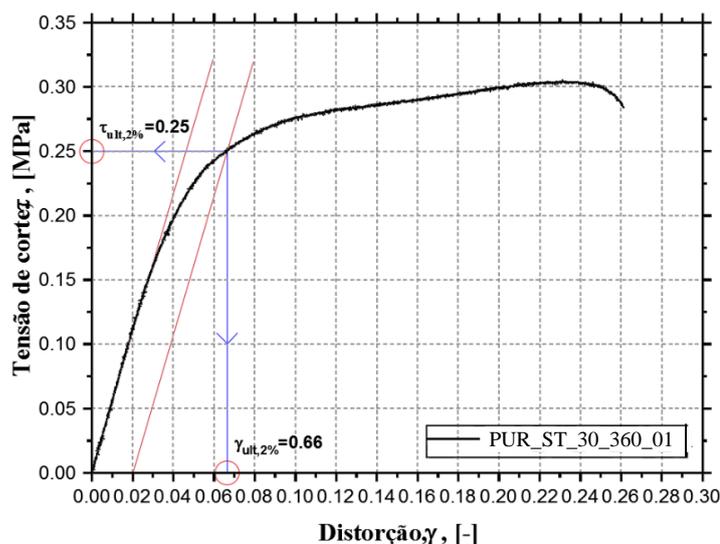


Figura 3.18 - Exemplo de aplicação da determinação de $\tau_{\max,2\%}$ e $\gamma_{ult,2\%}$ para o provete PUR_ST_30_360_01.

3.3.3.1 Observações gerais

Nos ensaios de corte de ambos os grupos, verificou-se, de um modo geral, que o provete começa por microfissurar internamente. Este fenómeno marca o início da perda de rigidez do provete, tal como se verifica na resposta tensão-distorção ou força-deslocamento. Posteriormente, surgem macro-fendas de tração, uma em cada extremidade do provete. Deste modo, o provete vai perdendo capacidade de capacidade de carga, até que rompe para uma deformação elevada. Em termos de resposta, observa-se inicialmente um comportamento linear elástico, seguido por um comportamento não linear até à rotura.

Relativamente às fendas de tração, verificou-se que os provetes começavam por abrir fendas, que se propagavam em toda a sua largura ($b=120\text{mm}$), simultaneamente em ambas as extremidades adjacentes aos respetivos pratos de carga. Estas encontram-se diagonalmente apostas e progridem verticalmente, tal como é visível na Figura 3.19. Segundo a resistência de materiais clássica e o que se aferiu das simulações numéricas e da análise com DIC (pormenorizado adiante), o desenvolvimento deste tipo de fendas justifica-se pela ocorrência de esforços de tração por flexão do provete nas extremidades referidas devido a um efeito estrutural provocado pelo sistema de ensaio.

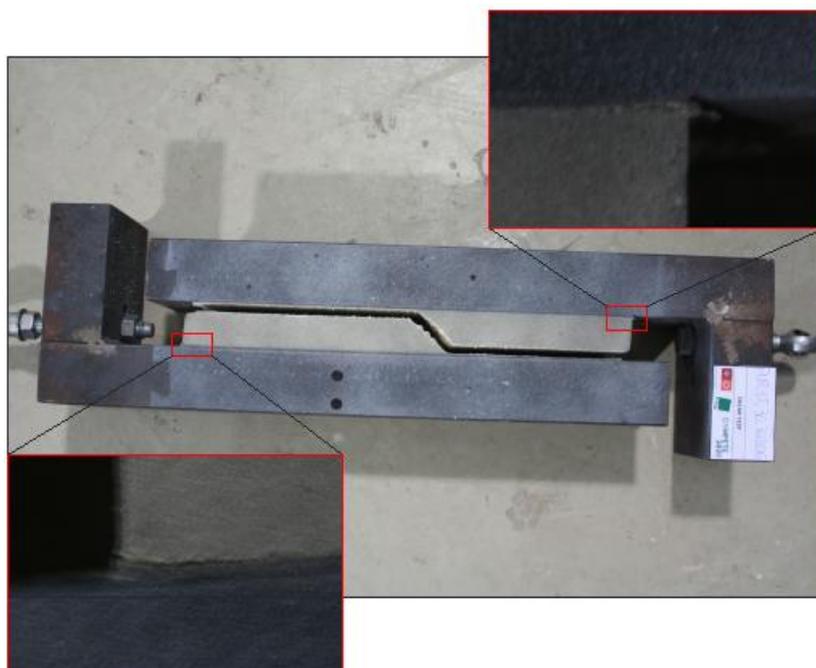


Figura 3.19 - Provete (PUR_ST_30_360_06) com rotura por corte. Destacam-se as fendas de tração diagonalmente opostas.

De um modo geral, a rotura dos provetes ocorreu de forma diferenciada, tal como se verá adiante. Os provetes, cujas relações geométricas são estipuladas pela norma ASTM C273-00, romperam, essencialmente, por corte devido à existência de uma fenda de corte orientada a 45°. Contudo, para as outras tipologias de provetes a rotura ocorreu na interface adesivo-PUR devido ao crescimento instável de uma fenda vertical que se propaga ao longo de um dos pratos. Para efeitos de análise do ensaio, serão utilizados todos os provetes cujo comportamento não se distancie do esperado e dos restantes. Contudo, e tal como menciona a norma, para o dimensionamento apenas devem ser contabilizados os resultados dos provetes que romperam por corte.

3.3.3.2 Grupo I

Na Figura 3.20 encontram-se as curvas $\tau - \gamma$ relativas a todos os provetes ensaiados no Grupo I, bem como uma breve descrição individualizada das respostas e modos de rotura observados. Os modos de rotura típicos são apresentados na Figura 3.21, sendo que as fotografias dos modos de rotura de cada provete encontram-se no ANEXO IV.

No caso dos provetes com 360 mm de comprimento – Série 1 – (Figura 3.20a), as respostas apresentam um comportamento bastante similar, denotando-se uma maior proximidade no ramo linear elástico até uma distorção próxima dos 0.025. Contudo, observa-se que o provete 5 apresenta um comportamento ligeiramente diferente dos restantes em termos de valores e modo de rotura. No que diz respeito aos modos de rotura, esta tipologia de provete foi a que apresentou melhores resultados. O modo de rotura tipo foi a rotura por corte, que é caracterizada por uma fenda diagonal à espessura do provete em toda a sua largura (S) (Figura 3.21a). Refere-se ainda que o provete 1 apresentou uma rotura na interface adesivo/PUR (ver ANEXO IV). Nesse mesmo provete é de salientar a existência de uma fenda de corte importante que é visível numa das faces. Embora a fenda de corte seja relevante e importante, esta não se propagou na totalidade da largura do provete pelo que se depreende que o modo de rotura não tenha sido essencialmente por corte (S). Contudo, a resposta obtida em termos de distorção-tensão de corte é semelhante aos provetes que romperam por corte. A rotura do provete 5 ocorreu pela interface adesivo/PUR. Nesse provete era visível, numa das faces, o início da formação de uma fenda de corte pequena, embora não tenha sido essa a causa da rotura do provete (ver ANEXO IV).

No caso do uso dos provetes com 180 mm de comprimento – Série 2 – (Figura 3.20b), as respostas dos provetes são semelhantes. A dispersão máxima é de 2.64% e diz respeito à força máxima aparente. No que concerne à distorção aparente, a dispersão foi de 0,8%, tendo sido o valor mais baixo da série. A rotura dos provetes ocorreu essencialmente pela interface adesivo/PUR (Figura 3.21b). Destaca-se ainda a existência de uma pequena fenda de corte no provete 1 e de uma fenda mais acentuada no provete 3. Contudo, em ambos os casos, as fendas não se propagaram na totalidade da espessura e largura (ver ANEXO IV).

De um modo geral, os espécimes com um comprimento de 120mm – Série 3 – apresentam respostas idênticas (Figura 3.20c), havendo uma melhor aproximação entre o provete 1 e o 2. Olhando para os modos de rotura, os provetes 1 e 2 romperam pela interface adesivo/PUR embora apresentem uma fenda de corte, que é assinalável no caso do provete 2. Por outro lado, o provete 3 rompeu somente pela interface adesivo/PUR, sem quaisquer indícios de fendas de corte (ver Figura 3.21c e ANEXO IV).

Os provetes com 60mm de comprimento – Série 4 – (Figura 3.20d) possuem respostas análogas com especial destaque para o caso dos provetes 2 e 3. A resposta do provete 1, apesar de

idêntica, apresenta duas quedas bruscas da tensão de corte, enquanto os restantes apresentam apenas uma. Para todos os provetes, a primeira queda ocorre para graus de distorção e valores de tensão muito próximos uns dos outros. A rotura de todos os provetes ocorreu pela interface adesivo/PUR sem qualquer tipo de fenda de corte (ver Figura 3.21d e ANEXO IV).

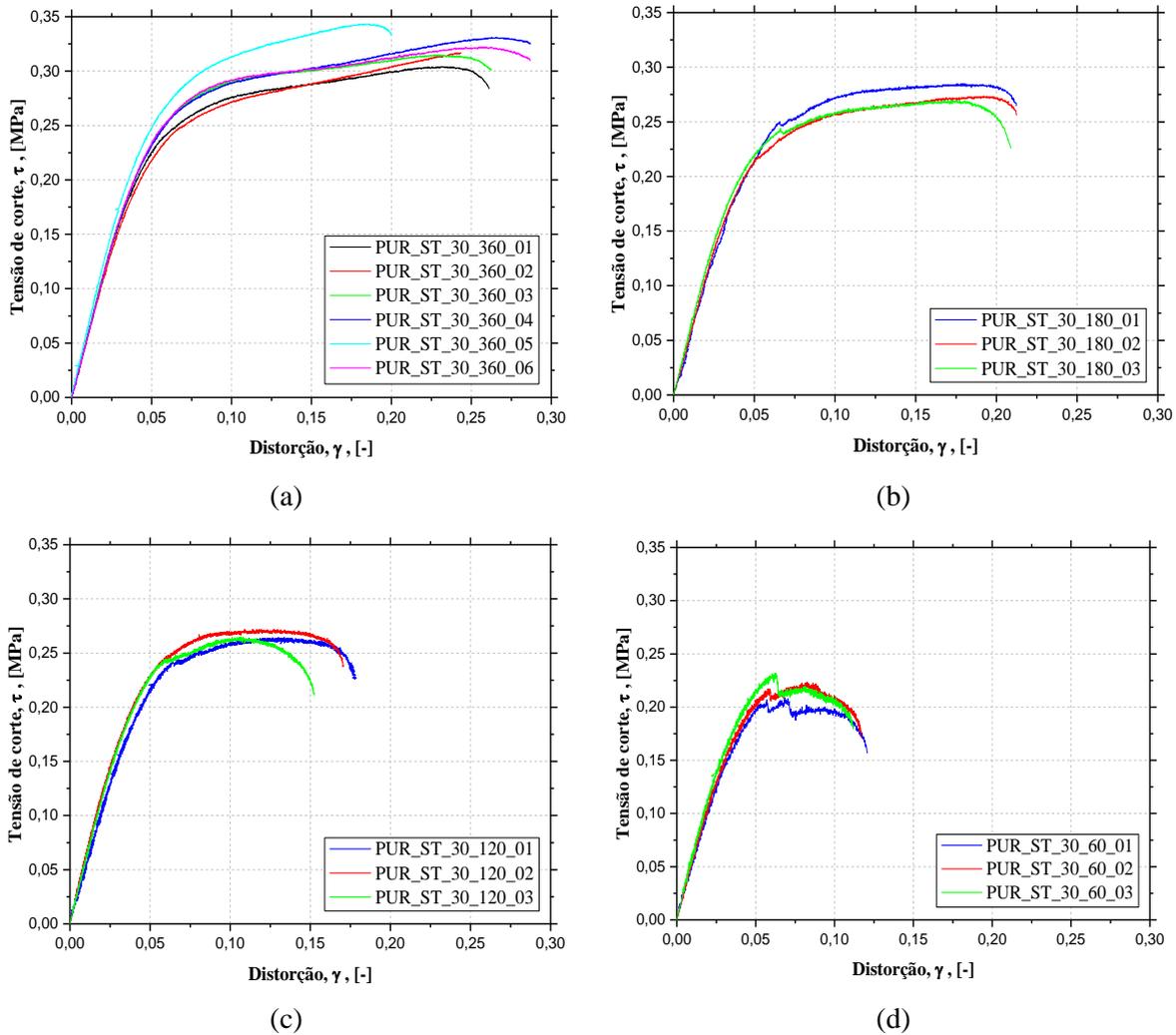


Figura 3.20 - Relação entre a tensão de corte e a distorção: ensaios relativos aos provetes (a) PUR_ST_30_360; (b) PUR_ST_30_180; (c) PUR_ST_30_120 e (d) PUR_ST_30_60.

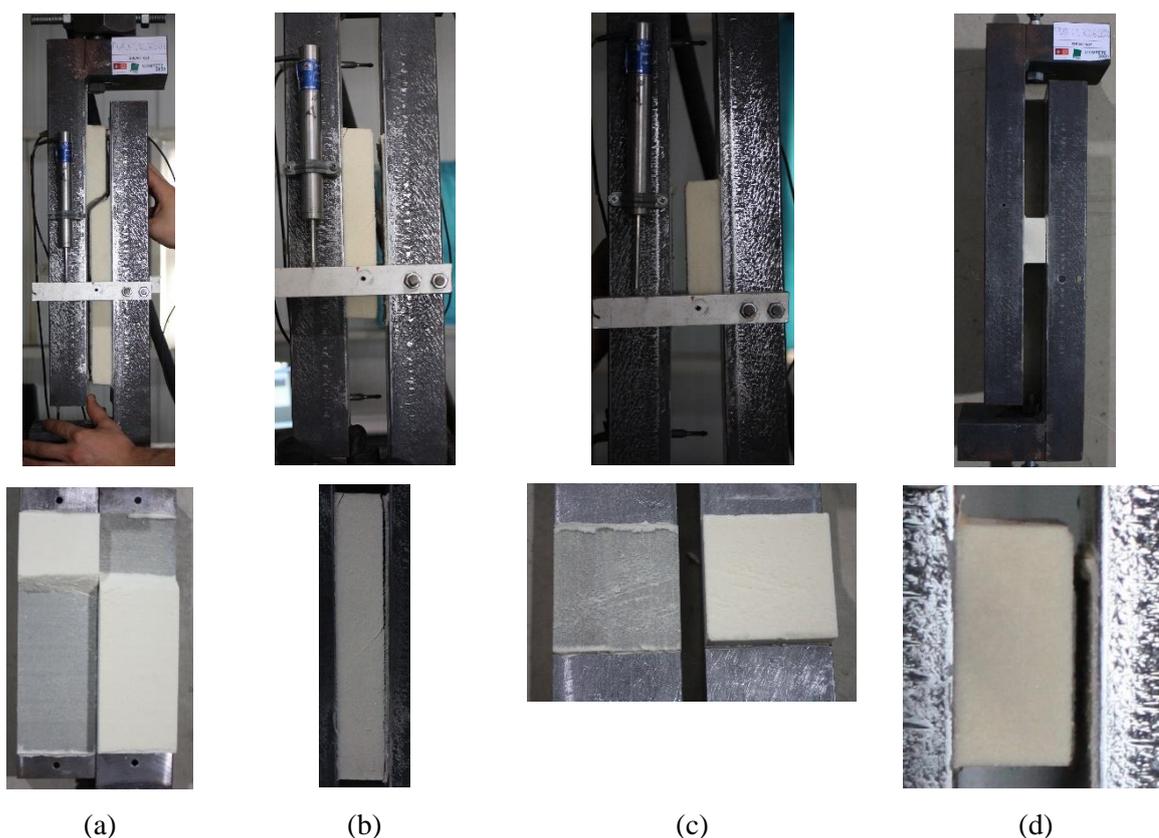


Figura 3.21 - Modos de rotura típicos: (a) PUR_ST_30_360; (b) PUR_ST_30_180; (c) PUR_ST_30_120 e (d) PUR_ST_30_60.

A Figura 3.22 apresenta as curvas médias $\tau - \gamma$ obtidas a partir dos ensaios experimentais individuais que compõem cada série, relativas ao Grupo I (provetes com espessura de 30 mm). Analisando essa figura, conclui-se que a geometria do provete tem influência no comportamento ao corte, em especial, para níveis de carga mais elevados próximos da rotura.

De modo a comparar as respostas obtidas, toma-se como curva de referência aquela que é dada pela série PUR_ST_30_360, uma vez que é a única que cumpre a relação L/t especificada na norma. Pela análise do gráfico da Figura 3.22, é possível averiguar que quando essa relação diminui de 12 para 6 (PUR_ST_30_180), apesar de os parâmetros em estudo serem ligeiramente inferiores, a resposta apresenta um comportamento semelhante ao de referência, embora ligeiramente diferente. Contudo, à medida que essa relação decresce, a resposta altera-se substancialmente uma vez que o comportamento se afasta da curva de referência. Apesar disso, na fase inicial linear, o comportamento de todas as séries é muito próximo (i.e., para a mesma distorção apresentam uma tensão de corte bastante semelhante; isto ocorre até uma distorção de aproximadamente 0.025. Por outro lado, o ramo linear é tanto mais extenso quanto maior for

a relação L/t . De igual forma o ramo não linear aumenta com o aumento da relação L/t , conduzindo a respostas mais dúcteis.

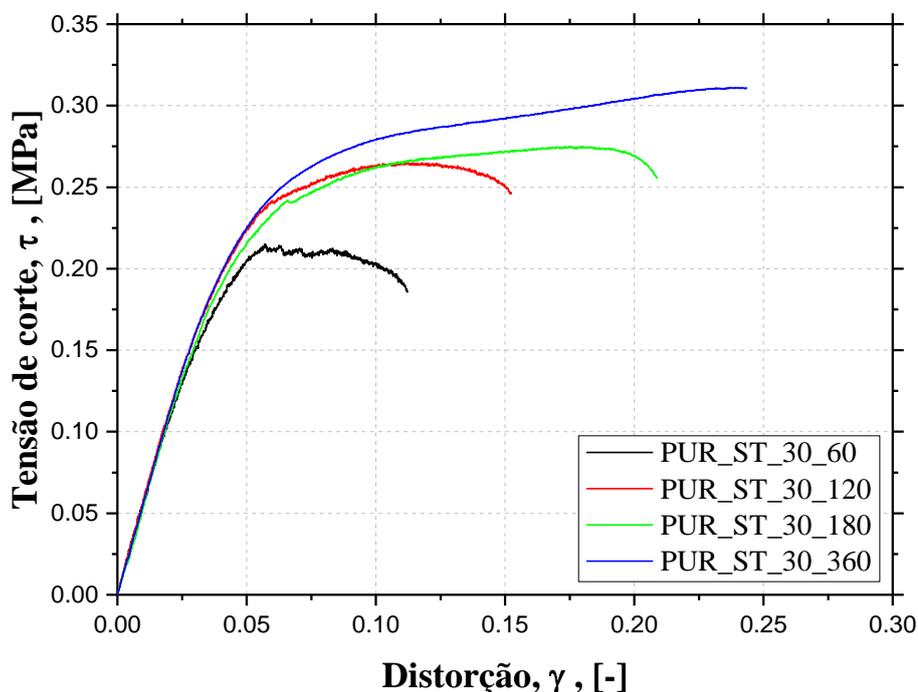


Figura 3.22 - Curvas médias da relação entre a tensão de corte e a distorção para as séries do Grupo I.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 3.8, constata-se que, com o aumento da relação L/t do provete, ocorre um aumento da $F_{\max,ap}$, $\tau_{\max,ap}$ e $\gamma_{ult,ap}$. Além disso, e como espectável, os valores obtidos para $F_{\max,2\%}$ e $\tau_{\max,2\%}$ são bastante inferiores aos valores máximos que se obtêm na rotura do provete. Essa diferença é cada vez maior à medida que a relação L/t aumenta. Neste Grupo I, a série de referência tem um módulo de corte igual a 5.55 MPa, um $F_{\max,2\%}$ igual a 11.26 kN e um $F_{\max,ap}=13.81$ kN (+22.4%). Por sua vez, $\tau_{\max,2\%}=0.26$ MPa, o $\tau_{\max,ap}=0.32$ MPa (+22.4%), o $\tau_{\max,2\%}=0.07$ e o $\gamma_{ult,ap}=0.26$ (+171%). Relativamente às outras relações L/t estas diferenças foram de 22.19%, 16.67% e 200% para a série PUR_ST_30_180, de 8.54%, 8% e 142% para a série PUR_ST_30_120 e de 3.90% e de 4.76% e 100% para a série PUR_ST_30_60, respetivamente. A densidade para as séries analisadas não apresentou variações significativas (máximo 2%). No geral, a dispersão de resultados é reduzida.

Com base nestes resultados é possível concluir que as propriedades que se pretendem obter dependem substancialmente do campo de deformação e da geometria do provete, nomeadamente da relação entre a espessura e o comprimento e tal deve-se essencialmente ao

efeito estrutural do sistema de ensaio. Como se verifica, é essencial que o provete possua um comprimento suficientemente grande (não inferior a 12 vezes a espessura tal como sugere a norma ASTM C273-00) de modo a minimizar o efeito estrutural provocado pelo sistema de ensaio no provete. Assim sendo, é relevante ter em conta a geometria do provete quando se pretendem determinar as propriedades de corte o mais próximo possível do material. Por outro lado, provetes demasiado grandes (quando usadas espessuras grandes) apresentam alguns inconvenientes associados à preparação da colagem do provete e posteriormente ao espaço necessário para o ensaio à rotura e à fluência em ambiente controlado.

Embora a diminuição da relação espessura – comprimento (L/t) permita obter valores inferiores e menos exatos das propriedades de corte, importa referir que estes são conservativos, uma vez que os parâmetros obtidos apresentam uma gama de valores adequada e inferior aos provetes idealizados pela norma. De um modo geral, apesar da força máxima aparente apresentar, tal como expectável, uma variação considerável (-88%, comparando a série 30_60 com a 30_360), esta não é tão acentuada no que diz respeito à tensão máxima aparente (-31%, comparando a série 30_360 com a 30_60) e módulo de corte (-13%, comparando a série 30_60 com a 30_360).

Tabela 3.8 - Valores médios dos principais parâmetros obtidos para as séries que compõem o Grupo I de ensaios.

Série1	ρ [kg/m ³]	$F_{\max,2\%}$ [kN]	$\tau_{\max,2\%}$ [MPa]	$\gamma_{ult,2\%}$ -	$F_{\max,ap}$ [kN]	$\tau_{\max,ap}$ [MPa]	$\gamma_{ult,ap}$ -	G [MPa]	MR
30_360	67,21 (1.34%)	11,26 (4.57%)	0,26 (4.69%)	0,07 (1.52%)	13,81 (3.77%)	0,32 (3.88%)	0,26 (11.49%)	5,55 (3.42%)	I(2);S(4)
30_180	66,42 (0.62%)	5,16 (2.47%)	0,24 (2.48%)	0,07 (2.01%)	5,91 (2.64%)	0,28 (2.44%)	0,21 (0.80%)	5,20 (1.48%)	I(3)
30_120	65,84 (0.00%)	3,51 (1.64%)	0,25 (1.86%)	0,07 (1.14%)	3,81 (1.18%)	0,27 (1.30%)	0,17 (6.54%)	5,15 (3.96%)	I(3)
30_60	67,58 (2.41%)	1,54 (4.25%)	0,21 (4.27%)	0,06 (3.27%)	1,60 (4.09%)	0,22 (4.28%)	0,12 (3.03%)	4,84 (6.09%)	I(3)

Notas: (1) os resultados entre parêntesis (exceto na coluna MR) representam o coeficiente de variação (CoV). (2) MR – modos de rotura: I = rotura pela interface adesivo/PUR; S = rotura por corte do poliuretano. Para cada série, o valor que se encontra entre parêntesis indica o nº de ensaios em que ocorreu o respetivo modo de rotura.

Na Figura 3.23 apresenta-se a influência dos parâmetros em análise no quadro anterior com a relação L/t.

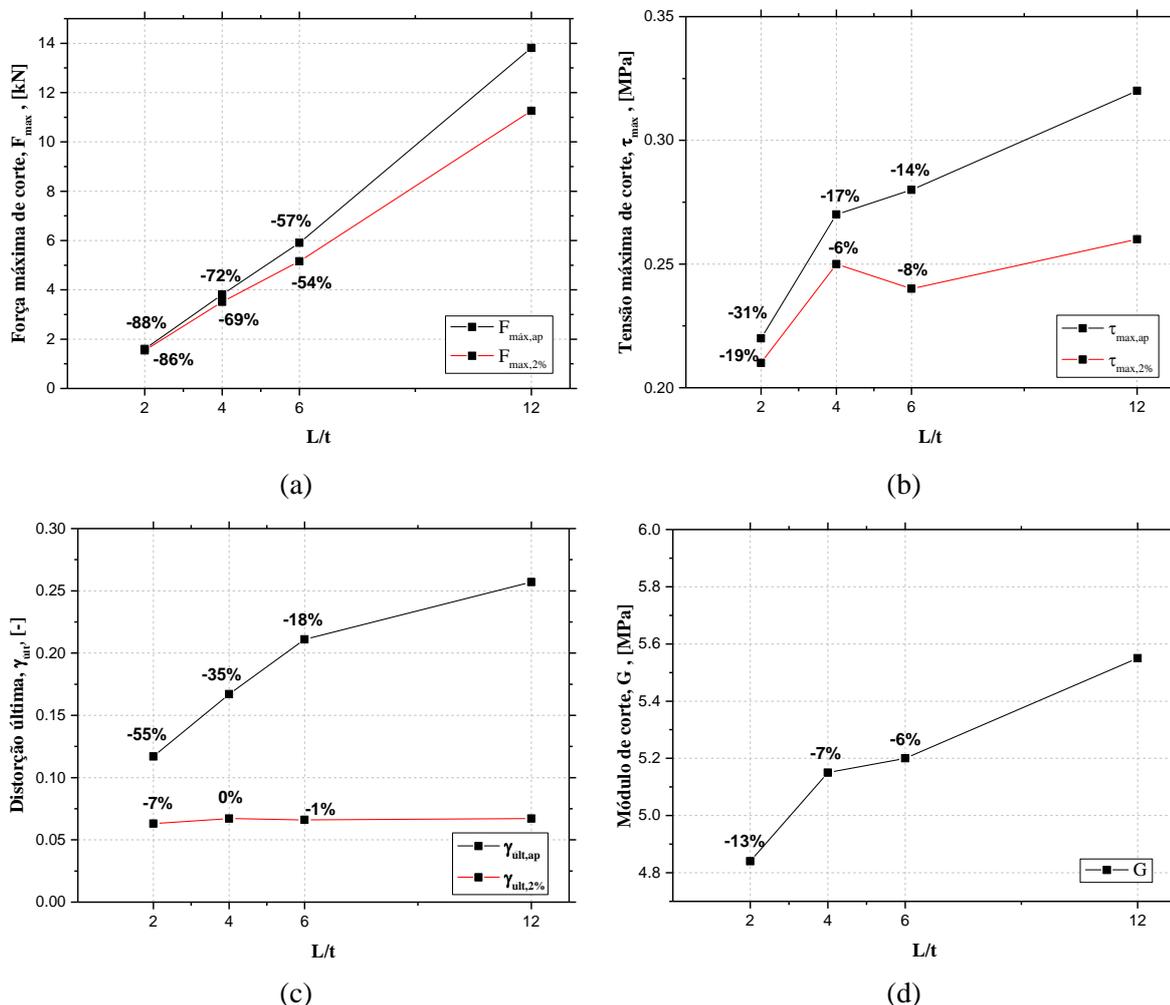


Figura 3.23 - Influência das variáveis em estudo no Grupo I de ensaios com a relação L/t. Nota: comparação relativamente à série cuja relação L/t=12.

3.3.3.3 Grupo II

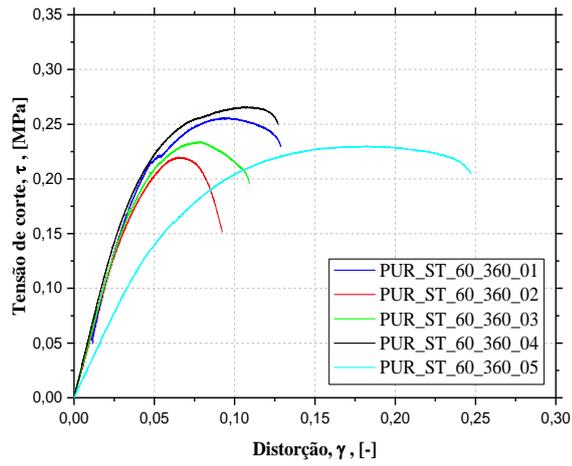
Na Figura 3.24 encontram-se as curvas $\tau - \gamma$ relativas a todos os provetes ensaiados no Grupo II, bem como uma breve descrição individualizada das respostas e modos de rotura. Os modos de rotura típicos, rotura na interface adesivo/PUR, são apresentados na Figura 3.25, sendo que as fotografias dos modos de rotura de cada provete encontram-se no ANEXO IV.

Nos provetes com 360mm de comprimento – Série 1 –, as respostas apresentam um comportamento concordante, à exceção do provete 5 (Figura 3.24a). Apesar disso, é notável a

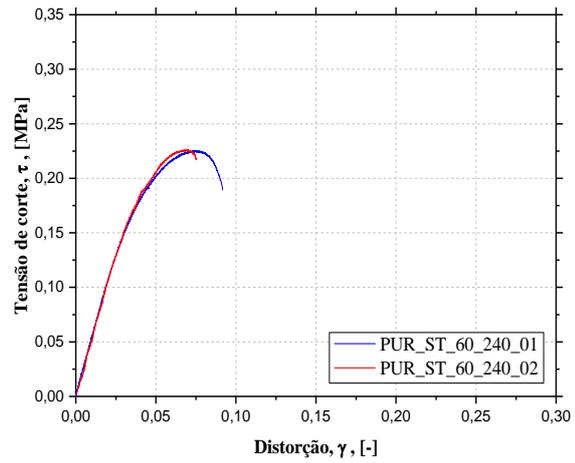
diferença ao nível da tensão de corte e distorção. Apesar dos provetes terem rompido pela interface adesivo/PUR, verifica-se que os provetes 2 e 3 apresentam algumas peculiaridades, nomeadamente uma resposta inferior à dos provetes 1 e 4 e algumas zonas descoladas. Enquanto a zona que descolou do provete 3 é do tamanho de uma moeda de 0.10 euros no caso do provete 2 a zona descolada é superior (ver ANEXO IV). Como se pode ver na Figura 3.24a, estes acontecimentos limitaram a capacidade de carga do provete, tal como expectável devido à redução de área que resiste ao corte. Por sua vez, o provete 5, apesar de ter um modo de rotura sem qualquer tipo de descolamento, apresenta uma resposta bastante diferente dos restantes: não obstante a proximidade relativamente aos ramos lineares dos outros casos, o provete 5 apresenta um $F_{\max,ap}$ e um $\tau_{\max,ap}$ inferior ao médio em 5.8% e 5.9%, respetivamente, $\gamma_{ult,ap}$ superior ao valor médio em 53%, módulo de distorção inferior em 71% relativamente ao valor médio. Por esse motivo, o espécime em questão não foi contabilizado na resposta e nos valores dos parâmetros médios (ver Figura 3.25^a e ANEXO IV).

No caso dos provetes com 240 mm de comprimento – Série 2 –, verifica-se que as respostas são bastantes similares (Figura 3.24b). Dado que apenas foram ensaiados e analisados 2 provetes, a dispersão de resultados não tem significado. No entanto, os ensaios efetuados são concordantes ao nível da resposta e modo de rotura que ocorreu pela interface adesivo/PUR (Figura 3.25b e ANEXO IV).

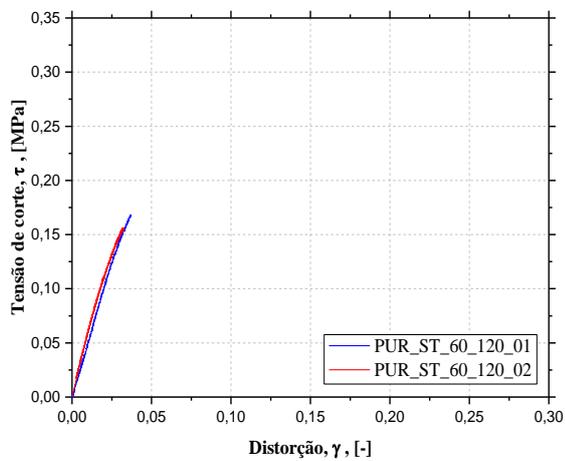
Os espécimes com um comprimento de 120 mm de comprimento – Série 3 – apresentam uma resposta idêntica, contudo com algumas diferenças ao nível da distorção *versus* tensão de corte (Figura 3.24c). Embora o provete 1 apresente valores últimos para a distorção e tensão de corte ligeiramente superiores, 0.17MPa e 0.04 respetivamente, analisando a resposta verifica-se que a tensão de corte para o mesmo grau de distorção é superior no caso do provete 2 na maior parte da resposta. Em ambos os casos, a rotura ocorreu na interface adesivo/PUR (Figura 3.25c e ANEXO IV). Como apenas foram ensaiados 2 provetes deste tipo, a dispersão de resultados não tem significado.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.24 - Relação entre a tensão de corte e a distorção: ensaios relativos aos provetes (a) PUR_ST_60_360; (b) PUR_ST_60_240 e (c) PUR_ST_60_120.

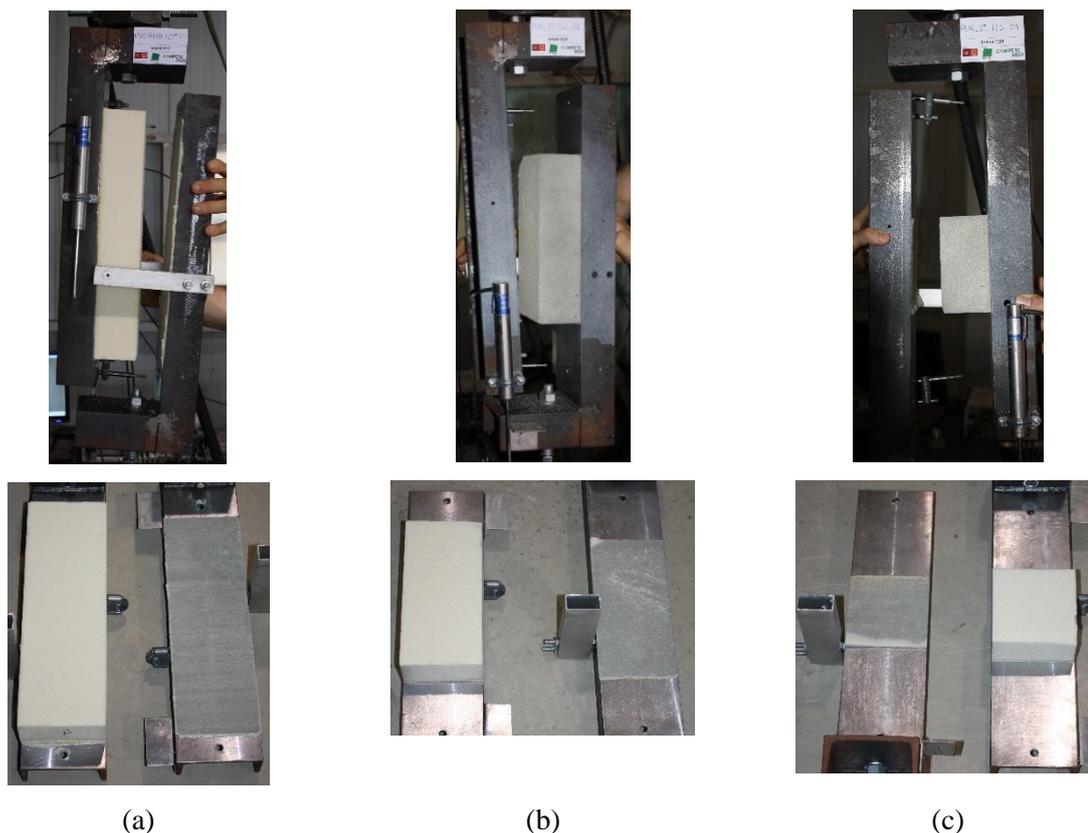


Figura 3.25 - Modos de rotura típicos: (a) PUR_ST_60_360; (b) PUR_ST_60_240 e (c) PUR_ST_30_120.

A Figura 3.26 apresenta as curvas médias τ - γ obtidas a partir dos ensaios experimentais individuais que compõem cada série, relativas ao Grupo II (provetes com espessura de 60 mm). Analisando a Figura 3.26, verifica-se que as respostas diferem tendo em conta o comprimento do provete, tal como acontece no Grupo I. Dado que nenhum dos provetes cumpre $L/t \geq 12$, será tomada como curva de referência a curva média do provete com relação L/t mais elevada (PUR_ST_60_360). A partir do gráfico observa-se que as respostas dos provetes com 360 e 240 mm apresentam o mesmo comportamento. Embora a resposta média do provete-tipo PUR_ST_60_120 apresente um ramo não linear elástico mais curto e menos perceptível (modo de rotura mais frágil), o comportamento é semelhante no que diz respeito à fase inicial linear. À semelhança do que acontece para o Grupo I, a tensão de corte, para o mesmo nível de distorção, é superior no provete-tipo cuja relação L/t é superior. Contrariamente às respostas médias dos provetes do Grupo I, as respostas dos provetes do Grupo II não apresentam um patamar de ductilidade tão relevante.

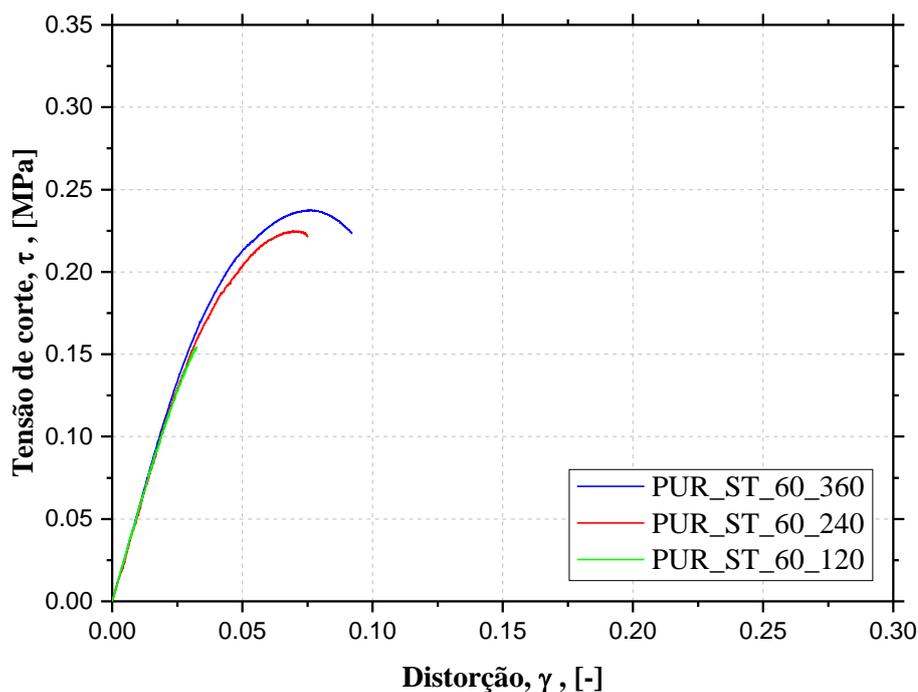


Figura 3.26 - Curvas médias que traduzem a relação entre a tensão de corte e a distorção dos provetes-tipo que compõem a série 2.

Pela análise do gráfico e da Tabela 3.9 verifica-se que os resultados médios da presente série apresentam a mesma lógica apresentada no Grupo I, corroborando os comentários efetuados para a mesma. Analisando os valores obtidos para cada provete tipo, verifica-se que todos os valores máximos dizem respeito ao PUR_ST_60_360_XX. Esta tipologia possui um módulo de corte igual a 5.24 MPa, um $F_{\max,2\%}$ igual a 9.93 kN e um $F_{\max,ap}=10.42$ kN (+5%). Por sua vez, $\tau_{\max,2\%}=0.23$ MPa e o $\tau_{\max,ap}=0.24$ MPa (+5%), sendo $\gamma_{ult,2\%}=0.064$ e o $\gamma_{ult,ap}=0.24$ (+78%). Relativamente aos outros provetes estas diferenças foram de 1.35%, 1.35% e 31% para o provete PUR_ST_60_240. Dada a pouca deformabilidade do PUR_ST_60_120, não foi possível obter os valores para uma deformação de corte de 2%. A densidade varia entre os 66.43 kg/m³ e os 67.60 kg/m³. De um modo geral, a dispersão de resultados entre provetes do mesmo tipo foi superior à existente no Grupo I, nomeadamente no caso dos provetes com 360mm. A maior dispersão de resultados ocorre no $\gamma_{ult,ap}$ dos provetes cujo comprimento é de 360mm e tem um valor de 13.00%. Nos valores para uma deformação de corte de 2%, a dispersão em termos de distorção é bastante inferior.

Tabela 3.9 - Valores médios dos principais parâmetros obtidos para as séries que compõem o Grupo II de ensaios.

Série2	ρ [kg/m ³]	$F_{\max,2\%}$ [kN]	$\tau_{\max,2\%}$ [MPa]	$\gamma_{\text{ult},2\%}$ -	$F_{\max,\text{ap}}$ [kN]	$\tau_{\max,\text{ap}}$ [MPa]	$\gamma_{\text{ult},\text{ap}}$ -	G [MPa]	MR
60_360	67.60 (1.59%)	9,93 (4.20%)	0,23 (4.37%)	0,0642 (1.56%)	13,81 (3.77%)	0.24 (7.46%)	0.1144 (13.00%)	5.24 (3.31%)	I(5)
60_240	66.43 (0.87%)	6,36 (0.61%)	0,22 (0.54%)	0,0637 (1.28%)	5,91 (2.64%)	0.23 (0.17%)	0.0835 (10.00%)	5.07 (2.27%)	I(2)
60_120	67.86 (0.01%)	-	-	-	3,81 (1.18%)	0.16 (3.77%)	0.0358 (6.52%)	4.90 (0.60%)	I(2)

Notas: (1) os resultados entre parêntesis (exceto na coluna MR) representam o coeficiente de variação (CoV). (2) MR – modos de rotura: I = rotura pela interface adesivo/PUR; S = Rotura por corte do poliuretano. Para cada série, o valor que se encontra entre parêntesis indica o n° de ensaios em que ocorreu o respetivo modo de rotura.

Na Figura 3.27 apresenta-se a influência dos parâmetros em análise no quadro anterior com a relação L/t .

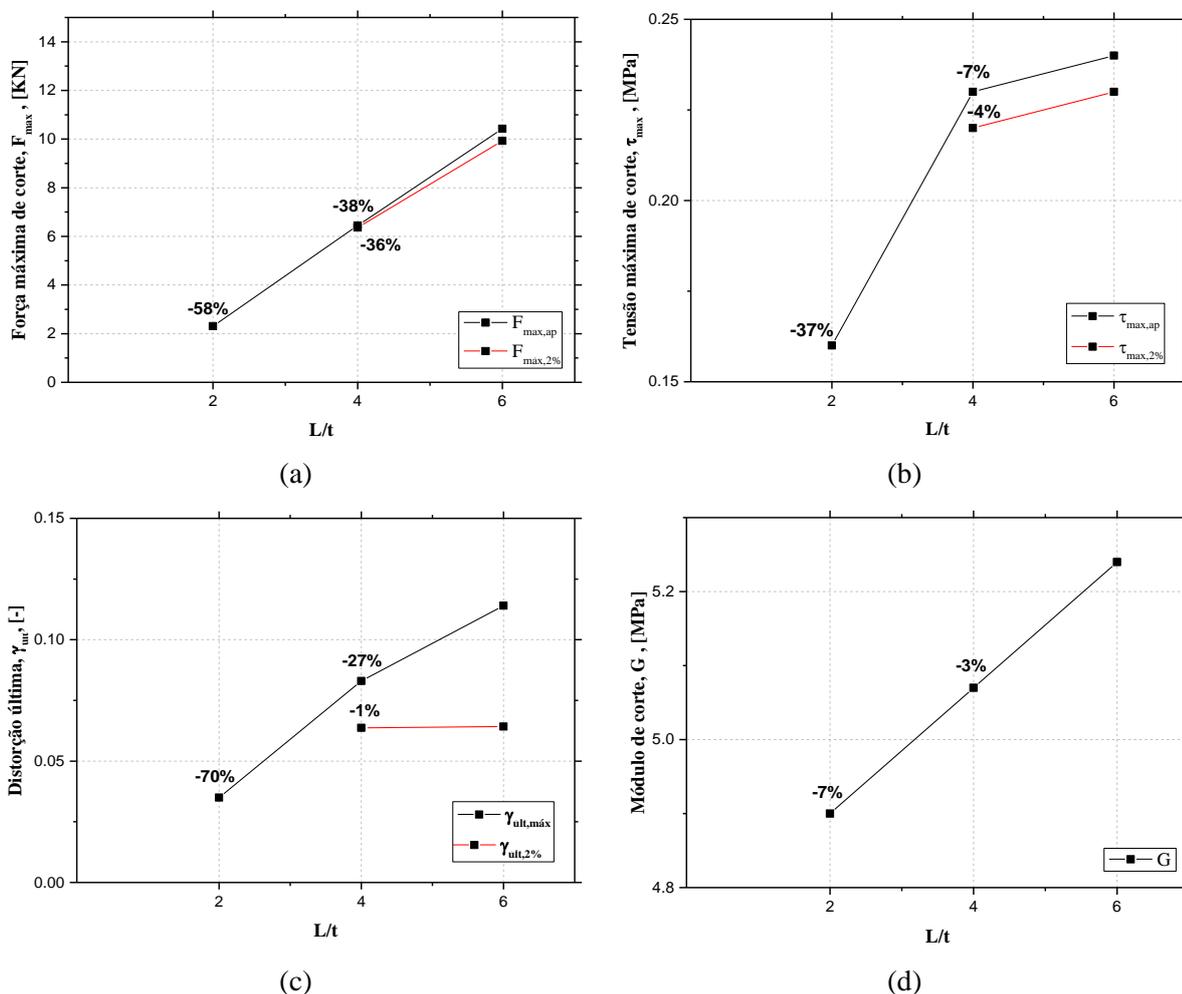


Figura 3.27 - Influência das variáveis em estudo no Grupo II de ensaios com a relação L/t . Nota: comparação relativamente à série cuja relação $L/t=6$.

3.3.3.4 Análise do Grupo I e II

Analisada a influência do comprimento de provetes para uma mesma espessura (Grupo I e II) na resposta ao corte do PUR, nesta secção é feita uma análise global dos todos os ensaios realizados. Com esse objetivo, será efetuada uma análise comparativa entre os parâmetros extraídos em ambos os grupos de ensaios realizados.

A Figura 3.28 apresenta as curvas médias τ - γ obtidas a partir dos ensaios experimentais para todas as séries. Analisando a figura, é evidente a diferença de comportamento entre as séries, assim como a importância ao nível da relação entre o comprimento e a espessura dos provetes.

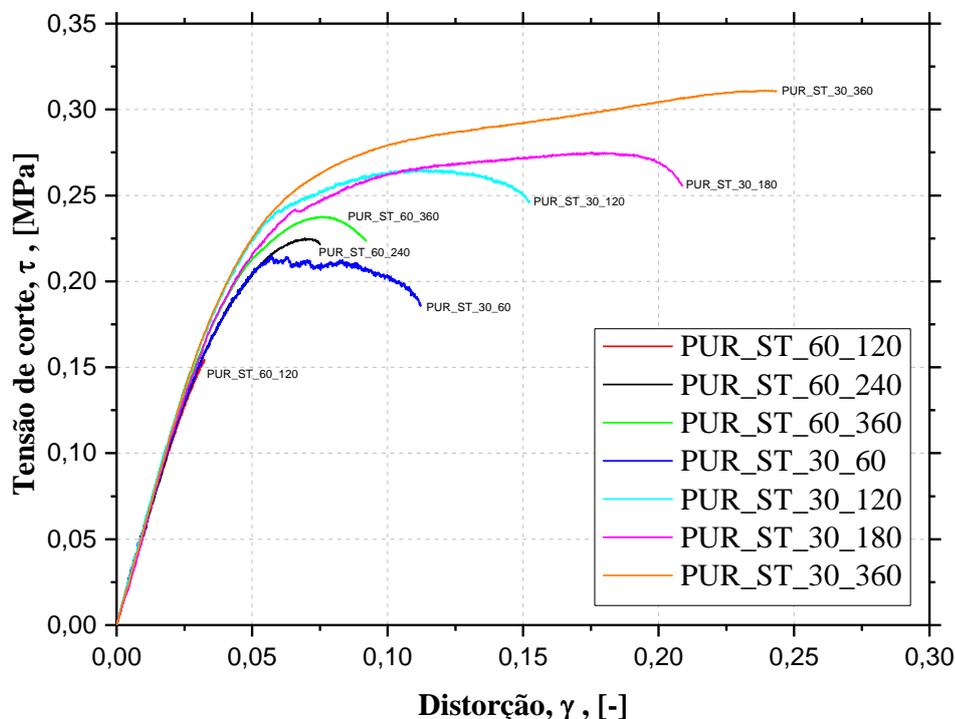


Figura 3.28 - Curvas médias relativas à relação entre a tensão de corte e a distorção (todas as séries).

Na Figura 3.29 apresenta-se a comparação da força máxima de corte entre provetes com a mesma relação L/t de ambos os grupos. Da análise da figura, constata-se que, como previamente referido, a força máxima cresce consoante o aumento de L/t , sobretudo no Grupo II (Figura 3.29a). Para uma relação L/t igual, averigua-se que os provetes do Grupo II apresentam uma resistência de corte superior, como não poderia deixar de ser, uma vez que a área de corte desses provetes é 2 vezes superior à dos do Grupo I. Apesar disso, esta diferença nunca chega a ser o dobro, não havendo, portanto, uma relação diretamente proporcional entre a área de corte e a respetiva força. Na presença de um L/t igual a 4 e 6, o $F_{\max,2\%}$ dos provetes da série 2 aumentou em 81%, 92%, respetivamente em relação ao Grupo I. No caso da resistência de corte na rotura ($F_{\max,ap}$), verifica-se um aumento de 45%, 69% e 76%, na presença de um L/t igual a 2, 4 e 6, respetivamente, em relação ao Grupo I. No entanto, com o aumento de L/t a força máxima aumenta gradualmente, aproximando-se a do Grupo II ao dobro da do Grupo I, especialmente no caso da $F_{\max,2\%}$. Isto acontece porque o efeito estrutural provocado pelo sistema de ensaio

no provete é minimizado à medida que L/t aumenta, provendo o PUR de uma distribuição de tensão cada vez mais uniforme.

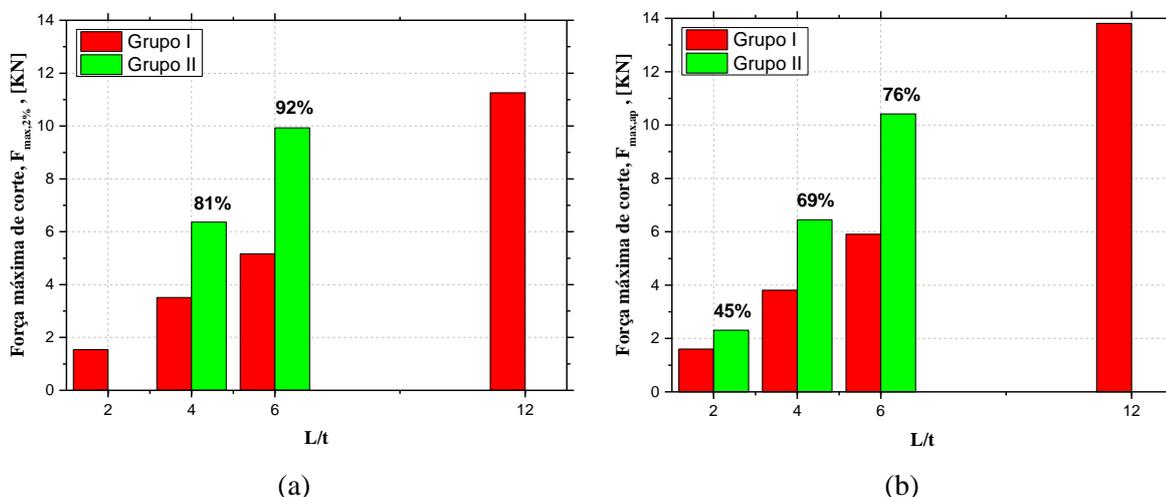


Figura 3.29 - Comparação da força máxima de corte entre provetes de ambos os Grupos com a mesma relação L/t : (a) força para uma deformação de corte de 2%, $F_{\max,2\%}$, e (b) força na rotura, $F_{\max,ult}$ (valor aparente). Nota: comparação relativamente ao Grupo I.

Na Figura 3.30 apresenta-se a comparação da tensão máxima de corte entre provetes com a mesma relação L/t de ambos os Grupos. Tal como referido anteriormente, observa-se, de um modo geral, o aumento da tensão de corte com o aumento de L/t em ambos os Grupos. Para provetes com a mesma relação L/t , contrariamente ao que se verificou para a força máxima de corte, constata-se que o Grupo I apresenta valores de tensão máxima de corte superiores relativamente ao Grupo II. Tal deve-se ao facto de a área de corte aumentar, do Grupo I para o Grupo II, numa proporção superior à força. Na presença de um L/t igual a 4 e 6, o valor $\tau_{\max,2\%}$ dos provetes da Grupo II diminuiu -4% e -9% respetivamente, relativamente ao Grupo I. No caso de $\tau_{\max,ap}$ essa diminuição foi de -27%, -15% e -12% em relação ao Grupo I, respetivamente. Verifica-se que a variação de resultados obtidos na rotura, $\tau_{\max,ult}$, (Figura 3.30b) é superior à dos valores obtidos para $\tau_{\max,2\%}$, tal como seria expetável.

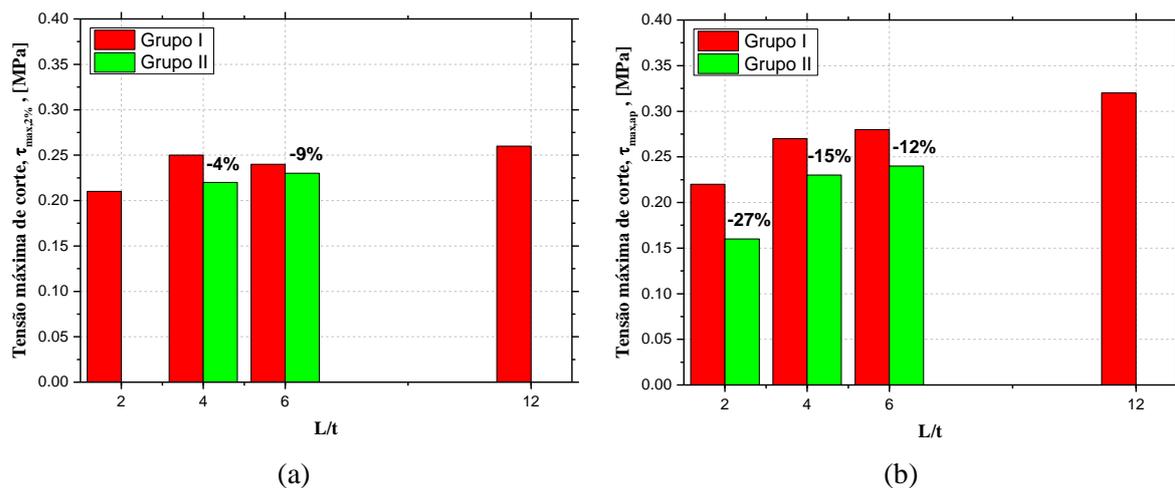


Figura 3.30 - Comparação da tensão máxima de corte entre provetes de ambos os Grupos com a mesma relação L/t: (a) tensão para uma deformação de corte de 2%, $\tau_{\max,2\%}$, e (b) tensão na rotura, $\tau_{\max,ult}$ (valor aparente). Nota: comparação relativamente ao Grupo I.

Na Figura 3.31 apresenta-se a comparação da distorção última de corte máxima entre provetes com a mesma relação L/t de ambos os Grupos, verificando-se que os provetes do Grupo I apresentam valores superiores. Quando se comparam os valores obtidos para $\gamma_{ult,2\%}$ e $\gamma_{ult,ap}$, constata-se que o aumento da relação L/t assume uma menor preponderância nos primeiros (campo de extensões uniforme). Por outro lado, quando obtida a distorção na rotura, observa-se, uma vez mais, a minimização do efeito estrutural do sistema de ensaios no provete com o aumento da relação L/t.

Na presença de um L/t igual a 4 e 6, o $\gamma_{ult,2\%}$ dos provetes do Grupo II diminuiriam em -3% e -5%, respetivamente em relação aos do Grupo I. No caso da distorção última na rotura ($\gamma_{ult,ap}$), verifica-se uma diminuição de -70%, -50% e -46%, na presença de um L/t igual a 2, 4 e 6, respetivamente, em relação ao Grupo I.

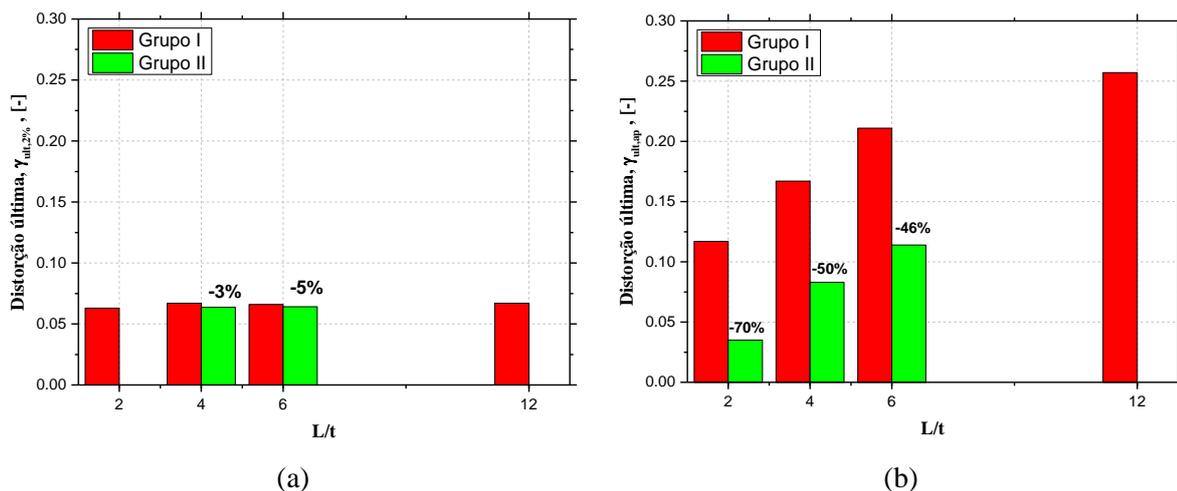


Figura 3.31 - Comparação da distorção última de corte entre provetes de ambos os Grupos com a mesma relação L/t: (a) distorção para uma deformação de corte de 2%, $\gamma_{ult,2\%}$ e (b) distorção na rotura, $\gamma_{ult,ap}$ (valor aparente). Nota: comparação relativamente ao Grupo I.

Na Figura 3.32 apresenta-se a comparação do módulo de corte (G) entre provetes com a mesma relação L/t de ambos os Grupos, observando-se valores bastante semelhantes para todos os provetes. Tal deve-se ao facto de se terem obtido estes valores no ramo linear elástico (tensão de corte uniforme no provete). Na presença de uma relação L/t de 2, 4 e 6, os módulos de corte dos provetes do Grupo II variam relativamente aos da série 1 em 1%, -2% e 1%, respetivamente.

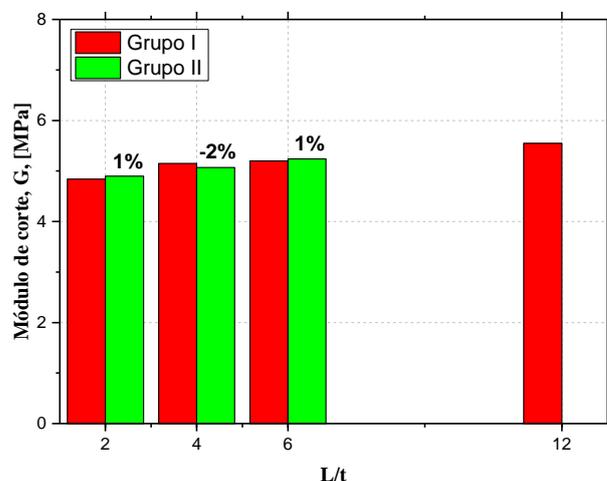


Figura 3.32 - Comparação do módulo de corte entre provetes de ambos os Grupos com a mesma relação L/t. Nota: comparação relativamente ao Grupo I.

De um modo geral, conclui-se que os provetes do Grupo I, embora apresentem uma força máxima de corte mais baixa, possuem uma tensão de corte e distorção última superior aos provetes do Grupo II. Relativamente ao módulo de corte, verifica-se que a gama de valores é

bastante razoável, sendo a variação máxima de cerca de 15% (comparação entre $G=4.84\text{MPa}$ e $G=5.55\text{MPa}$). Como se verifica, apesar dos provetes possuírem a mesma relação L/t , as propriedades obtidas variam, especialmente quando obtidas na rotura, comprovando assim um efeito que deriva da relação entre a geometria do provete e o sistema de ensaio. Esse efeito é minimizado à medida que a relação L/t aumenta.

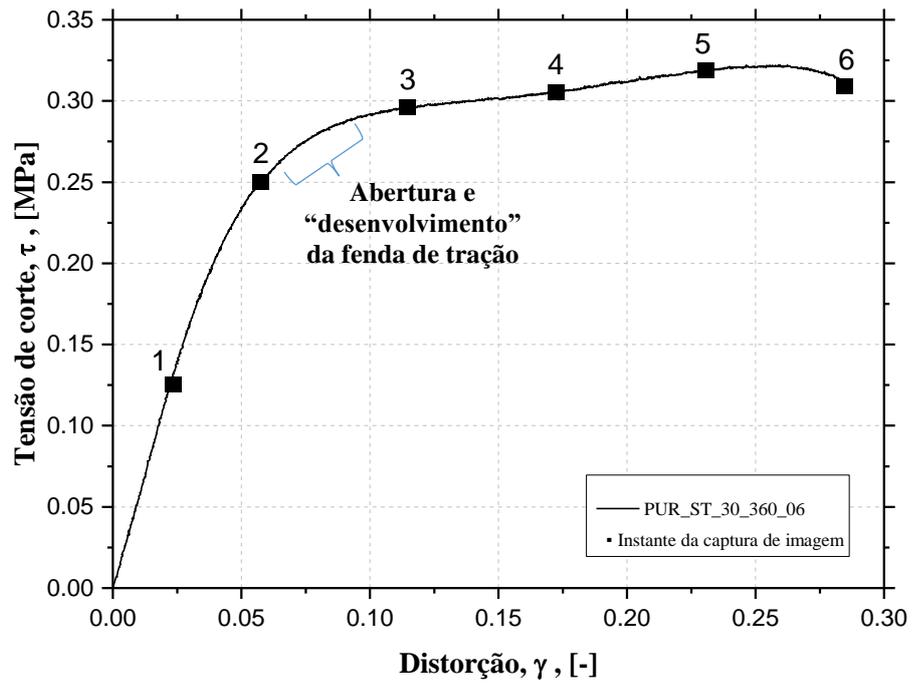
3.3.3.5 Ensaio realizados com DIC

Recentemente, tem-se assistido a um aumento do uso da correlação digital de imagem (DIC) (Pereira *et al.*, 2012) como ferramenta de instrumentação de ensaios. Esta baseia-se na comparação de duas imagens digitais da superfície de um objeto, antes e depois da sua deformação (Chu *et al.*, 1985), permitindo a avaliação de diferenças na evolução do campo de deslocamentos do elemento em análise e respetivas extensões.

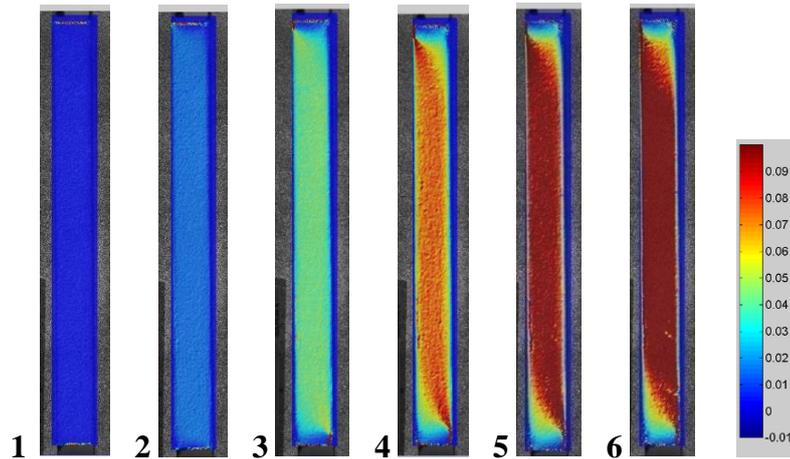
Na presente dissertação foram realizados ensaios com a metodologia DIC em pelo menos um provete tipo de cada série de modo a perceber os mecanismos resistentes do material e respetiva evolução das extensões. Tal como referido, o estudo focou-se apenas na análise dos provetes das séries associadas ao Grupo I. Da informação coletada foram analisados os campos de extensões principais máximas (tração) e mínimas (compressão) e os campos de deformações nas direções YY e XY . O primeiro (YY) permite acompanhar com mais clareza a formação das fendas de tração e a visualização de zonas de forte compressão nas correspondentes faces opostas. O segundo (XY) permite de forma expedita acompanhar a evolução da uniformidade do campo de deformações por corte. Da Figura 3.33 à Figura 3.36 são apresentadas as imagens obtidas em termos de extensões principais e extensões na direção YY . Na Figura 3.37 encontram-se as imagens relativas ao campo de distorções (XY). Em todos os casos é apresentado o momento em que a fotografia foi captada em relação à curva tensão de corte *versus* distorção. As fases apresentadas dizem respeito a um nível de distorção idêntico entre provetes, representando o ramo linear onde a tensão de corte é uniforme e o ramo não linear onde o campo de tensões não é uniforme. A última imagem captada diz respeito ao momento antes de ter ocorrido a rotura. Na análise da imagem foi necessário aumentar a zona de interesse e, por essa razão, aparecem zonas (junto às arestas) que não fazem parte da análise do provete apesar de se encontrarem coloridas.

De um modo geral, os resultados mostram que no ramo linear elástico (antes da formação das fendas de tração) – Fases 1 e 2 – o campo de extensões de corte é relativamente uniforme em todo o provete e o valor das extensões é reduzido. Ainda nessas fases, observa-se que as extremidades (condição fronteira) do provete apresentam zonas perturbadas (extensões não uniformes) que são essencialmente induzidas pela configuração de ensaio (efeito estrutural do ensaio). À medida que a carga de corte vai aumentando, essas condições vão se tornando cada vez mais importantes, induzindo esforços de tração e zonas de forte compressão nas correspondentes faces opostas e em ambas as extremidades do provete. Deste modo, geram-se fendas de tração em cada uma das extremidades tracionadas que vão progredindo verticalmente, alterando assim as condições iniciais de ensaio, tal como observado à escala macroscópica em laboratório. A partir daí (Fases 3, 4 e adiante), o campo de tensões e extensões do provete altera-se consideravelmente. A extensão no provete passa a atingir valores significativos, originando uma região de grande deformação de corte na diagonal entre os pontos de carga (zona de tração). Imediatamente antes da rotura identificam-se áreas junto às extremidades em que as extensões são mais elevadas (compressão e tração). Todos estes fatores influenciam o modo de rotura e, portanto, a resistência de tração e o módulo de corte, agravando à medida que a relação L/t diminui.

Em todos os provetes, verifica-se um campo de extensões uniformes durante o ramo linear elástico traduzindo-se o mesmo pelo facto da rigidez dos provetes ser similar e da resposta ser coincidente nesse ramo. Tal como se observa a partir das imagens, o provete com uma relação L/t igual a 12 apresenta um campo de tensões e extensões bastante uniforme quer no ramo linear, quer no não linear (dentro do enquadramento anteriormente descrito). Com a diminuição da relação L/t , e para esta fase, verifica-se uma maior não uniformidade das extensões ao longo do provete (Fase 3 – Fase 6). Este comportamento deve-se ao facto do provete não ter um desenvolvimento (comprimento) adequado para que se gerem extensões uniformes.



Extensões principais



Extensões YY

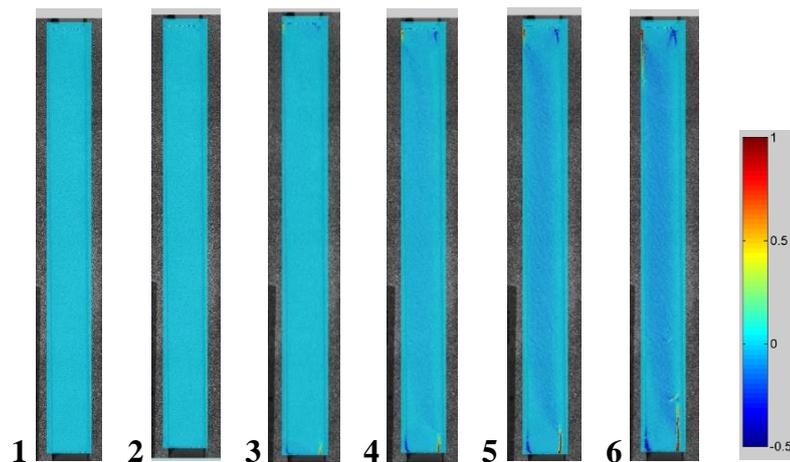
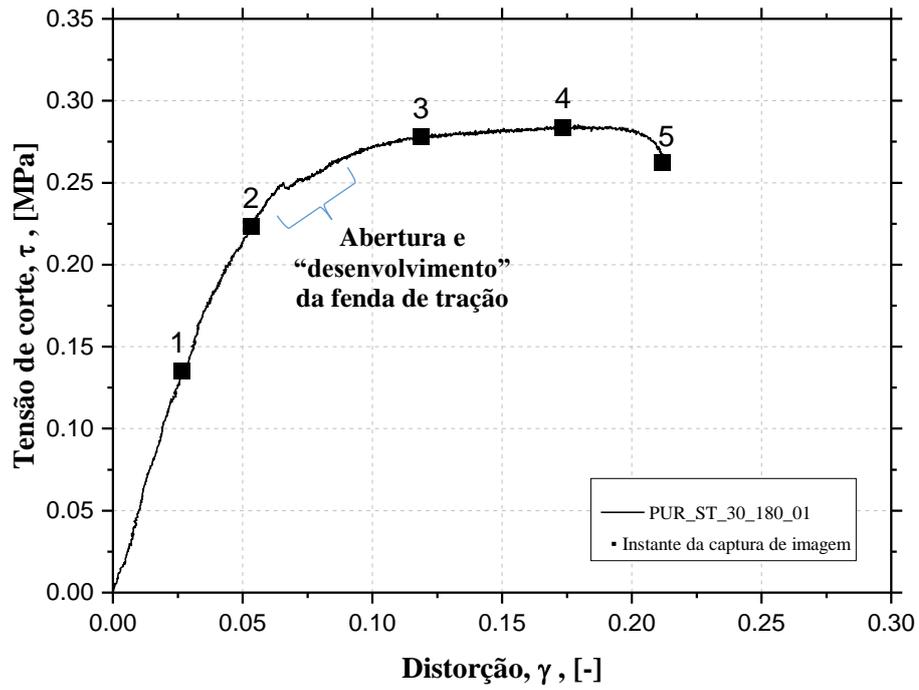
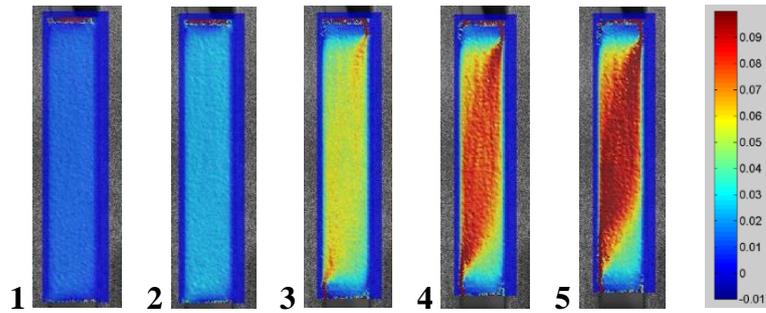


Figura 3.33 - Provete PUR_ST_30_360_06: relação entre a tensão de corte e a distorção ($\tau - \gamma$), em cima; evolução das extensões principais (a meio) e evolução das extensões YY (em baixo). Nota: a numeração nos campos de extensões têm correspondência com a relação $\tau - \gamma$.



Extensões principais



Extensões yy

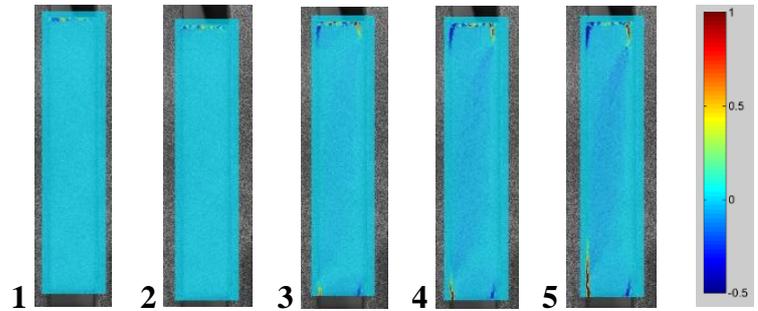


Figura 3.34 - Provete PUR_ST_30_180_01: relação entre a tensão de corte e a distorção ($\tau - \gamma$); evolução das extensões principais (a meio) e evolução das extensões YY (em baixo). Nota: a numeração nos campos de extensões têm correspondência com a relação ($\tau - \gamma$).

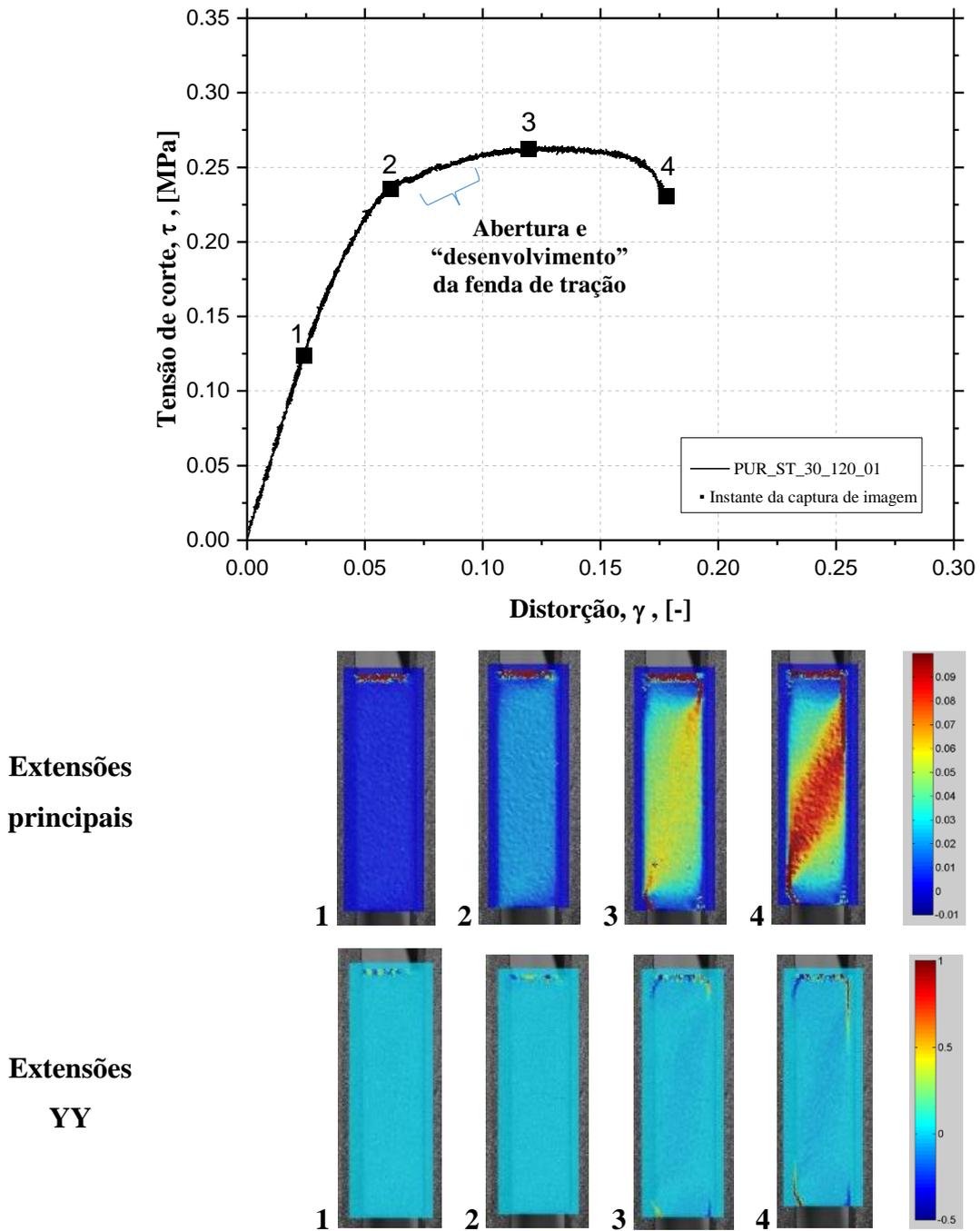
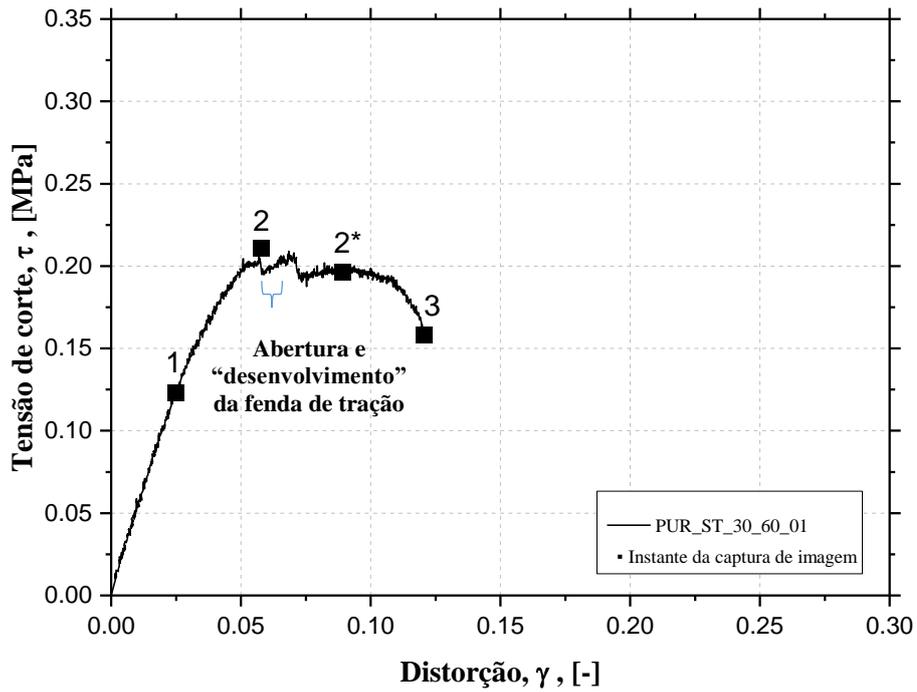
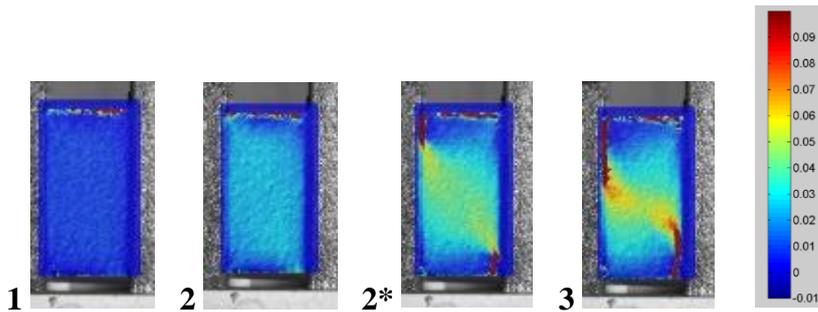


Figura 3.35 - Provete PUR_ST_30_120_01: relação entre a tensão de corte e a distorção ($\tau - \gamma$); evolução das extensões principais (a meio) e evolução das extensões YY (em baixo). Nota: a numeração nos campos de extensões têm correspondência com a relação ($\tau - \gamma$).



Extensões principais



Extensões YY

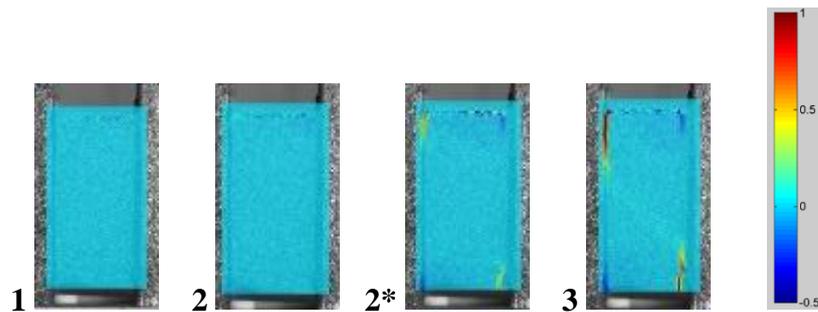
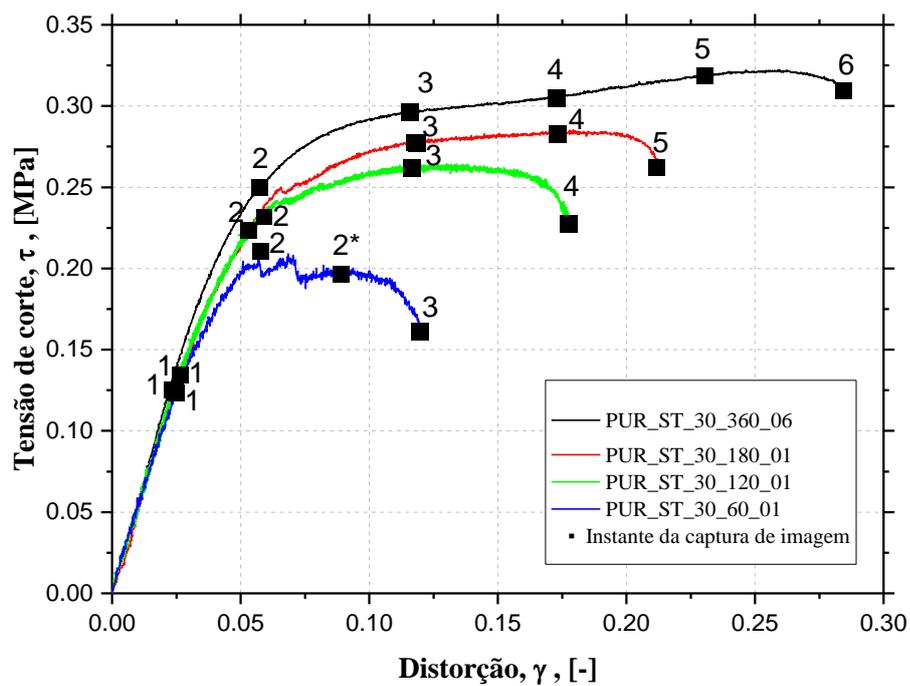


Figura 3.36 - Provete PUR_ST_30_60_01: relação entre a tensão de corte e a distorção ($\tau - \gamma$); evolução das extensões principais (a meio) e evolução das extensões YY (em baixo). Nota: a numeração nos campos de extensões têm correspondência com a relação ($\tau - \gamma$).



Extensões XY - campo de deformação de corte

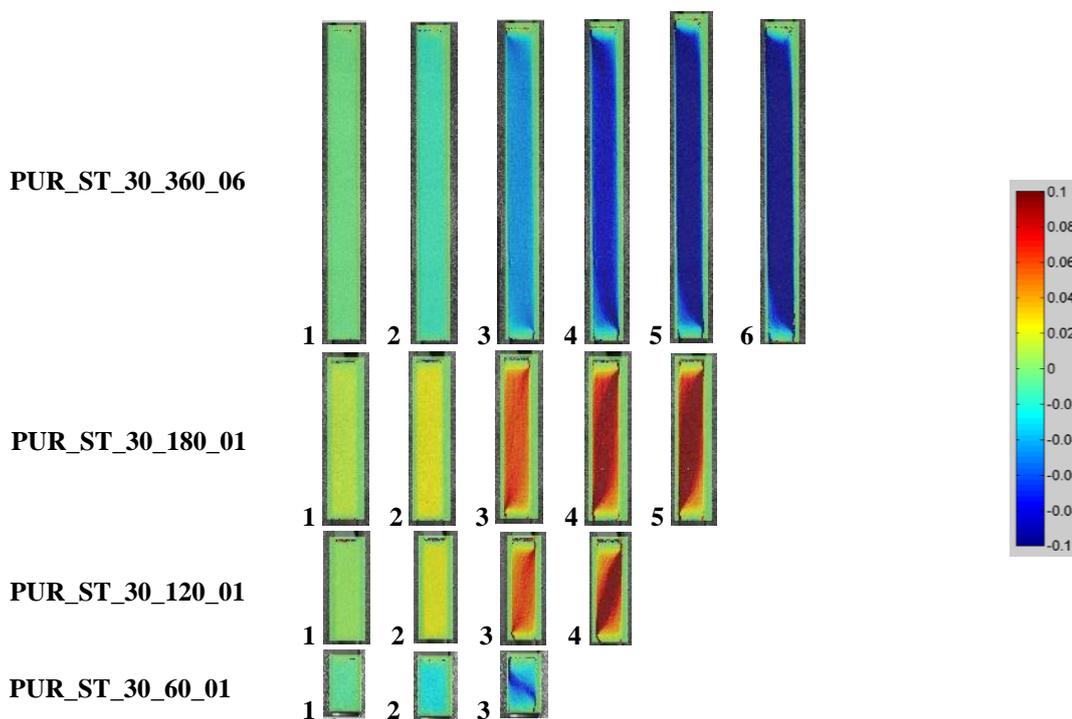


Figura 3.37 - Evolução das extensões XY para todos os provetes do Grupo I. Nota: a numeração nos campos de extensões têm correspondência com a relação $(\tau - \gamma)$.

3.4 Simulações numéricas: Experimental *versus* Numérico

A utilização de ferramentas numéricas suportadas no método dos elementos finitos tem um papel importante junto da comunidade científica, uma vez que permite simular (prever) e analisar estruturas e/ou ensaios executados experimentalmente.

Escolhido o sistema de ensaio e realizado o programa experimental referente à espuma de poliuretano, a segunda fase consistiu em comparar a resposta experimental com a resposta numérica. Nesta fase, modelou-se o problema em estado plano de tensão e utilizaram-se leis constitutivas não lineares para o material em estudo, de modo a avaliar o modo de rotura e a comparar as respostas. Optou-se por simular apenas o modelo referente ao provete que apresenta a relação L/t sugerida pela norma ASTM C273-00, isto é o PUR_ST_30_360. À semelhança da modelação 3D, optou-se por modelar o perfil com a espessura constante de 7 mm.

As simulações numéricas foram realizadas no *software* de elementos finitos *FEMIX 4.0*, tendo sido usadas também as interfaces gráficas *GID* e *Drawmesh* onde se fez o pré e o pós-processamento (Sena-Cruz *et al.*, 2007).

Antes de se efetuar a análise não linear, começou-se por modelar o problema como linear elástico e isotrópico, de modo a comparar com o modelo de referência (modelo tridimensional). Uma vez validado o modelo partiu-se então para a análise não linear. Nesta simulação recorreu-se à integração numérica de Gauss Legendre com 2×2 pontos de integração e usaram-se elementos de 8 nós do tipo casca (*PLANE_STRESS_QUAD*) para o PUR e para o aço. A ligação entre o PUR e os perfis metálicos foi considerada uma ligação perfeita. As dimensões dos elementos finitos variam entre os 7 mm e os 12 mm, garantindo-se sempre uma relação entre as dimensões inferior a 3. As simulações foram realizadas através da aplicação de um deslocamento prescrito e as condições de apoio são idênticas às utilizadas nas simulações 3D (Figura 3.38a). Adotou-se um comportamento linear elástico para o aço e um comportamento não linear para o PUR. No processo incremental iterativo socorreu-se do método *Newton-Raphson* padrão para a resolução do sistema de equações não lineares e utilizou-se uma tolerância de 1×10^{-3} (Sena-Cruz, 2005).

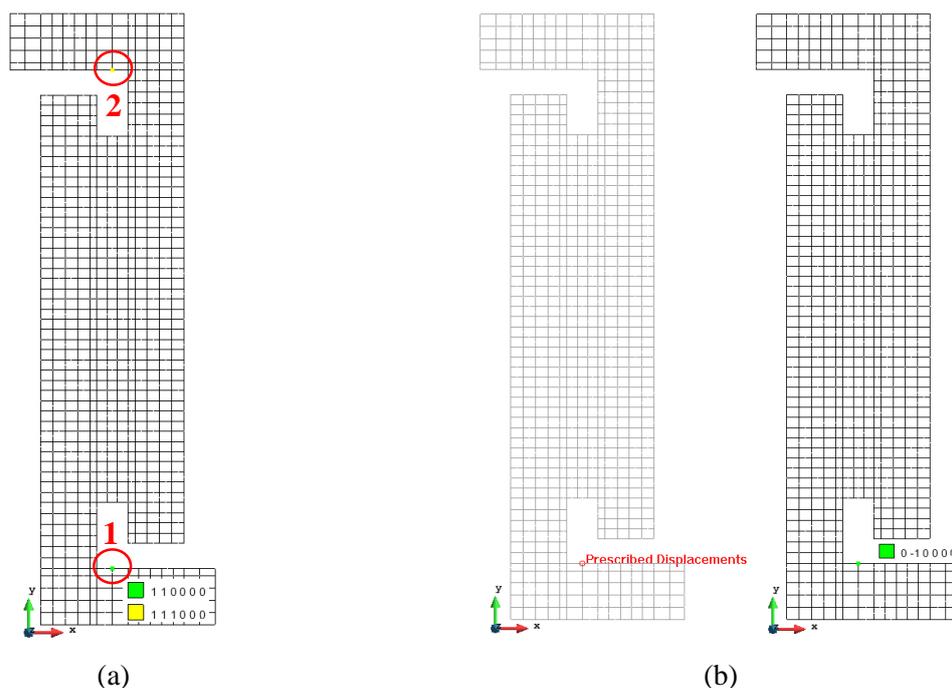


Figura 3.38 - (a) Condições de apoio e (b) deslocamento prescrito incremental aplicado. Notas: os códigos “0” e “1” da figura (a) dizem respeito aos graus de liberdade em que existem condições de apoio (deslocamentos segundo X Y Z e rotações segundo X Y Z), sendo que os graus de liberdade impedidos têm o código “1”. O código “-1” da figura (b) diz respeito à direção em que foi aplicado o deslocamento prescrito (direções X ou Y), sendo que “-1” representa o eixo Y e a direção negativa; os círculos a vermelho indicam os pontos onde foram aplicadas as condições de apoio (pontos 1 e 2).

As propriedades mecânicas utilizadas para a simulação numérica encontram-se na Tabela 3.10. Os valores de densidade, resistência à tração, compressão e o módulo de elasticidade do PUR, foram obtidos a partir dos resultados experimentais obtidos (ver Capítulo 3). Os restantes parâmetros, como o coeficiente de Poisson, foram adotados de acordo com a bibliografia.

Tabela 3.10 - Propriedades do PUR utilizadas na simulação numérica.

Propriedade	Unidade	Experimental	Bibliografia	Adotado
Densidade	kg/m ³	±67	-	67
Resistência à compressão	MPa	0.250	-	0.25
Resistência à tração	MPa	0.325	-	0.275 (-15%)
Módulo de Elasticidade de corte	MPa	14.43	-	14.43
Coeficiente de Poisson	[-]	-	0.3	0.3

Na Figura 3.39 apresenta-se a curva força *versus* deslocamento obtida numericamente, assim como a envolvente experimental obtida nos ensaios de corte do PUR. À semelhança do que acontece experimentalmente, inicialmente aparecem duas fendas junto às extremidades tracionadas. À medida que a carga aumenta o provete apresenta fendas de corte orientadas a $\pm 45^\circ$. Como se observa a resposta é muito similar em termos de rigidez. No entanto, verifica-se que a transição entre o ramo linear elástico e o não linear não é tão suave quanto desejável. Tal relaciona-se com o facto do modelo numérico, nomeadamente as leis constitutivas do material presentes no software, não conseguirem captar na perfeição este tipo de resposta, especialmente a partir do momento em que o provete fissa. Adicionalmente, a escassa informação de parâmetros que permitam um melhor ajuste, como a energia de rotura, dificulta ainda mais a calibração do modelo.

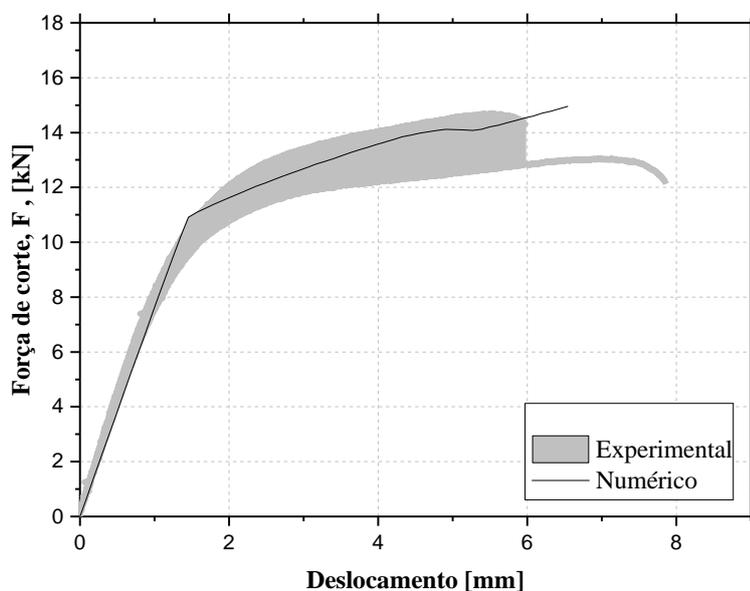


Figura 3.39 - Relação entre a força e o deslocamento para os ensaios de corte do PUR_ST_30_360 - comparação entre a resposta numérica e a experimental.

3.5 Conclusões

O presente capítulo descreveu os ensaios relativos ao comportamento em compressão, tração e corte de uma espuma PUR a utilizar no projeto de investigação “EasyFloor”.

Em compressão, a espuma de poliuretano (PUR) apresenta um comportamento inicial aproximadamente linear até se atingir a força máxima, seguido de um decréscimo da força e de

um patamar com aumento das deformações para valores de força aproximadamente constantes, sendo as deformações residuais elevadas. Identificam-se dois grupos com curvas de evolução semelhante, mas valores distintos, o que se explica pela utilização de diferentes reagentes na produção dos blocos de PUR dos quais os provetes em estudo foram retirados.

Em tração, este material possui um comportamento linear até à rotura, ocorrendo a mesma de um modo frágil. Uma vez mais, são identificados dois grupos distintos de resultados, que apresentam o mesmo modo de rotura e valores de tensão última muito similares, mas rigidez significativamente diferente.

Apesar de se terem identificado dois grupos de provetes quer nos ensaios de compressão, quer nos de tração, constatou-se que, apesar da concordância entre os valores de tensão máxima dos Grupos 1 de ambos os ensaios e dos Grupos 2 de ambos os ensaios, o mesmo não ocorre para a rigidez inicial, pelo que não se pode estabelecer qualquer correlação entre os mesmos.

O ensaio de corte em placa proposto resultou num campo de extensões uniforme até uma distorção de cerca de 5% e num campo de extensões não uniforme a partir daí até à rotura.

Além disso, tal como se observou no programa experimental, os parâmetros de corte dependem tanto da relação L/t como da espessura selecionada. Tal como indica a norma, a relação padronizada não resulta na obtenção de resultados exatos. Contudo, verificou-se que o uso de relações não padronizadas altera os resultados e os respetivos modos de rotura. Concluindo, os resultados obtidos através de relações L/t inferiores são mais baixos do que no caso do uso de relações superiores. Contudo, importa referir que os valores apresentam uma ordem de grandeza aceitável e bastante aproximada no caso do módulo de distorção. Ou seja, na ausência de condições que permitam cumprir integralmente este tipo de ensaio em conformidade com a norma, o uso de relações L/t inferiores fornece valores indicativos razoáveis. No entanto, quando se pretende obter a força máxima com o objetivo de saber os níveis de carga a aplicar nos ensaios de fluência o mesmo não acontece, uma vez que os resultados dependem substancialmente da relação L/t e da espessura. Em suma, o sistema de ensaio apresentou bons indicadores, correspondendo assim ao solicitado. A configuração de ensaio proposta foi validada tanto pelo programa experimental como pelas simulações numéricas. Tendo em conta

os prós e contras relativos às dimensões dos provetes, decidiu-se utilizar para os ensaios de fluência de corte do PUR apenas os provetes do tipo PUR_ST_30_360.

No que diz respeito ao modelo numérico do ensaio de corte em regime não linear, verificou-se que as leis constitutivas existentes no *software* não são adequadas para simular o comportamento deste tipo de material quando ensaiado ao corte, apesar de permitir estimar o comportamento com alguma precisão.

CAPÍTULO 4

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE LÂMINAS DE GFRP e C/GFRP

4.1 Introdução

O painel sanduíche híbrido alvo deste estudo será composto por lâminas/faces e nervuras em GFRP ou C/GFRP e uma matriz cimentícia (camada superior). Deste modo torna-se fundamental estudar e caracterizar mecanicamente várias tipologias de laminados de modo a avaliar a sua performance estrutural. Esta caracterização irá auxiliar a escolha da configuração final das faces e nervuras em GFRP e/ou C/GFRP do painel sanduíche, uma vez que as propriedades mecânicas dependem da arquitetura de fibras, tipo de matriz polimérica utilizada e processo de produção. Conforme previamente observado, enquanto a nervura é solicitada à flexão e ao corte, as faces têm como principal função resistir à flexão (Figura 4.1). Assim sendo, é essencial caracterizar este tipo de laminados em flexão e em tração direta. Para além disso, pretende-se conhecer as propriedades dos perfis pultrudidos da empresa que forneceu o material (ALTO) de modo a enquadrar o mesmo no atual estado de arte relativamente a esta classe de materiais.



Figura 4.1 - Secção transversal com identificação dos seus constituintes. São também apresentados os ensaios a realizar nos materiais retirados de cada parte do painel em FRP: nervura e face inferior.

A partir da realização de ensaios de flexão em provetes de GFRP e C/GFRP obtidos a partir do banzo de vigas em I será possível determinar a resistência em flexão, o módulo de elasticidade em flexão e outros parâmetros relativos ao comportamento de tração *versus* extensão do compósito extrudido de forma indireta. É igualmente importante avaliar os modos de rotura em flexão de forma a verificar a existência, ou não, de fenómenos que originem mecanismos de rotura localizados, apesar de ser expectável que em serviço estas lâminas de material compósito se encontrem sobretudo sujeitas a esforços de compressão e de tração.

A partir de ensaios de tração em provetes de GFRP obtidos a partir da alma e do banzo de vigas em I, será possível determinar a resistência à tração, o módulo de elasticidade em tração e a extensão na rotura do compósito extrudido, que se admite ser representativo da mesma configuração quando pertencente ao painel sanduíche.

Nesse sentido, no âmbito do projeto “EasyFloor”, realizou-se uma campanha experimental que foi concretizada no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST). Neste programa experimental foram ensaiados provetes obtidos a partir de 3 vigas com secção I pultrudidas, produzidas e fornecidas pela empresa ALTO Perfis Pultrudidos, Lda. As vigas diferem ao nível da sua constituição: os provetes das vigas 1 e 2 são constituídos por GFRP e os da viga 3 são em C/GFRP, o que significa que possuem não só fibras de vidro, mas também fibras de carbono. Para os ensaios de flexão, em cada uma das vigas retiraram-se provetes do banzo orientados a 0° relativamente ao eixo longitudinal do perfil ou direção de pultrusão. Para os ensaios de tração retiraram-se também, apenas nas vigas 1 e 2, provetes na alma orientados a 0°, 15° e 30° em relação à direção de pultrusão. Importa referir que não são conhecidas todas as características dos constituintes de cada laminado.

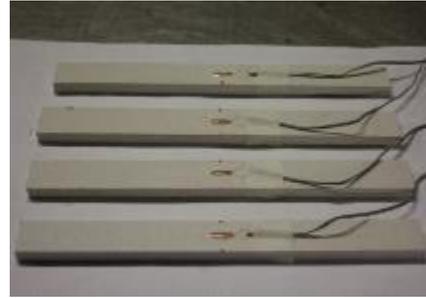
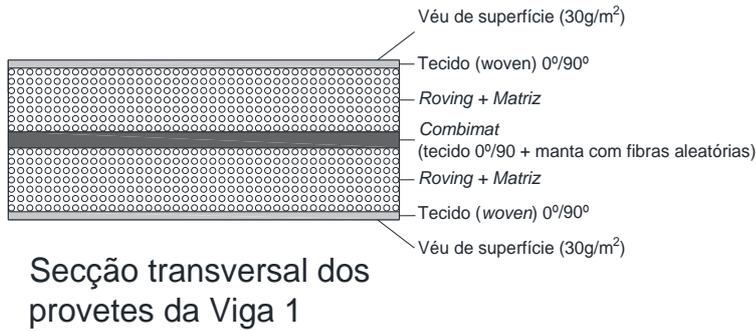
4.2 Ensaios de Flexão

4.2.1 Programa Experimental

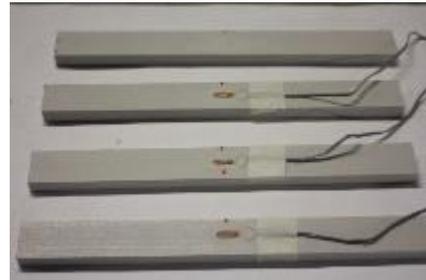
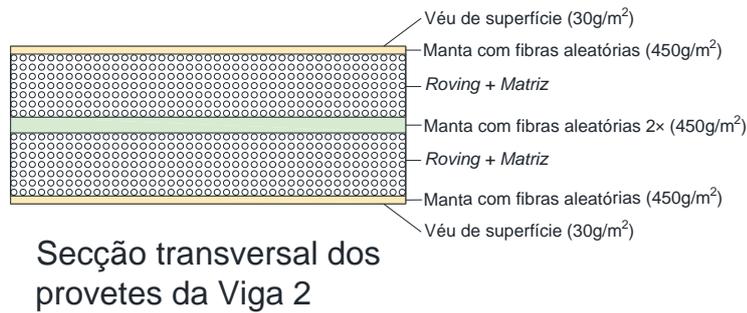
Os ensaios de flexão foram realizados em provetes de GFRP retirados a partir de 3 vigas em I pultrudidas, tal como referido anteriormente. Enquanto os laminados das vigas 1 e 2 são constituídos apenas por GFRP (tecidos - *woven*, mantas com fibras dispostas aleatoriamente - *mats*, e *roving* de fibra de vidro), os banzos da viga 3 são híbridos. Ou seja, para além das fibras de vidro utilizadas no processo de pultrusão (*roving*), os banzos possuem dois tecidos de 450g/m² (2×0.5mm) de carbono bidirecionais (0°/90°) numa das faces e a meia altura da secção. Os banzos dos quais se extraíram os provetes fazem parte de uma viga em I estudada por Nunes (2016). Segundo Nunes (2016), o uso de tecidos de carbono tem como objetivo minimizar a delaminação. Durante o processo de pultrusão as vigas foram impregnadas com uma resina de poliéster.

Apesar do interesse associado ao estudo de outros ângulos de orientação, foram estudadas apenas lâminas do banzo orientadas a 0° relativamente à direção de pultrusão, por limitações da quantidade de material disponível. Foi dada preferência a esta direção por se considerar ser esta ser a direção em que as faces dos painéis sanduíche são mais solicitadas. Em resumo, foram extraídos 4 provetes dos banzos (lâminas/faces) de cada viga, totalizando 12 provetes cortados na direção 0° relativamente à direção de pultrusão.

Na Figura 4.2 apresentam-se fotografias das lâminas retiradas das vigas em estudo, assim como algumas características referentes à configuração das mesmas (desenho em *AutoCad*).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.2 - Configuração dos provetes extraídas das vigas 1, 2 e 3: (a) provetes extraídas da viga 1; (b) da viga 2 e (c) da viga 3.

Na Tabela 4.1 encontra-se resumida a informação relativa aos provetes extraídos. A designação adotada para as séries foi V_T_GFRP_O_i em que V refere a viga, T o local de onde foi extraído o laminado, GFRP o tipo de material, O a orientação de corte relativamente à direção da pultrusão e i o número da ordem do provete.

Tabela 4.1 - Características gerais dos provetes extraídos para a realização de ensaios, incluindo dimensões médias e respetiva covariância (L_c - comprimento; b - largura; e - espessura).

Séries	Origem	Orientação	Provete	L_c [mm]	b [mm]	e [mm]	Nº de provetes
Série 1							
(Provetes da viga 1)	Banzos	0°	V1_B_GFRP_0°_i	247.92 (0.50)	25.82 (2.55%)	9.95 (0.22%)	4
Série 2							
(Provetes da viga 2)	Banzos	0°	V2_B_GFRP_0°_i	248.00 (0.53)	25.63 (0.75%)	9.91 (0.47%)	4
Série 3							
(Provetes da viga 3)	Banzos	0°	V2_B_G/GFRP_0°_i	249.92 (0.06)	15.19 (0.41%)	10.04 (0.96%)	4

Os ensaios foram realizados de acordo com o procedimento experimental descrito na norma ASTM D7264/D7264M – 07 “*Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*” (ASTM, 2007). Foi adotado o “*Procedure 4*”, consistindo o mesmo na aplicação de uma carga a meio vão dos provetes que se encontram simplesmente apoiados, até ocorrer a rotura por tração em flexão das fibras mais tracionadas. A norma indica também que o vão deve ser o adequado para que a rotura comece pela fibra inferior extrema (a mais tracionada), devido ao momento de flexão. Nesse sentido utilizou-se um vão de 220 mm em todos os ensaios. As dimensões foram definidas, sempre que possível, de acordo a norma. Devido a limitações relacionadas com o material disponível não foi possível ensaiar o número de laminados indicado pela norma. No entanto para o efeito do presente estudo esta particularidade não é fundamental. Adicionalmente a norma refere que o ensaio só é validado caso a rotura aconteça na superfície externa sem que haja uma rotura interlaminar precedente ou o esmagamento junto ao ponto de aplicação da força.

Os ensaios de flexão foram realizados com controlo do deslocamento imposto a meio vão a uma velocidade de 1 mm/min até à rotura do provete. Para tal, utilizou-se um equipamento universal de ensaios hidráulico, modelo CIL–DE–150KN-63-36-200 (versão 443) com 150 KN de capacidade de carga (precisão ± 0.05 F.S), do LEST. O registo de dados, força *versus* deslocamento, foi efetuado num computador através de uma unidade de aquisição de dados da marca RDP GROUP e modelo modular 600.

A Figura 4.3 apresenta a configuração e instrumentação de ensaios utilizada. Enquanto a força foi registrada através de uma célula de carga associada ao atuador, o deslocamento a meio vão foi medido com recurso a 2 LVDT's (*linear variable differential transducer*, na literatura inglesa) dispostos nas extremidades da linha de aplicação de carga a meio vão, com uma amplitude de ± 10 mm (com um coeficiente de linearidade de $\pm 0.24\%$ F.S). Foi também colocado um extensómetro na zona central inferior de modo a registar as extensões na face oposta à do carregamento, até à rotura.

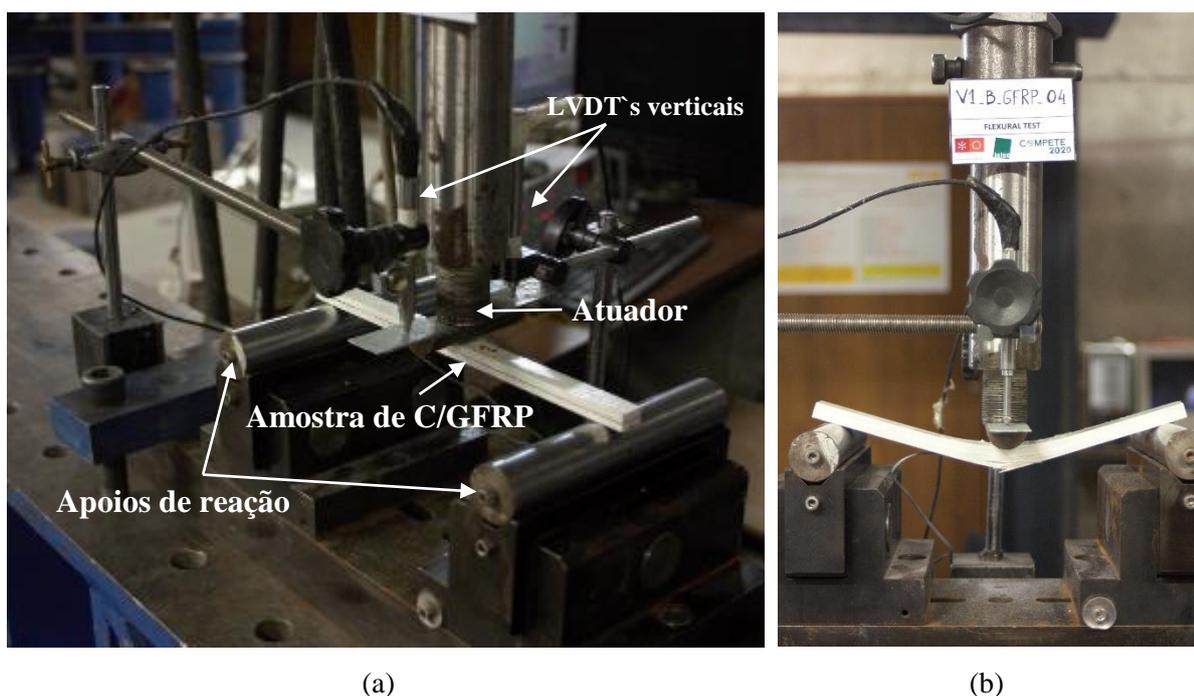


Figura 4.3 - Imagens da configuração do ensaio de flexão (3 pontos) em provetes de GFRP e C/GFRP (vão igual a 220 mm): (a) provete de C/GFRP no equipamento de ensaio pronto a ensaiar e (b) provete de GFRP no equipamento de ensaio durante a realização do mesmo.

Previamente à realização dos ensaios procedeu-se à caracterização geométrica de todos os provetes de acordo com os procedimentos indicados na norma. Para tal, utilizou-se um paquímetro digital e uma balança digital com uma precisão de 0.01 m e 0.01 g, respetivamente. Os resultados da caracterização geométrica constam no ANEXO V. Posteriormente marcou-se, na face tracionada, a zona central do provete para a colocação do extensómetro. De seguida, lixou-se ligeiramente esse local e limpou-se o provete com acetona. Por fim, procedeu-se à colagem do extensómetro no local definido com recurso a um procedimento de colagem adequado (ver Figura 4.4).

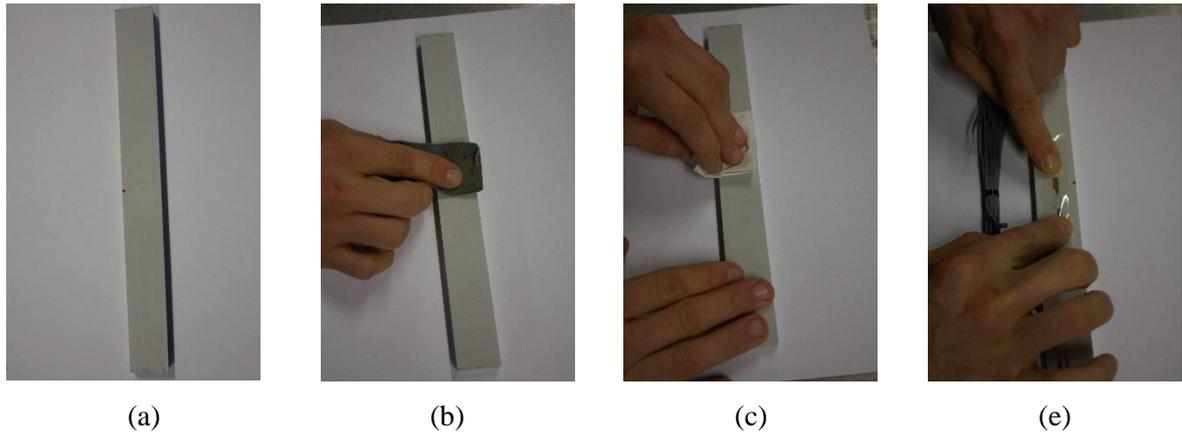


Figura 4.4 - Etapas relativas à preparação dos provetes para os ensaios de flexão.

Segundo a norma ASTM D7264/D7264M – 07, a tensão de flexão, a extensão e o módulo de elasticidade podem ser calculadas da seguinte forma:

$$\sigma_{fmax,x} = \frac{3 \times P_{max} \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{fmax,x} = \frac{6 \times h \times \delta_u}{L^2} \quad (4.2)$$

$$E_{f,x}^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.3)$$

Em que, b , h e L são a largura, espessura e vão de ensaio, respetivamente. P_{max} representa a força máxima e δ_u diz respeito ao deslocamento correspondente a P_{max} . $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ diz respeito ao declive relativo ao ramo linear da curva tensão *versus* extensão.

4.2.2 Resultados dos Ensaios de Flexão

De acordo com a norma ASTM D 3039/D 3039M-00 (ASTM, 2000b) todos os resultados dos ensaios em provetes de GFRP foram considerados como válidos, uma vez que romperam por tração em flexão por rotura das fibras inferiores. Contudo, no caso dos provetes em C/GFRP o mesmo não se verificou.

Na Figura 4.5 apresentam-se as curvas força *versus* deslocamento para os provetes obtidos dos banzos das vigas I. Com base nessas curvas e nos modos de rotura observados, documenta-se a *performance* estrutural dos provetes das vigas 1, 2 e 3. Na Tabela 4.2 apresentam-se alguns dos resultados médios, obtidos a partir da média aritmética dos provetes de cada tipo.

Como se observa na Figura 4.5a) e b), as curvas relativas aos provetes de GFRP (Séries 1 e 2) são muito similares quer entre provetes da mesma série, quer entre séries. Em ambos os casos, os provetes evidenciaram um comportamento linear elástico até à rotura (caraterística típica deste tipo de material). Além disso, a resposta após pico comprova a rotura progressiva observada em laboratório (recuperação da deformação após a rotura da camada inferior). Esse fenómeno deve-se essencialmente ao facto de as fibras que ainda não romperam continuarem a “trabalhar” em regime elástico. À partida, as diferenças ao nível da configuração dos provetes de GFRP não têm uma influência relevante na sua resposta em flexão. De um modo geral, as respostas e os resultados encontrados neste tipo de provete são consistentes e a dispersão reduzida.

Os provetes híbridos (Série 3) apresentam um comportamento substancialmente diferente dos anteriormente mencionados (Figura 4.5c). Contudo, as curvas são similares entre provetes da mesma série, à exceção do provete 1 que, apesar de evidenciar o mesmo comportamento, apresenta uma capacidade de carga e um deslocamento pré-pico significativamente inferior aos restantes. Os provetes evidenciam um ramo linear elástico que é seguido de uma queda abrupta da capacidade de carga. O resto da resposta é caraterizado por um ramo linear crescente, embora com menor rigidez, até à rotura. A queda abrupta enunciada deve-se à delaminação entre o *roving* de vidro/matriz e o reforço de carbono intermédio, que se traduz na rotura prematura do provete (indesejável). A perda de rigidez assinalada prende-se com o facto de as vigas se terem “desconectado parcialmente”, reduzindo assim secção resistente inicial. Isto é, enquanto no início do ensaio o provete apresenta uma única secção, quando se dá a delaminação referida, passa-se a ter duas vigas sobrepostas (apenas conectada em algumas zonas) com aproximadamente metade da secção inicial. Uma vez que as fibras de ambas as partes estão intactas, estas ainda possuem capacidade de carga (2º ramo da resposta). De um modo geral, as respostas e os resultados encontrados entre provetes são consistentes e a dispersão de resultados é superior à dos provetes de GFRP (Ver Tabela 4.2).

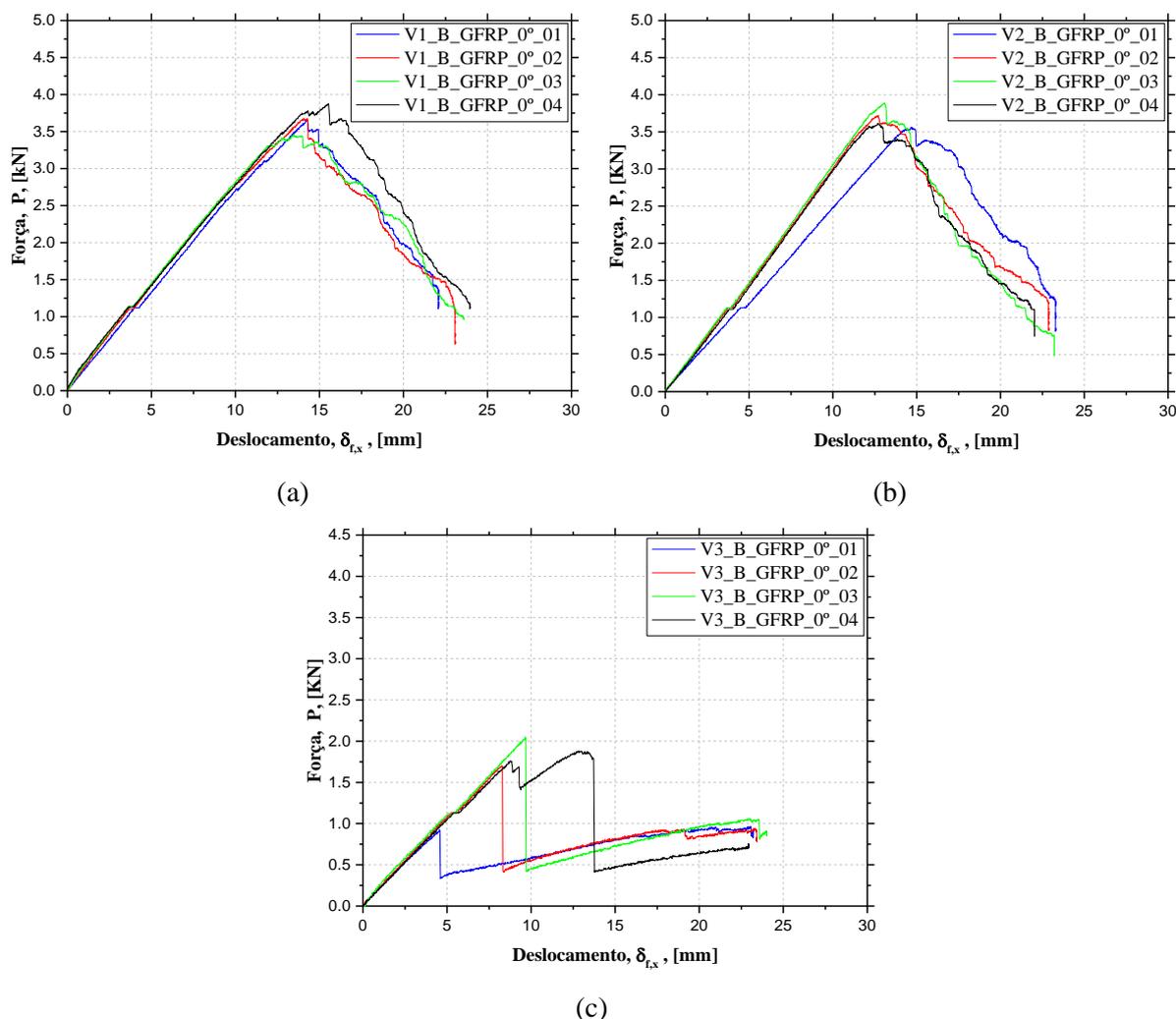


Figura 4.5 - Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para os provetes ensaiados à flexão: (a) provetes em GFRP extraídos do banco viga 1 (Série 1); (b) provetes em GFRP extraídos do banco da viga 2 (Série 2) e (c) provetes híbridos extraídos do banco da viga 3 (Série 3). Nota: importa referir a existência de uma descontinuidade em todas as respostas que se deve ao equipamento de medição.

A Tabela 4.2 apresenta os principais resultados, bem como os valores médios dos parâmetros relativos à carga de rotura (P_{\max}), ao deslocamento na rotura ($\delta_{f_{\max,x}}$), à tensão de rotura $(\sigma_{f_{\max,x}})_{\text{sup}}$, à extensão de rotura $(\epsilon_{f_{\max,x}})_{\text{sup}}$ e ao módulo de elasticidade em flexão ($E_{f,x}$). A tensão e extensão máximas superiores dizem respeito à máxima tensão negativa (compressões) e foram calculadas segundo a norma utilizada, nomeadamente pelas equações (4.1) e (4.2) e (4.3). Para os cálculos do módulo de flexão, de acordo com a norma, utilizaram-se 2 pontos do ramo linear do gráfico tensão-extensão, compreendidos entre as extensões de 0.1% e 0.3%. Dado que na rotura a secção do provete se encontra reduzida (inércia deixa de ser constante), então as equações utilizadas apenas fornecem o *engineering stress and strain*. Em termos de valores médios, os provetes referentes à Série 1 apresentam: $P_{\max}=3.67\text{KN}$, $\delta_{f_{\max,x}}=14,32\text{mm}$, $(\sigma_{f_{\max,x}})_{\text{sup}}$

=473.11MPa, $(\epsilon_{fmax,x})_{sup} = 17.7\%$ e $E_{f,x} = 30.80\text{GPa}$. Os provetes da Série 2 apresentam: $P_{max} = 3.695\text{KN}$, $\delta_{fmax,x} = 13.27\text{mm}$, $(\sigma_{fmax,x})_{sup} = 484.759\text{MPa}$, $(\epsilon_{fmax,x})_{sup} = 16.30\%$ e $E_{f,x} = 30.75\text{GPa}$. Em termos de valores médios, os provetes da Série 3 apresentam: $P_{max} = 1.64\text{KN}$ e $\delta_{fmax,x} = 8.80\text{mm}$ (Tabela 4.2). Como se observa da tabela, os provetes da Série 2 (Viga 2) possuem uma tensão de flexão ligeiramente superior e uma extensão superior última e módulo de elasticidade ligeiramente inferiores comparativamente com os provetes da Série 1 (viga 1).

Tabela 4.2 - Principais resultados obtidos dos ensaios de flexão em provetes de GFRP e C/GFRP.

Provete	Densidade [kg/m ³]	P_{max} [kN]	δ_{fmax,x} [mm]	(σ_{fmax,x})_{sup} [MPa]	(ε_{fmax,x})_{sup} [×10 ⁻³]	E_{f,x} [GPa]
V1_B_GFRP_0°_01	2005.48	3.65	14.28	489.72	17.63	30.23
V1_B_GFRP_0°_02	1950.63	3.67	14.02	461.86	17.24	31.55
V1_B_GFRP_0°_03	1997.19	3.46	13.46	440.69	16.66	31.08
V1_B_GFRP_0°_04	1957.71	3.88	15.52	500.16	19.16	30.35
Média	1977.76	3.67	14.32	473.11	17.67	30.80
Desvio Padrão	23.89	0.15	0.75	23.37	0.93	0.54
Cov [%]	1.21	4.06	5.26	4.94	5.24	1.75
V2_B_GFRP_0°_01	1881.88	3.56	14.64	461.08	17.99	26.61
V2_B_GFRP_0°_02	1995.47	3.72	12.71	496.78	15.51	32.19
V2_B_GFRP_0°_03	1941.34	3.89	13.06	502.62	16.15	33.13
V2_B_GFRP_0°_04	1964.20	3.61	12.66	478.56	15.53	31.06
Média	1945.73	3.70	13.27	484.76	16.30	30.75
Desvio Padrão	41.57	0.13	0.81	16.30	1.01	2.50
Cov [%]	2.14	3.43	6.09	3.36	6.22	8.13
V3_B_G/GFRP_0°_01	1928.19	0.92	4.52	-	-	-
V3_B_G/GFRP_0°_02	1996.68	1.70	8.25	-	-	-
V3_B_G/GFRP_0°_03	1997.90	2.05	9.65	-	-	-
V3_B_G/GFRP_0°_04	2011.04	1.88	12.79	-	-	-
Média	1983.45	1.64	8.80	-	-	-
Desvio Padrão	32.40	0.43	2.97	-	-	-
Cov [%]	1.63	26.40	33.71	-	-	-

Nesta fase evidenciam-se os modos de rotura observados durante a campanha experimental. Em geral, os provetes de GFRP (Séries 1 e 2) romperam por tração em flexão por rotura das fibras inferiores (Figura 4.6a e b e Figura 4.7a). Estas foram rompendo progressivamente à medida que o deslocamento imposto a meio vão ia aumentando e o eixo neutro subia. À medida que isso ocorria observou-se também a inter-delaminação entre camadas horizontais (plano perpendicular à direção de carregamento) na região tracionada dos provetes e na zona central do vão.

No caso dos provetes híbridos (Série 3) verificou-se a ocorrência de um modo de rotura prematuro devido à delaminação intermédia na interface reforço de carbono/matriz/*roving* (Figura 4.6c e Figura 4.7b). Após esse fenómeno, como anteriormente referido, o provete continua a ter capacidade de carga, e, portanto, continua a deformar até que se verifica a rotura por tração em flexão das fibras inferiores. Aquando a rotura por flexão, observa-se a inter-delaminação localizada na zona central do *roving* de vidro. Neste tipo de provete não foi possível acompanhar a evolução total da rotura das camadas (após a rotura prematura) com o registo da força-deslocamento devido a limitações relativas à amplitude do equipamento de medida. No entanto, embora os LVDT's tenham atingido o deslocamento máximo, continuou-se o ensaio de modo a perceber a evolução do comportamento dos materiais com capacidade de carga, acompanhando-se a deformação apenas pelo registo fotográfico. Como esperado, as fibras inferiores iam rompendo sequencialmente. O material em GFRP que se encontra acima do reforço de carbono intermédio apresenta algum esmagamento na zona do atuador, assim como inter-delaminação.

A Figura 4.6 ilustra os modos de rotura típicos obtidos. Na Figura 4.7 são apresentadas fotografias efetuadas na zona do meio vão, relativas à evolução do modo de rotura típico evidenciado pelos provetes de GFRP e C/GFRP. Uma vez que os modos de rotura foram semelhantes, quer entre provetes do mesmo tipo, quer entre provetes das Séries 1 e 2, decidiu-se apresentar as fotos relativas a apenas um provete de GFRP (neste caso referente à Série 2) e de um provete de C/GFRP representativos.



Figura 4.6 - Modos de rotura obtidos referentes a cada série. Em cima encontra-se um provete de cada série durante a fase final do ensaio e em baixo encontram-se todas os provetes após o ensaio do mesmo: (a) provetes da Série 1; (b) Série 2 e (c) Série 3. Nota: nas imagens relativas ao conjunto de provetes, importa referir que o nível de rotura se encontra “ampliado” relativamente ao ensaio padrão, uma vez que todos os provetes foram continuamente carregados com o objetivo de amplificar o padrão de rotura.

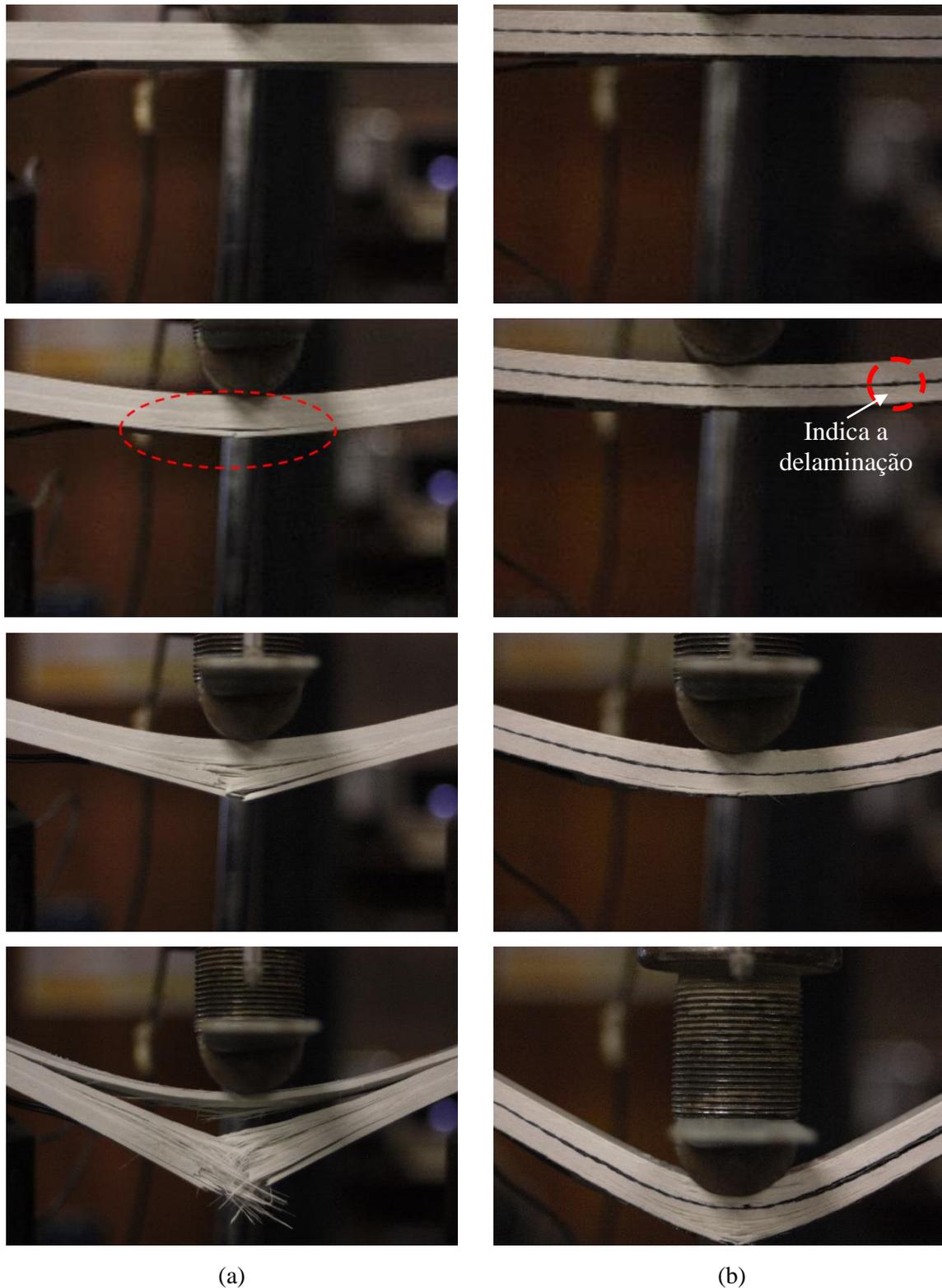


Figura 4.7 - Imagens da região a meio vão mostrando a evolução da deformação e o modo de rotura típico evidenciado pelos provetes de GFRP e C/GFRP: (a) provete V2_B_GFRP_0°_01 e (b) provete V3_B_C/GFRP_0°_02. Notas: no caso do provete híbrido apenas é possível visualizar indiretamente a delaminação. As última fotografia de ambos os provetes dizem respeito ao momento em que se decidiu continuar o ensaios, sem registo de dados, de modo a amplificar visualmente o modo de rotura.

4.3 Ensaio de Tração Direta

4.3.1 Programa Experimental

O presente programa de ensaios consiste no estudo de 2 tipos de provetes referentes às vigas 1 e 2, que diferem ao nível da configuração (ver Figura 4.1). Na Figura 4.8 apresentam-se os provetes após terem sido retirados das respectivas vigas. A configuração dos provetes já se encontra descrita no programa experimental referente aos ensaios de flexão (Ver Figura 4.2).



Figura 4.8 - Provetes extraídos das vigas 1 e 2, das quais se extraíram os provetes: na parte superior da imagem encontram-se os provetes retirados da viga 1 e na parte de baixo os provetes retirados da viga 2.

No caso dos ensaios de tração direta, foi possível extrair provetes da alma e do banzo de cada uma das duas vigas com diversas orientações. Os provetes cortados com uma orientação de 0° relativamente à direção de pultrusão foram efetuados com o objetivo de analisar o comportamento dos laminados na direção principal de pultrusão pelo facto de que se tratar da direção mais solicitada, uma vez que a lâmina inferior está principalmente sujeita a esforços de tração. Os provetes cortados com orientações de 15° e 30° relativamente à direção de pultrusão foram ensaiados de modo a analisar o comportamento do laminado quando solicitado à tração numa direção diferente da principal, que pode ocorrer por exemplo quando as almas das vigas I são solicitadas por esforços de corte. Na Figura 4.9 apresentam-se de forma esquemática os provetes extraídos de cada uma das vigas.

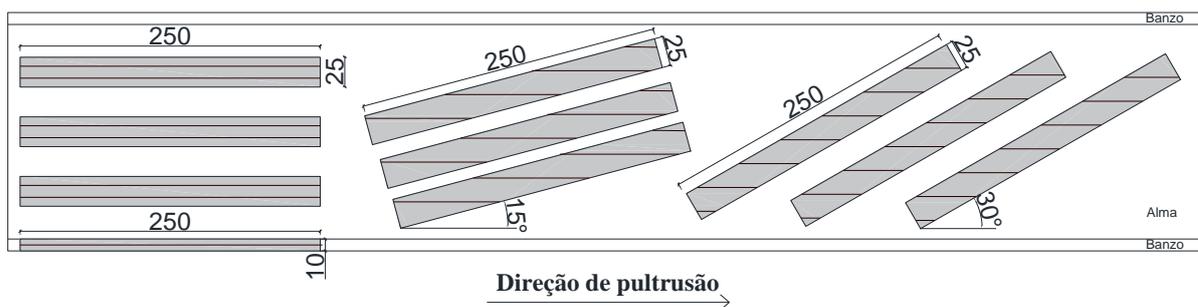


Figura 4.9 - Apresentação esquemática do corte dos provetes extraídos das vigas I.

De acordo com as normas, utilizaram-se lâminas de GFRP com dimensões de $250 \times 25 \times 10 \text{ mm}^3$. As dimensões foram definidas, sempre que possível, de acordo a norma. Devido a limitações na quantidade de material disponível apenas foi possível ensaiar três provetes de cada tipo. Na Tabela 4.3 encontra-se resumida a informação relativa aos provetes de GFRP ensaiados. A designação adotada para as séries foi V_T_GFRP_O_i em que V refere a viga, T o local de onde foi extraído o laminado, GFRP o tipo de material, O a orientação de corte relativamente à direção da pultrusão e i o número da ordem do provete.

 Tabela 4.3 - Características gerais dos provetes extraídos para ensaio, incluindo as dimensões médias e respectivas covariâncias entre parênteses (L_c - comprimento; b - largura; e - espessura).

Séries	Origem	Orientação	Provete	L_c [mm]	b [mm]	e [mm]	Nº de provetes
Série 1 (viga 1)	Lâminas (banços)	0°	V1_B_GFRP_0°_i	249.11 (0.06%)	24.91 (0.08%)	9.97 (0.15%)	3
	Alma (nervura)	0°	V1_A_GFRP_0°_i	250.00 (0.00%)	25.22 (0.31%)	9.87 (0.07%)	3
	Alma (nervura)	15°	V1_A_GFRP_15°_i	251.00 (0.11%)	23.93 (0.96%)	9.91 (0.25%)	3
	Alma (nervura)	30°	V1_A_GFRP_30°_i	249.47 (0.30%)	24.19 (2.27%)	9.92 (0%)	3
Série 2 (viga 2)	Lâminas (banços)	0°	V2_B_GFRP_0°_i	249.56 (0.25%)	25.68 (0.75%)	9.91 (0.42%)	3
	Alma (nervura)	0°	V2_A_GFRP_0°_i	250.00 (0.00%)	25.26 (1.70%)	10.00 (0.53%)	3
	Alma (nervura)	15°	V2_A_GFRP_15°_i	249.67 (0.19%)	23.17 (1.79%)	9.97 (0.13%)	3
	Alma (nervura)	30°	V2_A_GFRP_30_i	250 (0.33%)	23.77 (1.79%)	9.97 (0.13%)	3

Os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações da norma ASTM D 3039/D 3039M-00 (ASTM, 2000b) e ISO 527-5:1997 (ISO, 1997). O presente ensaio consistiu em submeter o material do núcleo a uma força de tração uniaxial no sentido longitudinal da amostra até à rotura. Os ensaios de tração foram realizados por controlo de deslocamento a uma velocidade de 2 mm/min até à rotura do provete. Para tal, utilizou-se uma máquina universal de ensaios hidráulica, modelo *MICROTEST* PB2-F/200, com 200 KN de capacidade de carga, do LEST. O registo de dados força *versus* deslocamento foi efetuado num computador através de uma unidade de aquisição de dados da marca *MICROTEST* e modelo SCM4000.

A Figura 4.10 apresenta a configuração adotada para o ensaio assim como a instrumentação utilizada nos ensaios. De modo a minimizar a concentração de tensões e a evitar a rotura prematura na zona de fixação do provete à amarra da máquina de ensaio, colaram-se em ambas as extremidades lâminas de alumínio com dimensões de $50 \times 25 \times 2$ mm³. Para medir a deformação da zona central do provete acoplou-se um *Clip Gauge* conforme apresentado na Figura 4.10b.

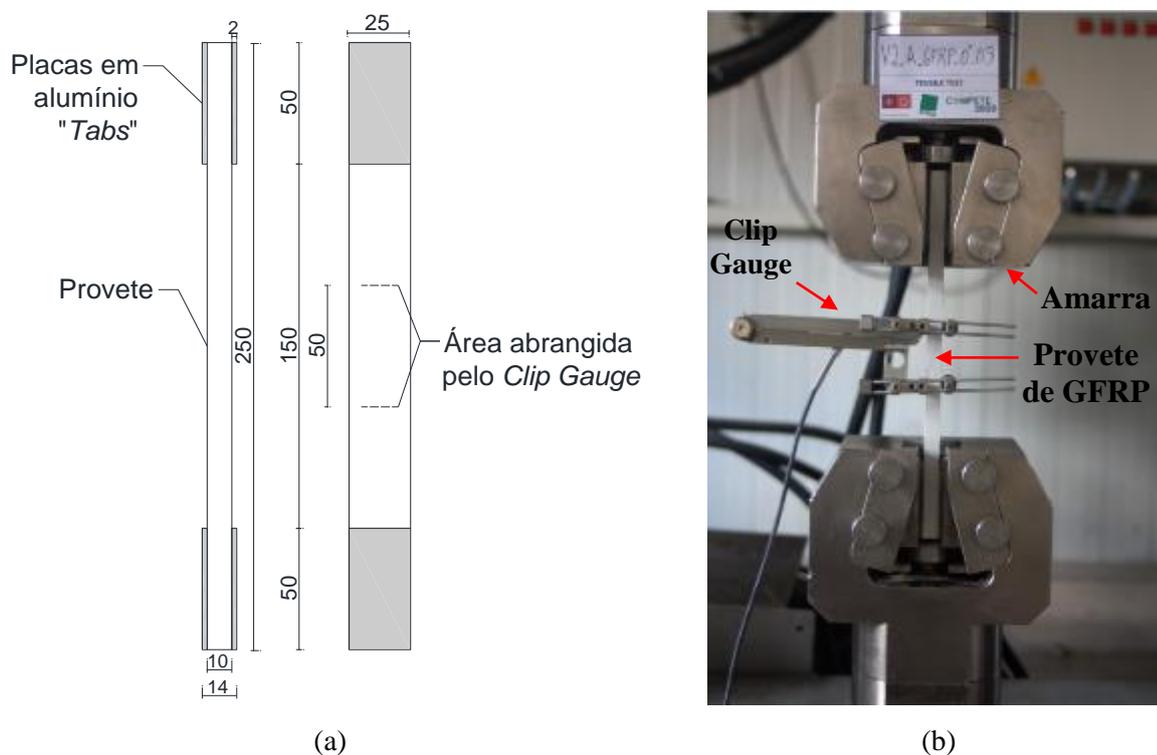


Figura 4.10 - Configuração do ensaio de tração: (a) dimensões nominais e instrumentação e (b) equipamento universal de ensaios hidráulico com sistema de amarras e provete pronto a ensaiar.

Previamente à realização dos ensaios procedeu-se à caracterização geométrica de todos os provetes de acordo com os procedimentos presentes na norma ASTM D 3039/D 3039M-00 (ASTM, 2000b). Para tal utilizou-se um paquímetro digital e uma balança digital com uma precisão de 0.01 m e 0.01 g, respetivamente. Os resultados da caracterização geométrica constam no ANEXO VI. Posteriormente efetuou-se o seguinte procedimento (Figura 4.11):

- (i) Limpam-se os provetes com acetona e marcam-se as delimitações para a colocação das placas de alumínio ou “*tabs*”, garantindo-se a distância livre do provete entre amarras de 150mm (Figura 4.11a).
- (ii) Seguidamente lixou-se ligeiramente a zona referente à posição dos “*tabs*” e limpou-se a mesma com acetona, tendo-se o especial cuidado para não reduzir a secção do provete evitando-se a rotura nas zonas de amarração dos provetes Figura 4.11b,c).
- (iii) Depois colaram-se os “*tabs*” (Figura 4.11d, e, f).

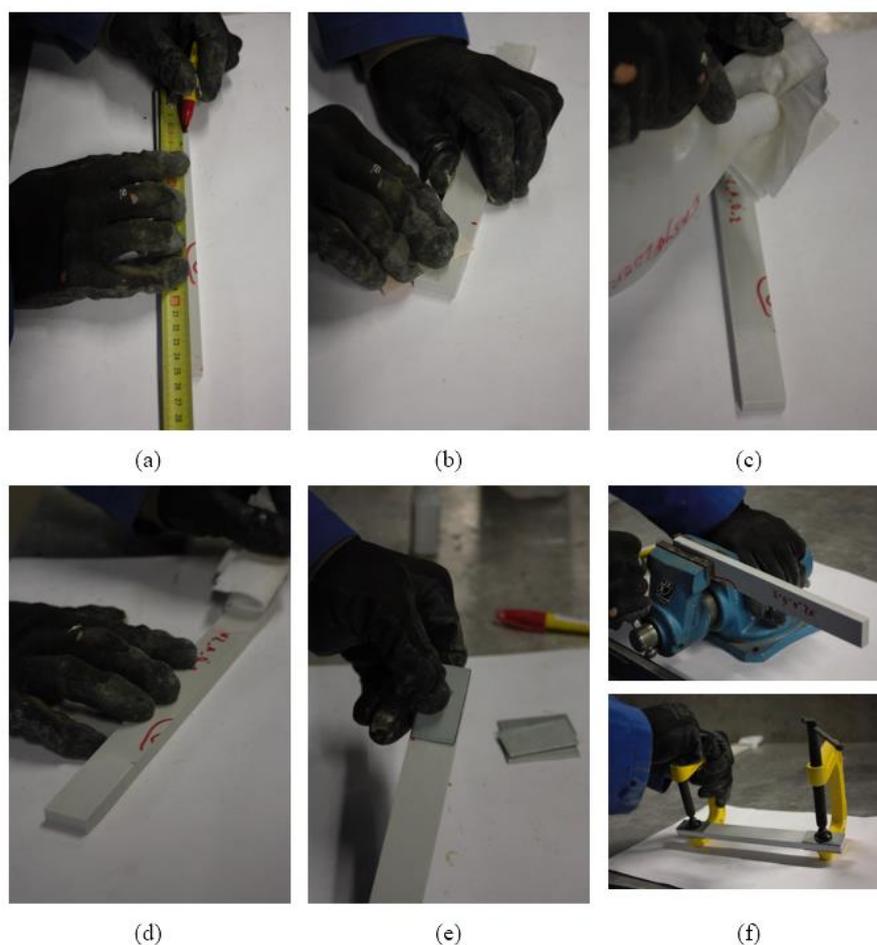


Figura 4.11 - Sequência de procedimentos realizados para a preparação dos provetes para os ensaios de tração.

Segundo a ASTM D 3039/D 3039M-00 (ASTM, 2000b), a tensão de tração e o módulo de elasticidade são dados pelas equações (4.4) e (4.5).

$$\sigma_{fmax,x} = \frac{P_{max}}{A_{secção}} \quad (4.4)$$

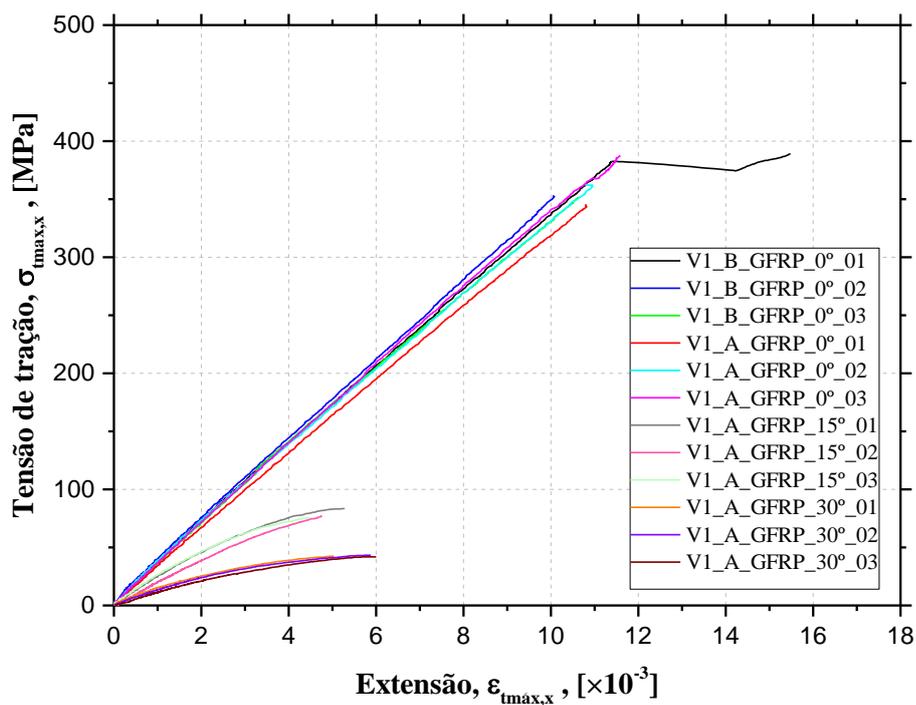
$$E_{t,x}^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.5)$$

Em que, b, h e L são a largura, espessura e vão de ensaio, respetivamente. P_{max} representa a força máxima e $A_{secção}$ diz respeito à secção transversal do provete. $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ diz respeito ao declive relativo ao ramo linear da curva tensão *vs* extensão. Para o efeito utilizaram-se os pontos sugeridos pela norma, 0.3% e 0.1%. A extensão foi retirada a partir do *Clip Gauge* utilizado.

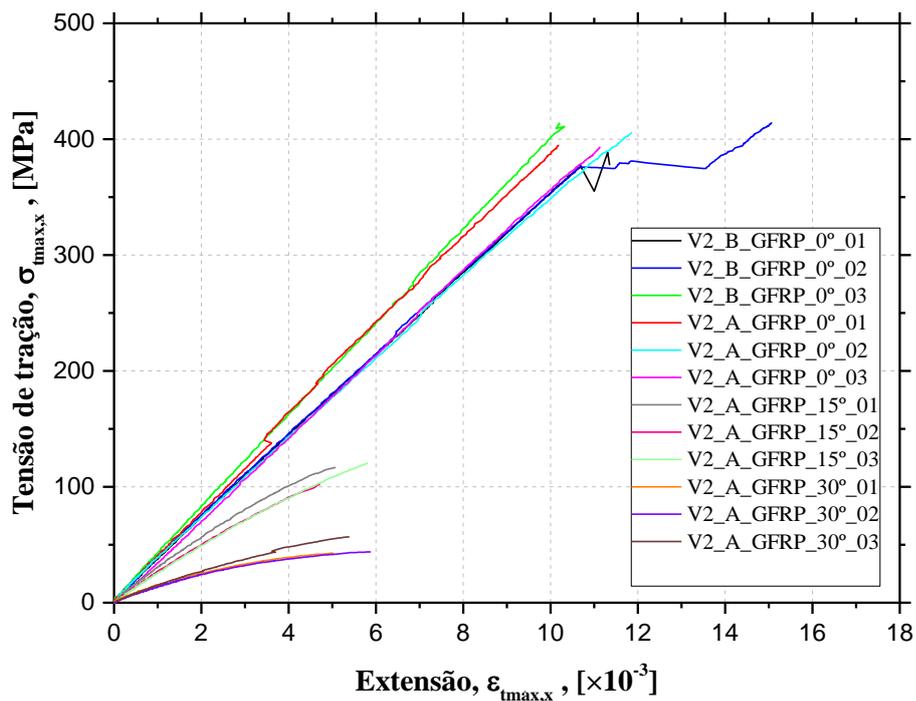
4.3.2 Resultados dos Ensaios de Tração Direta

Na Figura 4.12 apresentam-se as curvas tensão *versus* extensão de todos os provetes ensaiados. Quando comparados os provetes com a mesma origem e orientação das diferentes séries, verifica-se que as respostas são bastantes similares. Entre provetes da mesma série, as respostas apresentam diferenças apenas no que respeita à tensão e extensão máximas e ao módulo de elasticidade. Como não poderia deixar de ser, estas propriedades mecânicas diminuem à medida que o ângulo entre a direção de pultrusão e o provete aumenta.

Tanto os provetes extraídos da alma como do banzo, orientados a 0°, de ambas as séries, apresentam uma resposta similar e um comportamento linear elástico até à rotura (rotura frágil), característica típica deste material. Os provetes da alma orientados a 15° e 30° apresentam um comportamento quase linear elástico, o que pode estar relacionado com o facto de as fibras se encontrarem solicitadas numa direção diferente da principal. O facto de a matriz estar mais solicitada contribui para este tipo de resposta. Numa primeira análise, de um modo geral os provetes da Série 2 apresentam níveis de tensão ligeiramente superiores. Globalmente, as respostas de todos os provetes são consistentes e a dispersão aceitável.



a)



b)

Figura 4.12 - Curvas que relacionam a tensão de tração com a extensão dos provetes (a) da viga 1 e (b) da viga 2.

Na Tabela 4.4 apresentam-se os principais resultados médios dos ensaios de tração, sendo que a totalidade dos resultados encontra-se no ANEXO VII. Como se observa na tabela, a densidade

deste tipo de material varia entre os $\pm 1905 \text{ kg/m}^3$ e os $\pm 2018 \text{ kg/m}^3$. De todos os provetes ensaiados, os valores máximos dizem respeito ao provete V2_B_GFRP_0°. Obteve-se uma força máxima (P_{\max}) de 103.80 kN e uma tensão de tração máxima ($\sigma_{t\max,x}$) igual a de 407.81 MPa. A extensão máxima ($\varepsilon_{t\max,x}$) obtida foi de 12.79% e o módulo de elasticidade máximo de 37.39 GPa. Os valores encontrados estão de acordo com a bibliografia.

Tabela 4.4 - Resultados médios obtidos para cada um dos provetes tipo de GFRP.

Série	Provete	Densidade [kg/m ³]	P _{max} [kN]	$\sigma_{t\max,x}$ [MPa]	$\varepsilon_{t\max,x}$ [×10 ⁻³]	E _{t,x} [GPa]
Série 1 (Viga 1)	V1_B_GFRP_0°	2011.45 (0.09%)	90.53 (4.74%)	364.52 (4.77%)	12.05 (20.23%)	34.67 (1.17%)
	V1_A_GFRP_0°	2017.88 (0.60%)	90.83 (4.81%)	365.01 (4.75%)	11.06 (3.39%)	33.72 (2.35%)
	V1_A_GFRP_15°	2004.31 (1.24%)	18.63 (4.35%)	78.60 (4.31%)	4.84 (6.79%)	20.22 (13.14%)
	V1_A_GFRP_30°	2004.64 (1.35%)	10.20 (2.61%)	42.49 (1.47%)	5.53 (6.61%)	8.88 (1.77%)
Série 2 (Viga 2)	V2_B_GFRP_0°	1907.73 (2.37%)	103.80 (2.99%)	407.81 (2.99)	12.79 (17.02%)	37.39 (4.77%)
	V2_A_GFRP_0°	1905.89 (0.37%)	100.89 (2.56%)	398.08 (1.35%)	11.06 (6.21%)	36.11 (3.29%)
	V2_A_GFRP_15°	1910.37 (0.40%)	26.63 (8.42%)	113.01 (6.97%)	5.20 (8.75%)	23.13 (5.79%)
	V2_A_GFRP_30°	1907.36 (0.49%)	11.47 (15.94%)	48.32 (14.88%)	5.44 (6.43%)	9.78 (10.40%)

Nota: os valores entre parêntesis representam a covariância.

De seguida analisam-se os modos de rotura detalhadamente. A rotura dos provetes ocorreu de um modo frágil, mas de diversas maneiras: enquanto todos os provetes orientados a 0° romperam por tração, os provetes orientados a 15° e 30° romperam após a formação de uma fenda inclinada, tal como esperado (Figura 4.13).

- (i) Os provetes orientados a 0° das almas e dos banzos de ambas as séries apresentam um modo de rotura similar, que é caracterizado pela rotura progressiva dos fios que compõem as diversas camadas de *roving* de vidro, em vários pontos interiores do provete. Além disso, verifica-se também a delaminação das camadas das extremidades (enrugamento das mantas no caso da Série 1 e destacamento devido à rotura de uma camada de *roving* no caso de Série 2). De acordo com a norma ASTM D 3039/D 3039M-00, obteve-se um MMV (M - *multimode*, M - *multiple areas*, V - *various*) (Figura 4.13a.1, a.2, a.3 e a.4).
- (ii) Os provetes orientados a 15° e 30° de ambas as séries apresentam uma rotura angular, tal como expectável. No caso dos provetes da Série 1, para ambas as orientações, a rotura acontece na zona do *Clip Gauge*, denominando-se a mesma por AGM (A - *angle*, G - *gauge*, M - *middle*). No caso dos provetes da Série 2, a rotura é mais frágil. Os provetes 1 e 2 orientados a 15° apresentam uma rotura angular em que pelo menos um dos extremos abrange a área do *Clip Gauge*. Nesse sentido, decidiu-se denominar a mesma de AGM. No entanto, o provete 3 apresenta uma rotura do tipo AAT (A - *angle*, A - *at grip/tab*, T - *top*). No caso dos provetes orientados a 30°, tanto o provete 1 como o 2 apresentam também uma rotura do tipo AAT. O provete 3 rompeu por AGM (Figura 4.13b.1, b.2, b.3 e b.4).

Cada uma das siglas mencionadas corresponde ao tipo de rotura, área e o local onde ocorrem, respetivamente, e seguem a nomenclatura indicada na norma ASTM D 3039/D 3039M-00 (ASTM, 2000b).



(a.1)

(a.2)

(a.3)

(a.4)

Figura 4.13 - Modos de rotura obtidos nos provetes: (em cima) perspetiva global, (a) provetes da Série 1 e (b) provetes da Série 2. Nota: para cada um dos provetes apresenta-se uma fotografia frontal (em cima) acompanhada pela identificação dos provetes e uma fotografia à parte lateral do mesmo (em baixo).

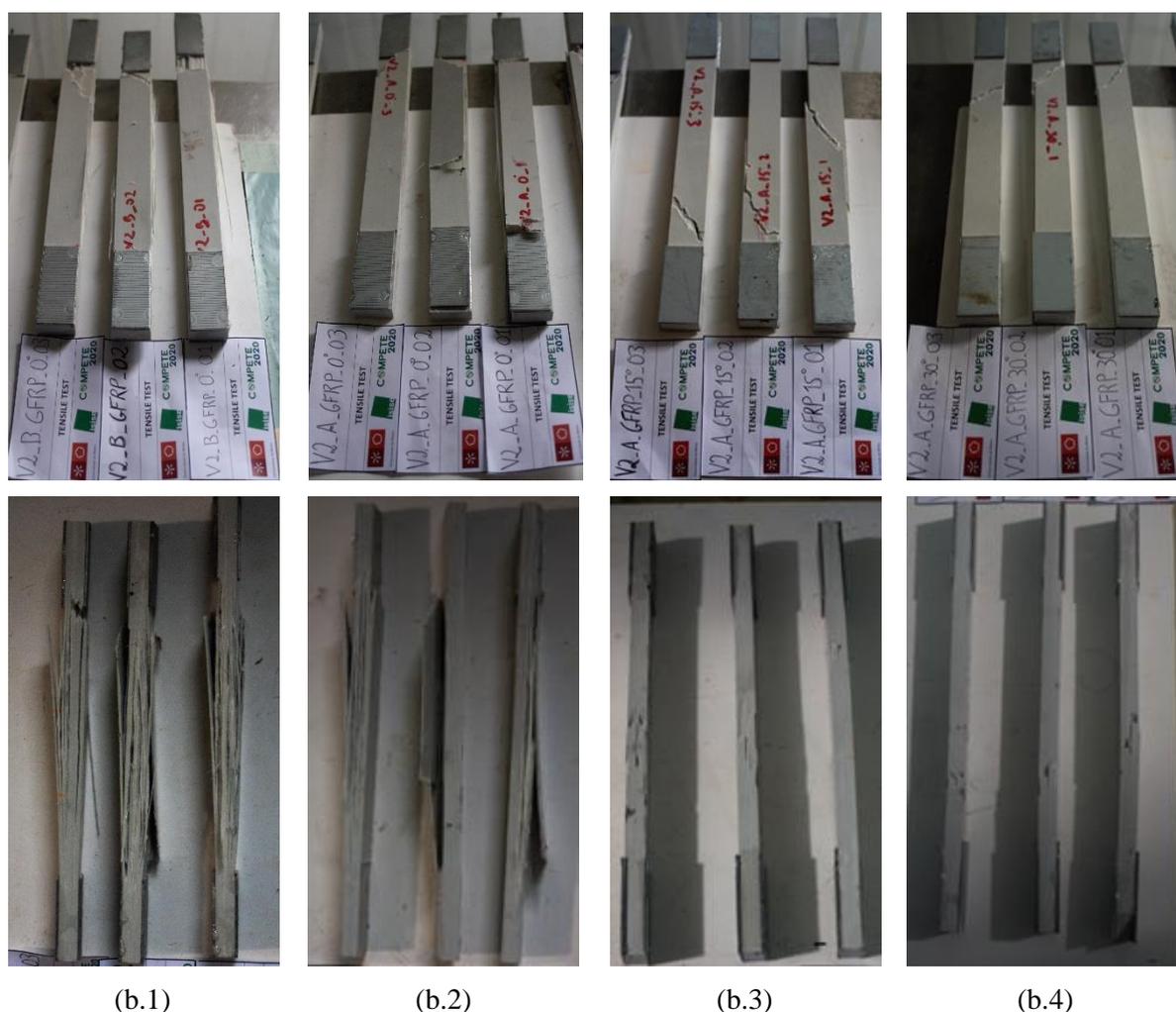


Figura 4.13 (cont.) - Modos de rotura obtidos nos provetes: (em cima) perspetiva global, (a) provetes da Série 1 e (b) provetes da Série 2. Nota: para cada um dos provetes apresenta-se uma fotografia frontal (em cima) acompanhada pela identificação dos provetes e uma fotografia à parte lateral do mesmo (em baixo).

4.4 Discussão de Resultados

4.4.1 Ensaio de Flexão

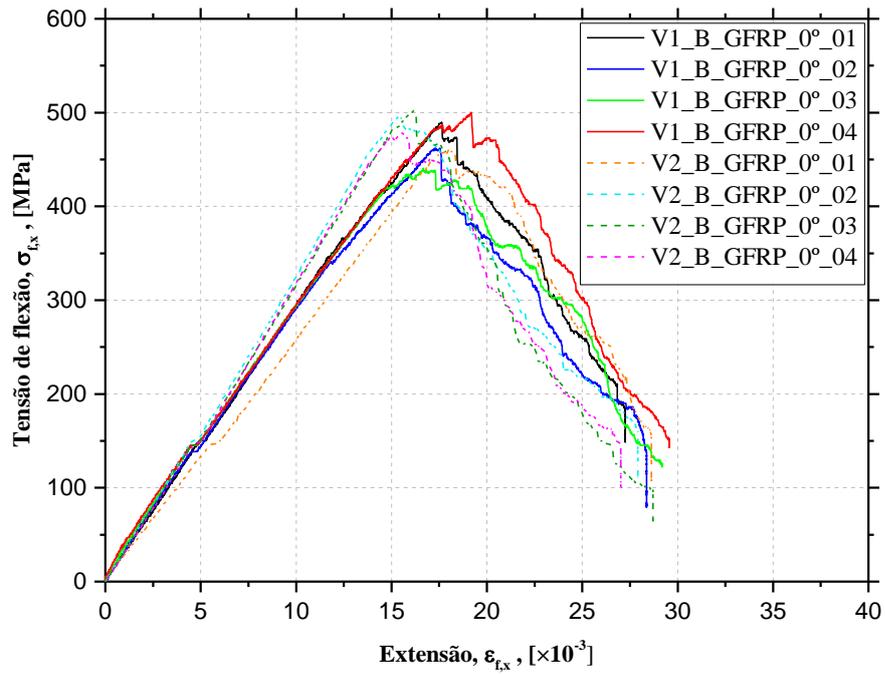
Como anteriormente demonstrado nos Resultados dos Ensaio de Flexão, os provetes híbridos (Série 3) apresentam um modo de rotura inadequado - delaminação intermédia. Uma das razões apontadas pelo fabricante para o sucedido prende-se com a compatibilização química relativa à cura da matriz que se encontra entre o tecido de carbono $0^{\circ}/90^{\circ}$ e o *roving* de vidro, pois a condutibilidade térmica dos dois materiais é diferente. Ou seja, como o carbono é mais condutivo do que a fibra de vidro, então a cura é mais rápida na zona do carbono. A segunda

razão apontada deve-se ao facto da matriz de poliéster não conseguir acomodar a transferência de tensões entre o *roving* de vidro e a tecido de carbono 0°/90° (transferência brusca entre a matriz/fibra de vidro e o tecido intermédio de carbono). Embora o reforço de carbono tenha como objetivo evitar a delaminação do perfil (Nunes, 2016), tal não aconteceu, tendo a delaminação ocorrido precisamente nessa zona. Dadas as limitações evidenciadas, constata-se que é necessário otimizar o processo de compatibilização e de produção na introdução de tecidos de carbono 0°/90° no material que é comumente usado na pultrusão.

Na etapa que se segue, pretende-se comparar os valores obtidos entre séries. No entanto, dado que os provetes híbridos são compostos por fibra de vidro e carbono e que a largura do provete é diferente dos provetes em GFRP, seria necessário calcular a inércia homogeneizada para o cálculo da tensão de flexão. Contudo, esse cálculo não foi realizado, pois não foi possível obter o módulo de elasticidade de flexão, necessário ao mesmo. Assim, compararam-se diretamente apenas os provetes de GFRP (Séries 1 e 2). Posteriormente, através de uma análise adimensional, comparam-se as Séries 1, 2 e 3.

➤ **Comparação dos resultados dos provetes de GFRP extraídos da Viga 1 (Série 1) e da Viga 2 (Série 2)**

Na Figura 4.14 apresenta-se a relação entre a tensão e a extensão nas fibras superiores, calculadas segundo as expressões (4.1) e (4.2), anteriormente referidas. Dado que na rotura a secção do provete se encontra reduzida (a inércia deixa de ser constante), então as equações utilizadas apenas fornecem o *engineering stress and strain*. Na Figura 4.15, comparam-se ambas as séries com base nos valores médios obtidos entre cada série. Tal como se pode verificar, as respostas experimentais são muito similares (Figura 4.14 e Figura 4.15). Assim, constata-se que ligeiras diferenças na composição das diversas camadas dos provetes (configuração estrutural do provete) não condicionaram uma diferença muito significativa nos resultados.



(a)

Figura 4.14 - Relação entre a tensão e a extensão superiores (calculada) dos provetes das vigas 1 e 2 extraídos do banco das respectivas vigas I.

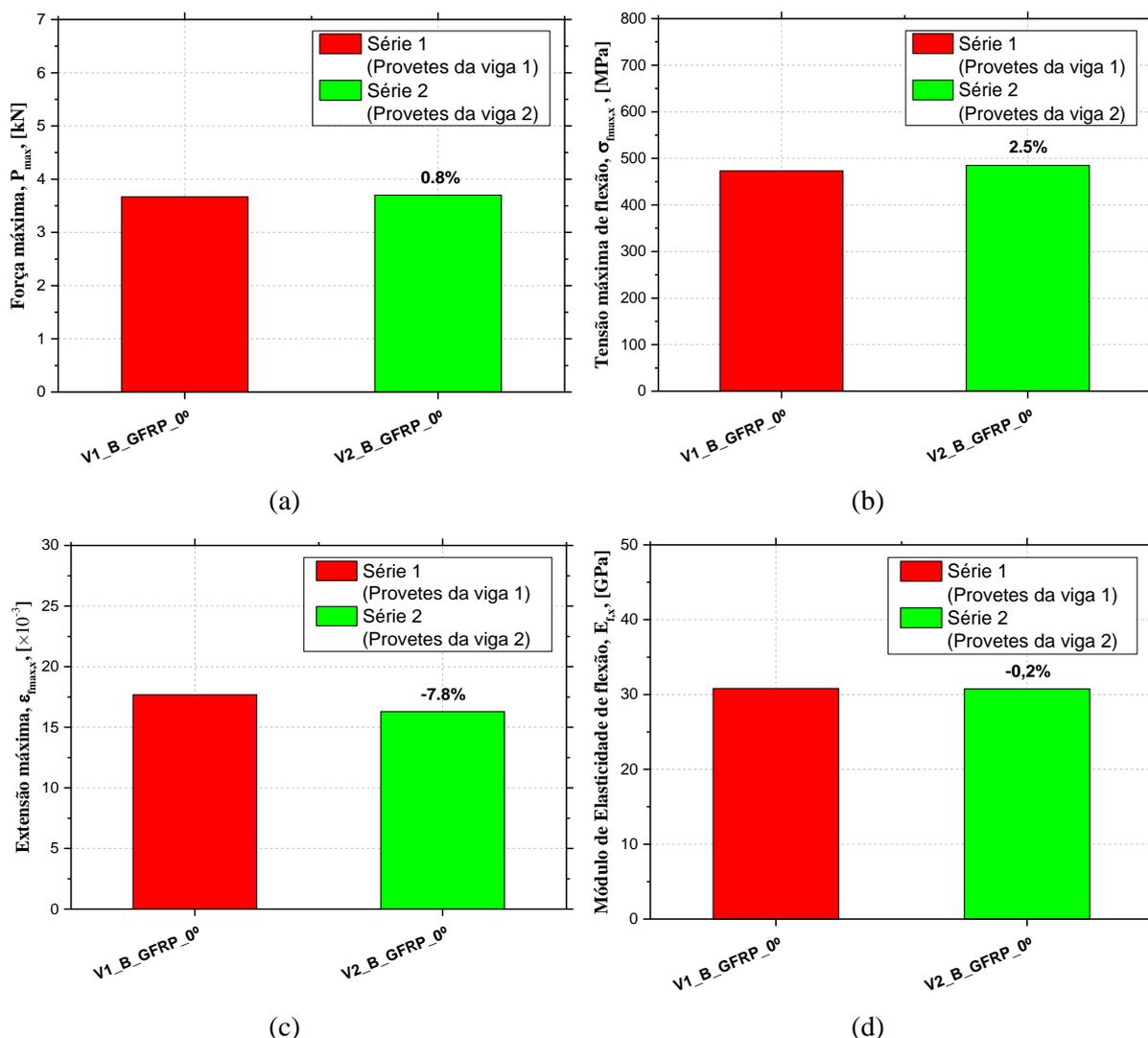


Figura 4.15 - Comparação de resultados para os provetes extraídos do banzo das vigas 1 (Série 1) e 2 (Série 2) a partir dos respetivos valores médios de: (a) força máxima de flexão; (b) tensão máxima de flexão na face superior (calculada); (c) extensão máxima na face superior (calculada) e (d) módulo de elasticidade de flexão.

De seguida é apresentada a relação entre a força aplicada e as extensões nas faces superior (calculada) e inferior (com base no extensómetro) de modo a compará-las (Figura 4.16). Como se observa, no ramo precedente à rotura, as extensões nas fibras superiores (compressão) e inferiores (tração) são idênticas e concordantes, exceto no caso do provete 01 da Série 1 (viga 1) e dos provetes 02 e 03 da Série 2 (viga 2). Nestes, as medições efetuadas pelos extensómetros não correspondem ao expectável, o que pode estar relacionado com a ocorrência da descolagem dos mesmos durante o ensaio. É de notar que durante os respetivos ensaios as medições dos extensómetros apresentavam algumas incoerências, tal como se verifica na Figura 4.16.

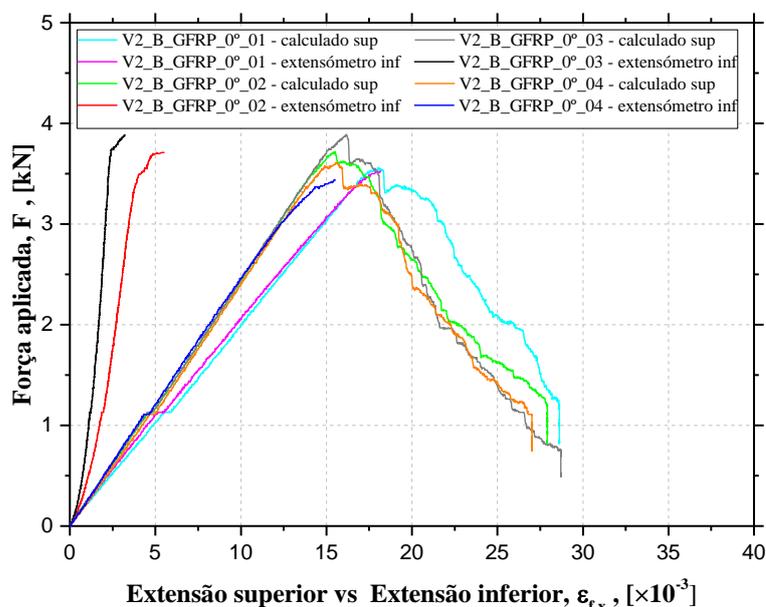
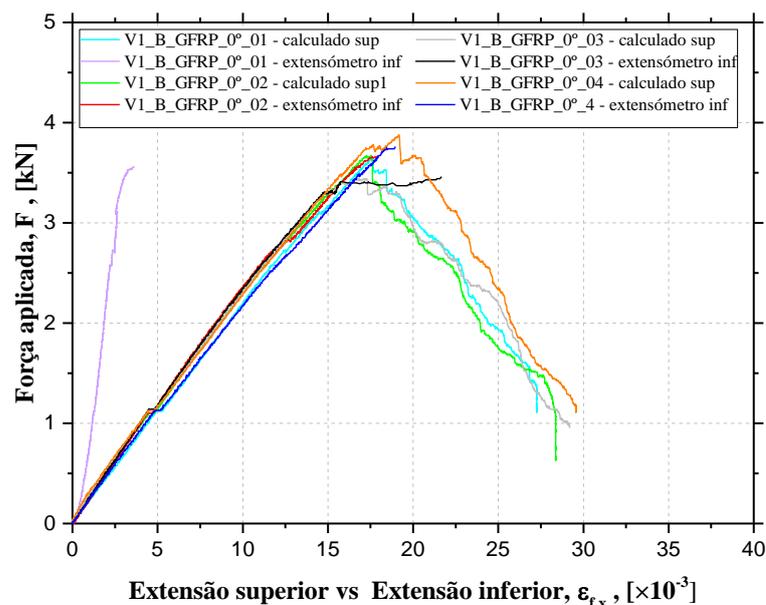


Figura 4.16 - Comparação entre a força aplicada a meio vão e as extensões medidas pelo extensômetro na face inferior (trações) e a força e as extensões calculadas segundo a norma ASTM D7264/D7264M – 07, com base na deformação medida na face superior (compressões): (a) Série 1 e (b) Série 2.

➤ **Comparação dos resultados obtidos para os provetes de GFRP (Séries 1 e 2) com os dos provetes híbridos (Série 3) em termos adimensionais**

Nesta fase normalizou-se a força imposta e a deformação obtida de todos os provetes com base na força e deslocamento máximos atingidos durante o ensaio. Na Figura 4.17a apresentaram-se

as respostas obtidas para todos os provetes e na Figura 4.17b apresenta-se a variação média $\delta_{f,x}/L$. Como se pode observar, e tal como anteriormente mencionado, na rotura os provetes híbridos apresentam uma relação $\delta_{f,x}/L$ bastante inferior aos provetes em GFRP, o que se relaciona com o facto de estes apresentarem um reforço em carbono (menor deformabilidade).

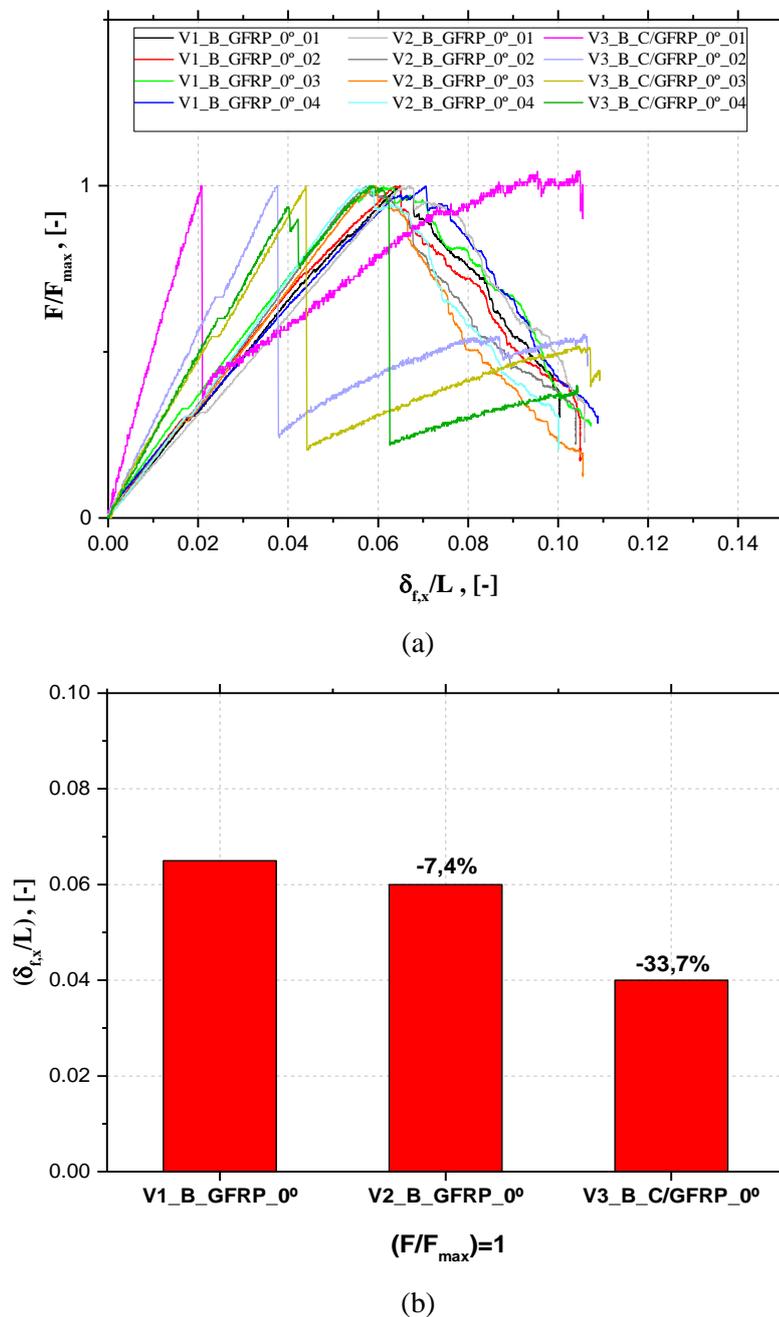


Figura 4.17 - (a) Curvas adimensionais de todos os provetes ensaiados e (b) respetiva variação com base nos valores médios. A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda.

4.4.2 Ensaio de Tração Direta

No que diz respeito à rotura dos provetes, após uma análise mais cuidada dos mesmos, constatou-se que o tecido ortogonal presente nos provetes da Série 1 possui uma conexão menos boa com a matriz/*roving*, sobretudo ao nível da interface entre o tecido $0^\circ/90^\circ$ do *combimat* (tecido ortogonal + manta aleatória) e a matriz. Nos provetes da Série 2, onde apenas existe *roving* e mantas com fibras dispostas aleatoriamente, este problema não acontece.

Na Figura 4.18 comparam-se os provetes da mesma série tendo em conta as várias orientações e na Figura 4.19 os provetes de séries distintas, mas com a mesma orientação.

Comparando os provetes da mesma série com diversas orientações (Figura 4.18), constata-se que, tanto nos provetes da Série 1 como nos da Série 2, ocorre uma diminuição do valor das propriedades obtidas com o aumento do ângulo entre o provete e a direção de reforço (à exceção da extensão última no caso dos laminados orientados a 15° e 30°), sendo ligeiramente superiores no caso da Série 2 (Tabela 4.4). Os provetes extraídos do banzo e da alma orientados na direção da pultrusão (0°) apresentam valores bastante similares para ambas as séries. No entanto, quando comparados com os provetes orientados a 15° , a diferença é pronunciada, verificando-se uma redução máxima de -79% relativamente à força máxima de tração obtida na Série 1 (Figura 4.18). Comparando os provetes a 30° com os provetes a 15° , embora a diminuição seja inferior do que anteriormente, observa-se uma diminuição máxima de -57% na tensão de tração na Série 2 e de -58% no módulo de elasticidade na Série 2 (Figura 4.18). Assinala-se o facto de os provetes orientados a 30° de ambas as séries atingirem extensões últimas ligeiramente superiores às dos provetes orientados a 15° . Os resultados obtidos encontram-se de acordo com o expectável, uma vez que a direção de pultrusão é a principal direção de reforço.

De modo a prover este tipo de perfil de uma maior rigidez transversal, adicionalmente colocam-se tecidos de reforço bidirecional e/ou mistos (*woven* ou *combimat*), tal como no caso da série 1. Dado que os provetes da Série 1 apresentam um *combimat* intermédio e um tecido ortogonal em cada uma das faces para além do *roving*, seria expectável que a diminuição das propriedades (tensão e módulo de elasticidade) entre os provetes orientados a 0° e a 15° e entre estes últimos e os de 30° fosse inferior à Série 2 (ausência de reforço transversal). Essa diferença, embora muito reduzida, acontece quando comparadas as tensões de tração dos provetes orientados a 15° e 30° de cada série, verificando-se uma variação de -46% para a Série 1, e de -57% para a

Série 2. No caso do módulo de elasticidade, a diferença entre os provetes orientados a 15° e 30° é de -56% e -58% ao nível das Séries 1 e 2, respetivamente. No entanto, quando comparados os provetes orientados a 0° e 15° verifica-se que a variação da tensão de tração é superior no caso da Série 1 (-78% *versus* -72%). Em suma, constata-se que entre provetes da mesma série orientados a 0°, 15° e 30°, o uso do reforço bidirecional não influenciou substancialmente as propriedades obtidas.

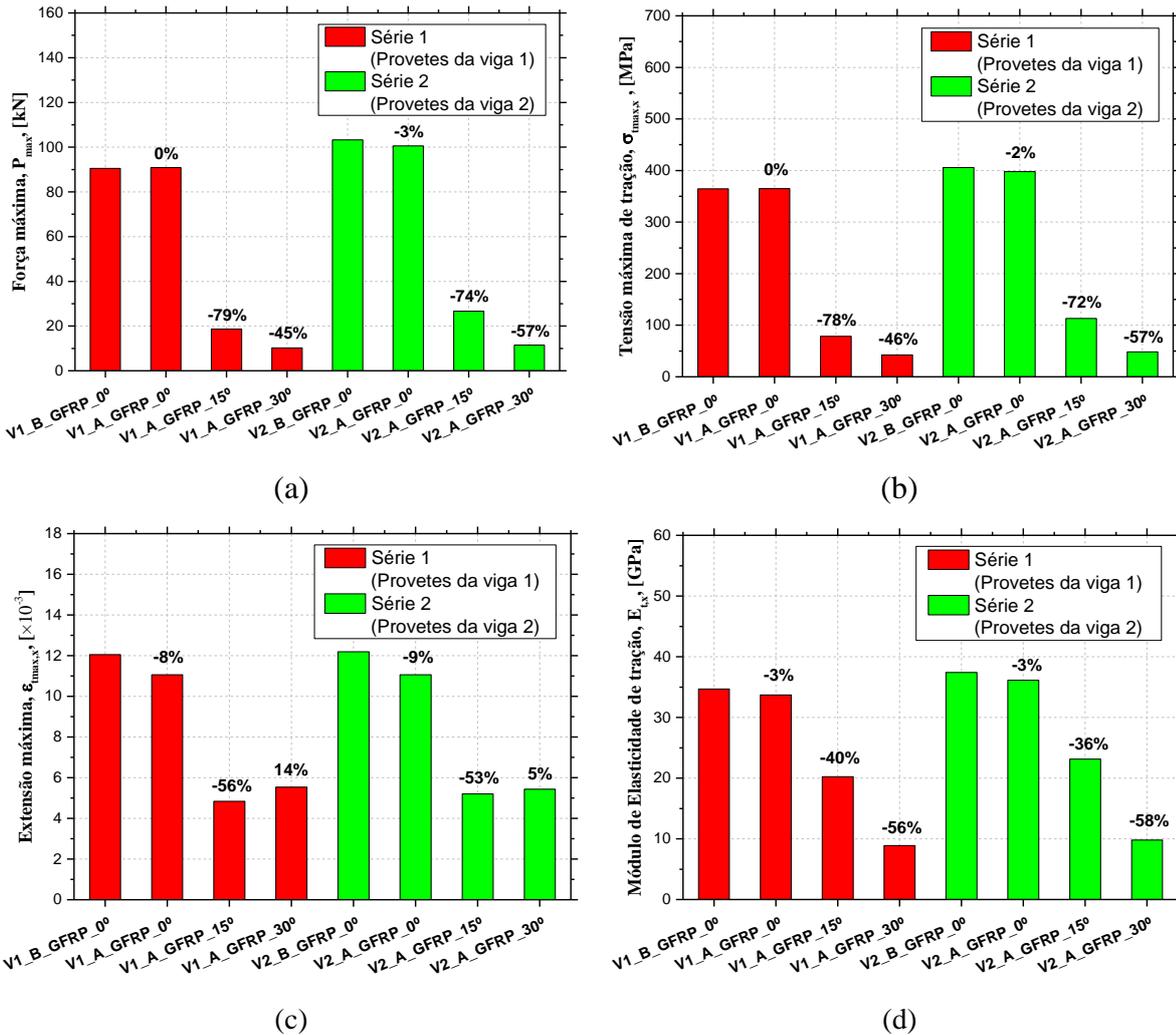


Figura 4.18 - Comparação dos vários parâmetros obtidos entre provetes da mesma série considerando: (a) a força máxima atingida; (b) a tensão de tração máxima; (c) a extensão máxima e (d) ao módulo de elasticidade. Nota: a comparação é sempre em relação ao provete anterior.

O próximo passo consiste em comparar os provetes com a mesma orientação, mas de séries distintas (vigas 1 e 2) (Figura 4.19). A comparação será realizada tendo em conta apenas o desempenho estrutural, pois os laminados apresentam diversas diferenças entre si (n° de fios de *roving*, gramagem das mantas, etc). Ou seja, neste caso não é possível quantificar diretamente

a vantagem da introdução das mantas de reforço bidirecionais, entre outros. Assim, destaca-se uma diferença máxima de 44% ao nível da tensão máxima de tração dos provetes orientados a 15° das duas séries.

Tendo em conta os parâmetros analisados constata-se que o desempenho estrutural dos provetes da Série 2 é melhor do que o da Série 1. Olhando apenas para a configuração do provete, estes resultados não eram os que se anteviam, especialmente no que diz respeito aos provetes orientados a 15° e 30°. Isto porque, contrariamente à Série 2, os provetes da Série 1 possuem mantas ortogonais, pelo que é possível mobilização de algumas dessas fibras numa outra direção que não a de pultrusão. Embora apenas se conheça a configuração aproximada do provete, i.e, não se conhecem as propriedades intrínsecas a cada uma das camadas das vigas, estima-se que as diferenças nos valores obtidos e, portanto, no desempenho estrutural dos provetes orientados a 0° se devem sobretudo ao nº fios de *roving*, à gramagem das mantas e ao processo de produção, nomeadamente no controlo de qualidade, humidade e qualidade do material usado. As diferenças ao nível do processo de produção evidenciam-se sobretudo pelo facto de os provetes da Série 1 demonstrarem, na rotura, uma conexão débil entre o *combimat*, nomeadamente a interface tecido 0°/90°, e a matriz/*roving* do perfil. Por outro lado, nos provetes da Série 2, a interface entre a manta com fibras aleatórias e a matriz é adequada. Repare-se ainda que o reforço bidirecional da Série 1 pode ter influenciado o modo de rotura obtido nos provetes orientados a 15° e 30°, uma vez que é mais frágil ainda na Série 2.

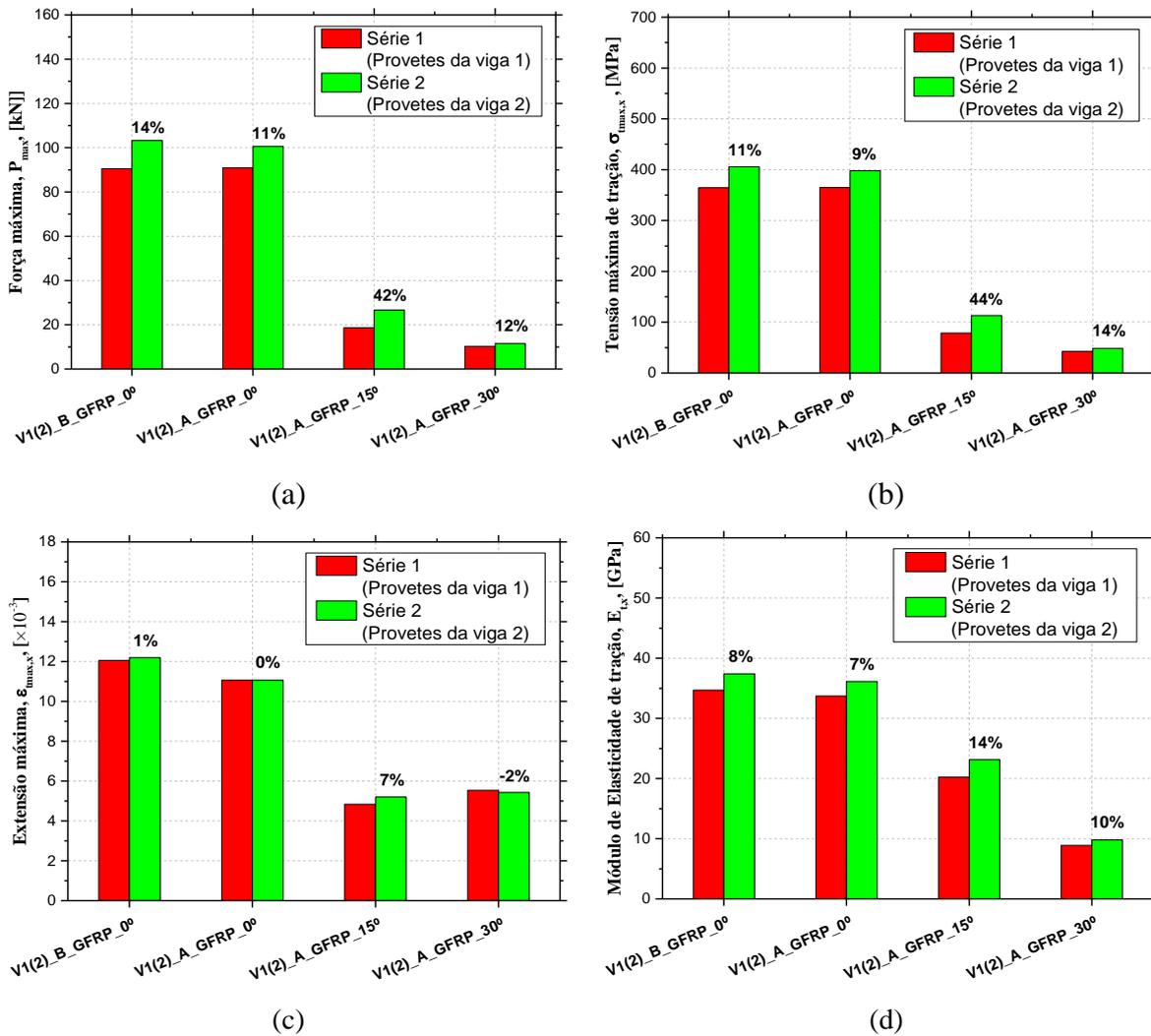


Figura 4.19 - Comparação dos vários parâmetros obtidos entre provetes do mesmo tipo, mas de séries distintas considerando: (a) a força máxima atingida; (b) a tensão de tração máxima; (c) a extensão máxima e (d) o módulo de elasticidade. Nota: a comparação é efetuada em relação à Série 1.

4.4.3 Ensaios de Tração Direta *versus* Flexão

Na presente subsecção pretende-se comparar os resultados médios obtidos nos ensaios de flexão com os obtidos nos ensaios de tração para os provetes cuja tipologia (origem e orientação) tenha sido estudada em ambos os ensaios. Assim, apenas podem ser comparados os provetes V1_B_GFRP_0° (da Série 1) e V2_B_GFRP_0° (da Série 2), em termos de força máxima, tensão máxima, extensão máxima e módulo de elasticidade.

Pela análise da Figura 4.20, constata-se para ambos os provetes que as propriedades obtidas a partir dos ensaios de flexão resultam numa tensão e extensão máximas de valor superior, e num

módulo de elasticidade inferior, quando comparados com os resultados obtidos por intermédio de ensaios de tração direta. Tal com indicado em (Correia, 2004), estas diferenças são características deste tipo de material, devendo-se ao facto deste tipo de estrutura possuir uma configuração interna tipo “sanduíche”, isto é, de diferentes constituintes dispostos em camadas.

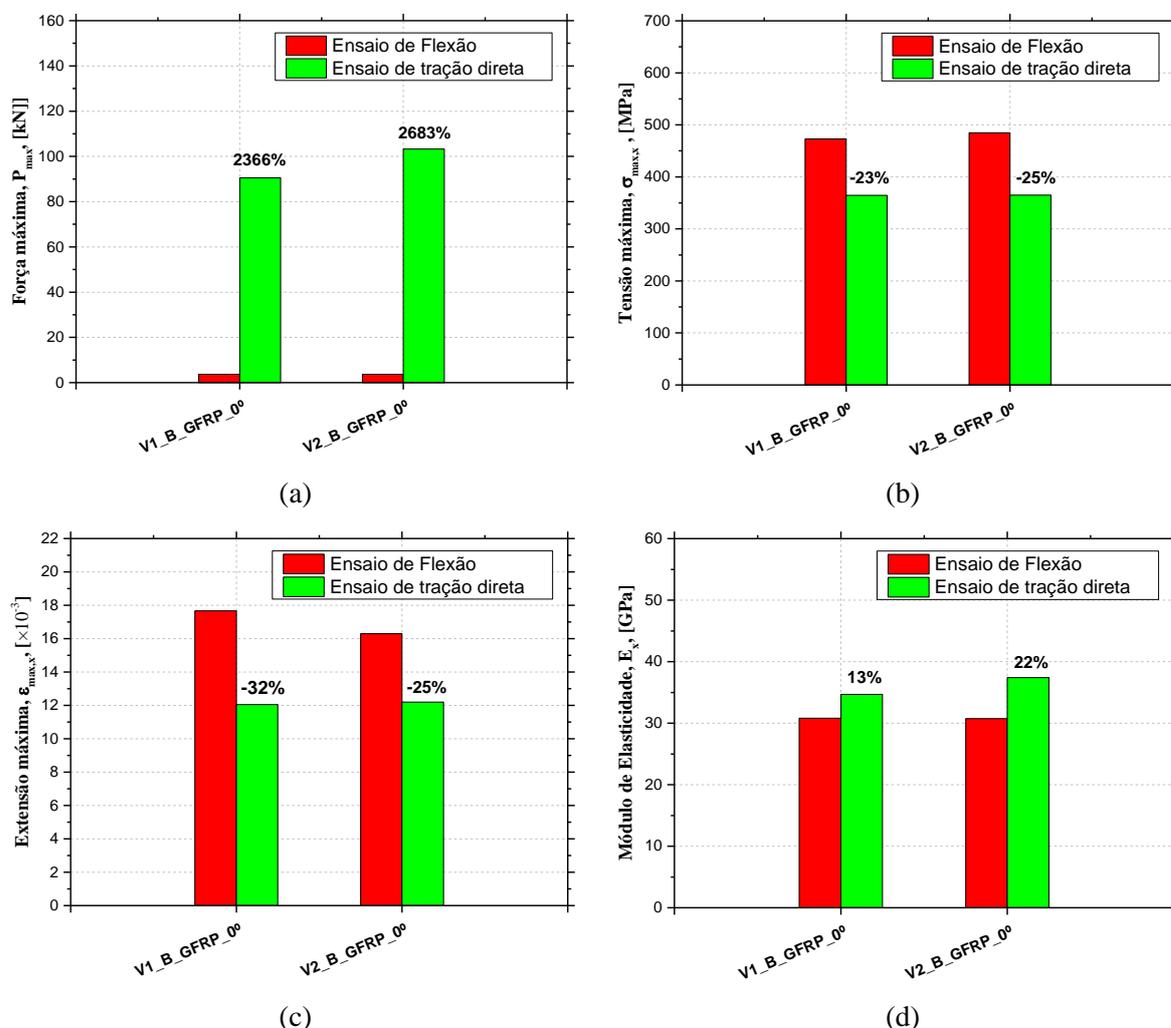


Figura 4.20 - Comparação dos resultados dos provetes da mesma série obtidos a partir dos ensaios de flexão e tração direta. Comparação para o provete V1_B_GFRP_0° e V2_B_GFRP_0°.

4.5 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os resultados e as principais ilações retiradas de um conjunto de ensaios realizados em provetes de GFRP retirados das vigas 1 e 2, e de C/GFRP retirado da viga 3, tendo sido estudado o comportamento mecânico dos mesmos através de ensaios de flexão e tração direta.

Tal como referido, os provetes em GFRP ensaiados à flexão, para além de apresentarem o mesmo tipo de comportamento e modo de rotura, resultaram em valores médios de força, tensão e extensão máximas muito similares. Por outro lado, o comportamento experimental que se obteve com os provetes híbridos em flexão revelou-se muito diferente daquele que se obteve com os provetes em GFRP, devido essencialmente ao modo de rotura prematuro. Comparando a *performance* das três séries, conclui-se que os provetes em GFRP representam a melhor solução, não se assinalando diferenças significativas entre as Séries 1 e 2.

Nos ensaios de tração, os provetes evidenciaram um comportamento essencialmente linear elástico até à rotura, como é natural neste tipo de materiais. Ressalva-se ainda a influência da orientação dos provetes relativamente à pultrusão na resposta à tração. Os provetes orientados a 15° e 30° apresentaram um comportamento mecânico significativamente inferior, controlado sobretudo pela matriz. As diferenças que se verificaram face às diferentes orientações dos provetes em termos de resposta experimental e dispersão de resultados são concordantes e encontram-se em conformidade com a literatura. Como se observa, entre provetes da mesma série orientados a 0°, 15° e 30°, conclui-se que o uso do reforço bidirecional (utilizado nos provetes da Série 1) não influenciou substancialmente as propriedades obtidas. Em termos de solução final estas são similares, embora os provetes da Série 2 apresentem um comportamento ligeiramente superior.

Analisados os modos de rotura, constata-se que é necessário melhorar o controlo de qualidade do processo de fabrico do material, nomeadamente no que respeita à conexão entre o reforço intermédio de carbono e a matriz/*roving* e a interligação ao nível da interface tecido ortogonal/matriz-*roving*.

CAPÍTULO 5

ESTUDOS PARAMÉTRICOS CONDUCENTES AO DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS SANDUÍCHE HÍBRIDOS

5.1 Introdução

No presente capítulo detalham-se os diferentes estudos paramétricos efetuados conducentes ao dimensionamento de painéis sanduíche híbridos. Assim, numa primeira fase é realizado um estudo da influência da camada superior na rigidez à flexão de um painel sanduíche híbrido com recurso a um *software* de análise de secções planas (*SECTION 4.0*). Numa segunda fase é feita a análise um painel sanduíche híbrido com base numa simulação tridimensional, recorrendo ao uso do *software* de elementos finitos *FEMIX 4.0*.

5.2 Influência da camada superior na rigidez à flexão do painel

5.2.1 Introdução

O *SECTION 4.0* é um *software* que permite efetuar a análise da secção transversal de uma qualquer estrutura, tendo por base o modelo de fibras. Este assume que a secção permanece plana antes e após a deformação imposta e que os diferentes materiais que constituem a secção se mantêm perfeitamente ligados (aderência perfeita). As secções transversais são discretizadas por elementos finitos quadriláteros com 4 nós, permitindo analisar secções de tamanho e forma qualquer. O modelo de material aplicado a cada elemento finito pode variar de elemento para elemento, permitindo assim considerar leis não lineares em determinadas zonas da secção. Para avaliar os integrais relacionados com os elementos finitos usados na discretização da malha recorre-se à integração de *Gauss-Legendre 2x2*. No *SECTION 4.0*, impondo a força axial e variando a curvatura (em uma ou nas duas direções principais) é possível obter a relação entre momentos fletores e curvaturas. O *software* permite ainda determinar a deformada por flexão de uma peça linear com secção transversal constante para uma determinada configuração de carga e condições de apoio. Usando a rigidez de flexão (EI) que resulta da relação entre os momentos fletores e as curvaturas, é possível estimar a rotura por flexão devido à relação entre as forças e as respetivas deformações de elemento como vigas ou lajes. Para efeitos de visualização utilizou-se o *Drawmesh*. Na Figura 5.1 encontra-se um modelo exemplo de uma secção de betão armado, (Sena-Cruz, 2013).

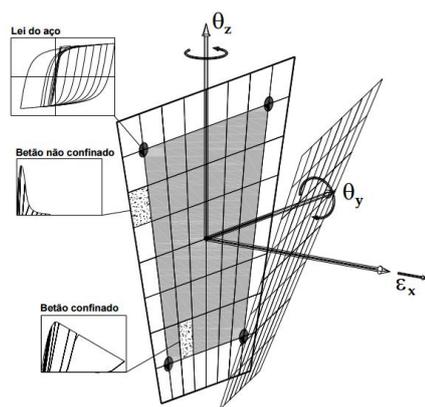


Figura 5.1 - Modelo exemplo de uma secção em betão armado do SECTION (Sena-Cruz, 2013).

Para a utilização do *software* é necessário elaborar um ficheiro de dados que contemple a secção em estudo e toda a informação necessária para a realização da análise. Processada a informação, existe um pós-processador que permite obter diferentes tipos de *outputs*. O *SECTION 4.0* possui diversos modelos constitutivos materiais lineares e não lineares (NLMM). Apesar de serem recomendados especificamente para determinados materiais, estes podem ser usados para qualquer tipo de material que o utilizador entenda como válidos (Tabela 5.1), (Sena-Cruz, 2013).

Tabela 5.1 - Modelos não lineares de materiais (Sena-Cruz, 2013).

Nome	Materiais Recomendados	Descrição
NLMM201	Aço e FRP	Bi-linear + Lei de Potência
NLMM202	Betão sujeito à compressão	Lei proposta pelo ModelCode 1990
NLMM203	Betão sujeito à tração e compressão	Lei Multi-linear
NLMM204	Betão sujeito à compressão	Lei proposta pelo Eurocódigo 2

5.2.2 Estudo paramétrico

No contexto do projeto “EasyFloor”, face ao seu desenvolvimento aquando da presente dissertação, optou-se por modelar a secção apresentada na Figura 5.2, com o objetivo de perceber o seu comportamento em flexão, tendo em consideração as diferentes propriedades possíveis para a camada superior de origem cimentícia. Esta secção resultou de um processo de

Tabela 5.2 - Propriedades adotadas na modelação para os diversos materiais.

	Densidade [kg/m ³]	E [MPa]	ν [-]	α [T ⁻¹]
Matriz cimentícia de elevado desempenho ⁽¹⁾	2200	Parâmetro em análise	0.15	1.0×10 ⁻⁵
PUR	70	10	0.30	1.0×10 ⁻⁵
Lâmina inferior e nervuras em GFRP	2000	32000	0.25	1.0×10 ⁻⁵

Nota: ⁽¹⁾ dado que a matriz cimentícia foi simulada com base nas propriedades de um betão convencional, todos os parâmetros dessa mesma camada (módulo de elasticidade, tensões e extensões máximas de compressão e tração) encontram-se no Eurocódigo 2 (EN, 1992).

Influência das características da lâmina superior na resposta à flexão do painel

O estudo paramétrico realizado teve como principal objetivo estudar a influência das características da lâmina superior em argamassa de origem cimentícia na resposta à flexão do painel. Para o efeito fizeram-se variar as propriedades mecânicas desta camada. Face às indefinições ainda existentes para o tipo de camada a utilizar, admitiu-se que a mesma possuía características iguais às de um betão convencional. Nesse sentido, o estudo realizou-se para as seguintes classes de betão: C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C45/55 e C50/60. Optou-se por fixar a extensão última de compressão, ϵ_c , igual a 2.5%. Tal como referido, em todas as simulações efetuadas, a espuma de PUR e o GFRP apresentam um comportamento linear elástico e a camada superior um comportamento não linear em compressão e tração.

De modo a validar as modelações efetuadas, inicialmente adotou-se uma secção constituída por FRP e um comportamento linear elástico. Seguidamente, impôs-se à secção uma curvatura de -0.06255, resultando num M= -304.35 kN.m. Com base na inércia da secção, calculou-se a tensão nas faces, verificando-se que correspondia ao valor indicado pelo *software*.

Validado o modelo, utilizaram-se os modelos não lineares (modelo de compressão - NLM202 e modelo de tração - NLMM203) na camada superior do painel em matriz cimentícia, permanecendo os restantes materiais em regime linear elástico. Na Tabela 5.2 encontram-se as propriedades dos betões considerados no estudo paramétrico.

Na Figura 5.3 e na Figura 5.4 encontram-se respostas obtidas em termos das relações momento fletor *versus* curvatura e força *versus* deslocamento a meio vão quando aplicadas 2 cargas pontuais na zona central, respetivamente, para as diferentes classes de resistência do betão. Apesar das relações momento fletor *versus* curvatura apresentarem o mesmo formato, verifica-se que o momento máximo aumenta com a classe de resistência do betão. Em todas os casos, verifica-se diminuição gradual da rigidez de flexão da secção até ao pico da curva, resultante das incursões do betão em compressão nas zonas não lineares. Após o pico, observa-se uma queda acentuada da rigidez da secção que é explicada pela rotura da camada superior por compressão. Apesar disso, a secção ainda possui alguma capacidade resistente pelo facto do comportamento da espuma de PUR e, sobretudo, do FRP se encontrarem em regime linear elástico, no âmbito das presentes simulações. Dado que o *SECTION 4.0* utiliza o valor do momento máximo da resposta como ponto de partida para determinar a relação entre a força e o deslocamento a meio vão, apenas é possível obter a resposta até à força máxima. O uso de uma matriz cimentícia com propriedades semelhantes a um C50/60 convencional em detrimento de um C25/30, traduz-se num aumento do momento em cerca de 23% (30% em termos de força) e da curvatura em cerca de 13% (18% em termos de flecha a meio vão). Por sua vez, a rigidez de flexão aumenta em 12%. Tal como expectável e demonstrado, o uso de um betão de melhor qualidade permite que a rigidez à flexão e resposta deformacional do painel melhore.

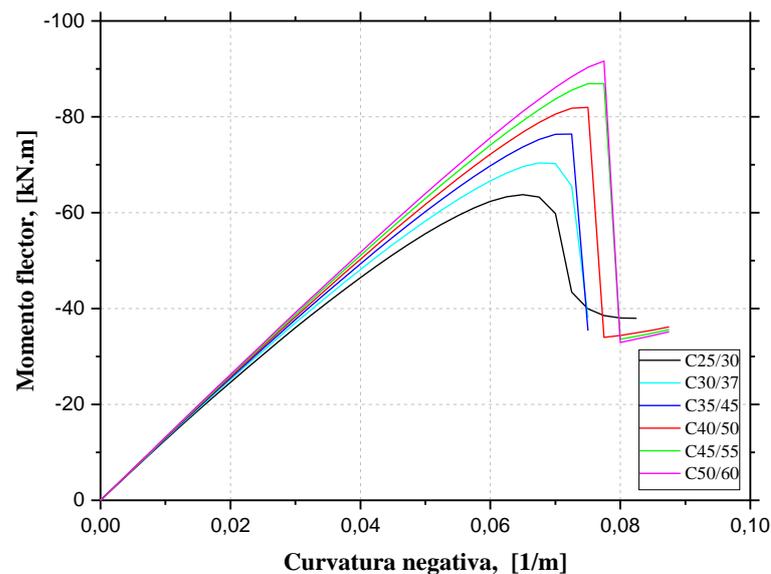


Figura 5.3 - Relação entre o momento fletor e a curvatura para distintas classes de resistência do betão.

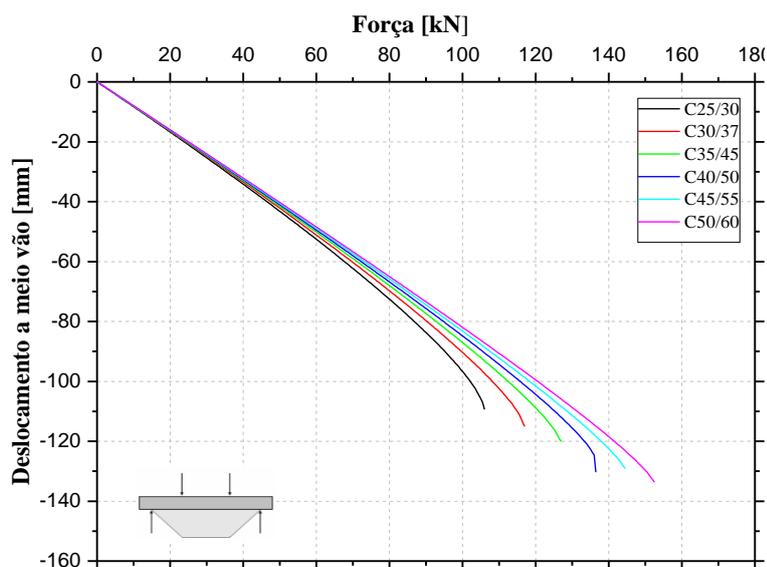


Figura 5.4 - Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para um painel simplesmente apoiado com 4 metros de vão e com carregamento em 4 pontos, para distintas classes de resistência do betão.

Influência da extensão última da lâmina superior na resposta do painel

Nesta fase de estudo, pretendeu-se avaliar a influência que a extensão última de compressão lâmina superior na resposta do painel. Para tal, consideraram-se os seguintes valores de extensão última da camada superior de betão: 2‰, 2.5‰ (usada anteriormente) e 4‰. Neste estudo considerou-se uma única classe de resistência do betão: C50/60.

Na Figura 5.5 e Figura 5.6 apresentam-se os resultados obtidos em termos de momento fletor *versus* curvatura e força *versus* deslocamento a meio vão. Como esperado, com o aumento da extensão última de compressão no betão obtêm-se capacidades resistentes superiores. Por sua vez, a rigidez à flexão diminui ligeiramente, repercutindo o menor módulo de elasticidade da camada de betão. Quando para a camada superior é atribuída uma extensão última de compressão igual a 4‰, em vez de 2‰, observa-se um aumento da força em 40% e do deslocamento em 66%.

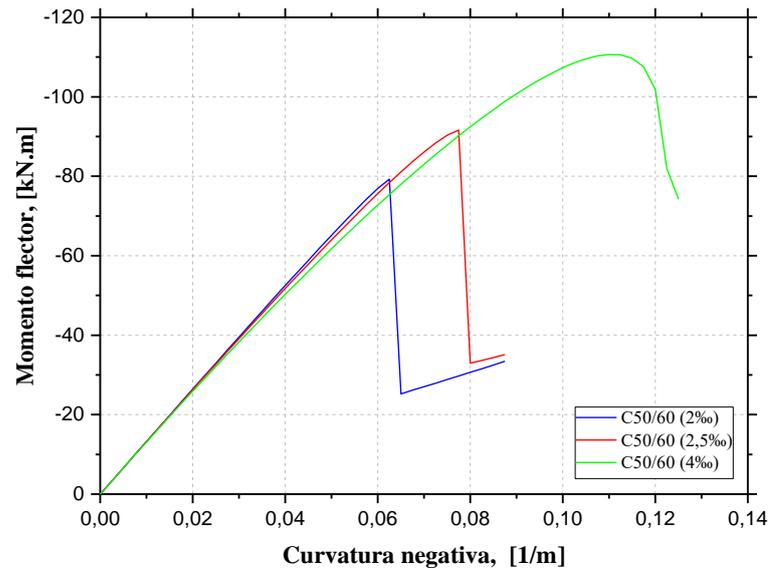


Figura 5.5 - Relação entre o momento fletor e a curvatura para diferentes extensões últimas de compressão da camada de betão.

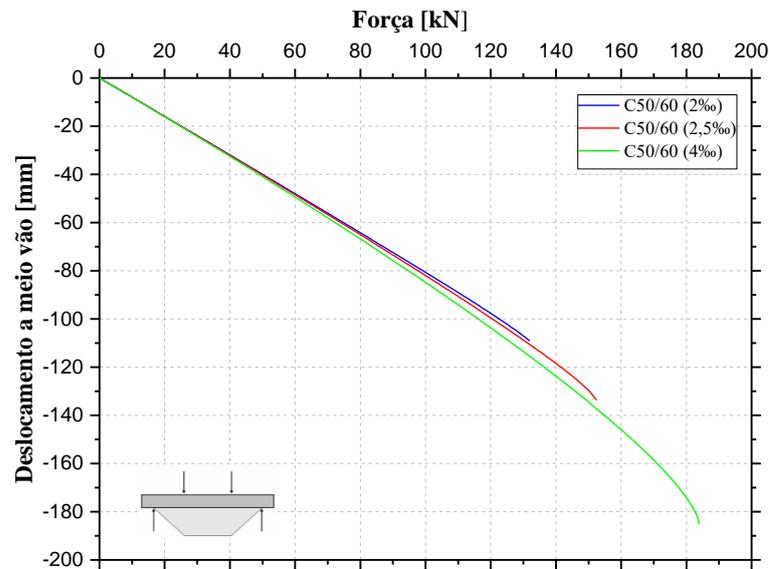


Figura 5.6 - Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para um painel simplesmente apoiado com 4 metros e carregado em 4 pontos e para diferentes extensões últimas de compressão da camada de betão.

5.3 Simulação baseada no MEF de um painel sanduíche híbrido

5.3.1 Considerações iniciais

A presente simulação teve como principal objetivo auxiliar a validação de um algoritmo genético referente à otimização do dimensionamento de painéis sanduíche, desenvolvido no âmbito do projeto “EasyFloor”, (Garrido *et al.*, 2017)

O painel sanduíche híbrido modelado é composto por uma camada inferior e 2 nervuras (em lados opostos) em GFRP, uma camada superior em matriz cimentícia e um núcleo em espuma poliuretano, como se ilustra na Figura 5.7. A secção transversal ($0.50 \times 0.15 \text{ m}^2$) encontra-se nessa mesma figura. O painel possui um vão igual a 5 m e encontra-se simplesmente apoiado nas extremidades. Como este painel apresenta dupla simetria, então optou-se por modelar apenas $\frac{1}{4}$ de painel ($2.5 \times 0.25 \times 0.15 \text{ m}^3$), de acordo com as respetivas condições de apoio de simetria (Figura 5.9). Na Figura 5.8 são apresentadas vistas tridimensionais do painel modelado.

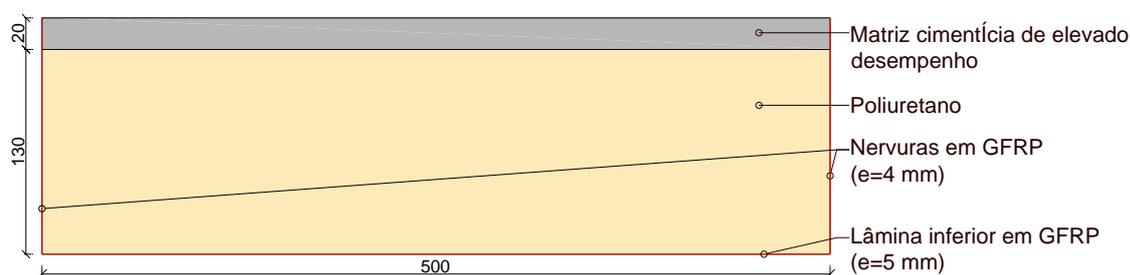


Figura 5.7 - Secção transversal modelada. Nota: as dimensões encontram-se em milímetros.

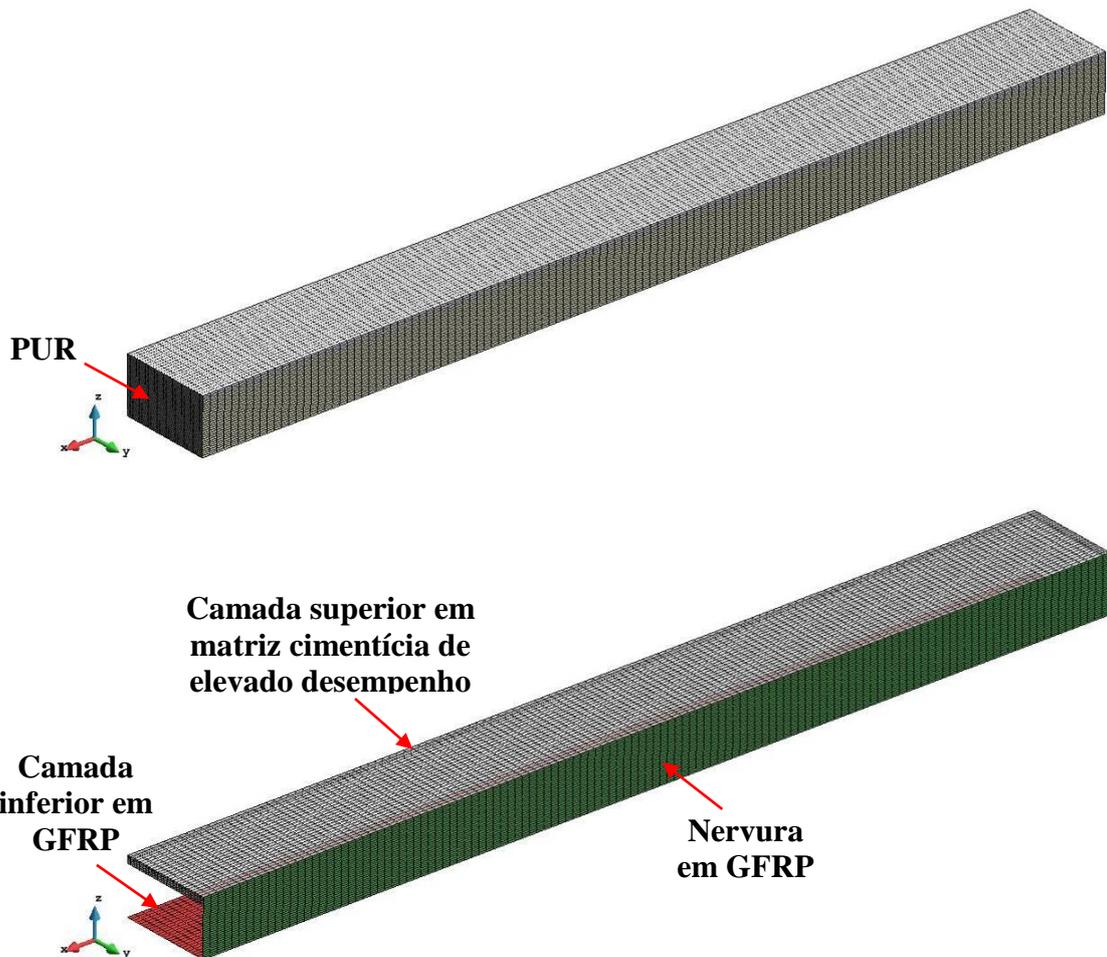


Figura 5.8 - Vistas tridimensionais de $\frac{1}{4}$ de painel: em cima, painel com todas as camadas; em baixo, foi removido o núcleo para melhor identificação dos restantes constituintes.

Na presente simulação recorreu-se ao *software* de elementos finitos *FEMIX 4.0*, tendo sido também usado o *Drawmesh* no pós-processamento, (Sena-Cruz *et al.*, 2007). Na presente simulação, devido às limitações computacionais, utilizaram-se elementos finitos de 4 nós do tipo casca (*Mindlin Shell Quad*) para a simulação do GFRP e elementos finitos de volume com 8 nós do tipo volume (*Hexa Solid*) na simulação da espuma de PUR. A integração numérica dos elementos de casca e volume foi a *Gauss-Legendre* com 2×2 e $2 \times 2 \times 2$ pontos de integração, respetivamente. Na discretização adotada procurou assegurar-se a relação entre as dimensões do elemento finito (maior/menor) inferior a 3. Dado que o problema foi modelado anteriormente à caracterização material descrita nos Capítulos 3 e 4, admitiu-se a hipótese simplificativa de que todos os materiais apresentam um comportamento elástico-linear isotrópico, tendo-se considerado ligação perfeita entre todos os materiais. As propriedades adotadas, de acordo com a bibliografia, encontram-se detalhas na Tabela 5.3.

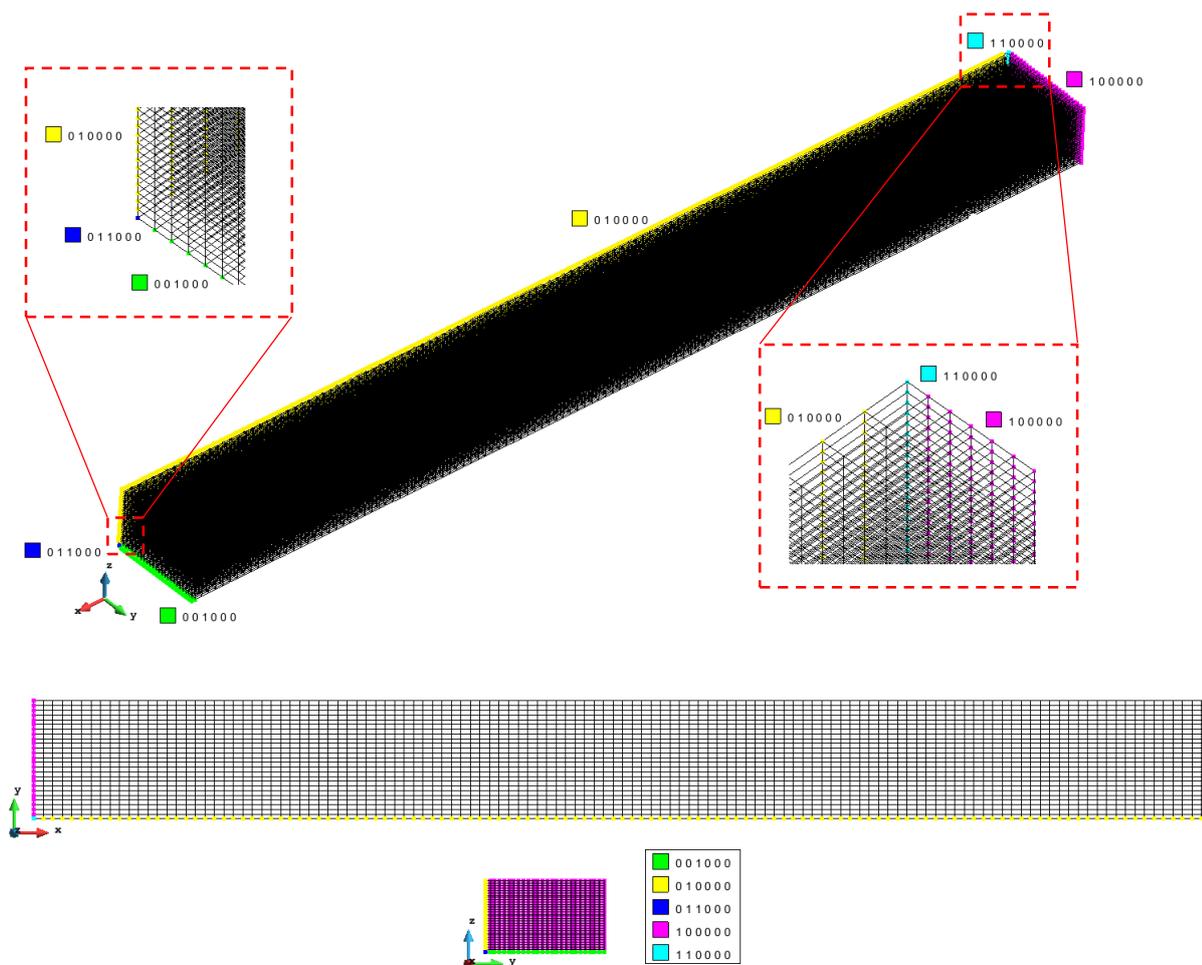


Figura 5.9 - Condições de apoio e de simetria utilizadas na modelação: perspetiva tridimensional do painel com alguns pormenores (em cima) e respetivos alçados (em baixo). Notas: os códigos “0” e “1” presentes na figura dizem respeito aos graus de liberdade em que existem condições de apoio (deslocamentos segundo X Y Z e rotações segundo X Y Z), sendo que os graus de liberdade impedidos têm o código “1”. A malha utilizada encontra-se também visível.

Tabela 5.3 - Propriedades adotadas na simulação numérica.

	Densidade	E	v	α
	[kg/m ³]	[MPa]	[-]	[T ⁻¹]
Matriz cimentícia	2400	23800	0.15	1.0×10 ⁻⁵
PUR	70	10	0.30	1.0×10 ⁻⁵
Nervuras em GFRP	2600	42500	0.15	1.0×10 ⁻⁵
Lâmina inferior em GFRP	2600	57500	0.15	1.0×10 ⁻⁵

Com o objetivo de analisar e comparar os deslocamentos máximos a meio vão e as tensões máximas na direção longitudinal, direção principal do painel, efetuou-se uma simulação estática. Para isso, recorreu-se à combinação referente a hipotético estado limite último: $p_{Ed} = 1.35 \times (\text{peso próprio} + \text{revestimentos}) + 1.5 \times \text{sobrecarga}$, com revestimentos = 1.5 kN/m^2 e sobrecarga = 2 kN/m^2 . A carga foi aplicada como sendo uniformemente distribuída na face superior da camada de matriz cimentícia.

5.3.2 Resultados

5.3.2.1 Análise do deslocamento vertical

Na Figura 5.10 apresenta a evolução dos deslocamentos na direção Z. Como se observa, os deslocamentos em Z são uniformes ao longo da espessura e vão aumentando em direção à medida que nos afastamos do apoio, ocorrendo o máximo a meio vão para um valor de 13.74 mm, tal como espectável.

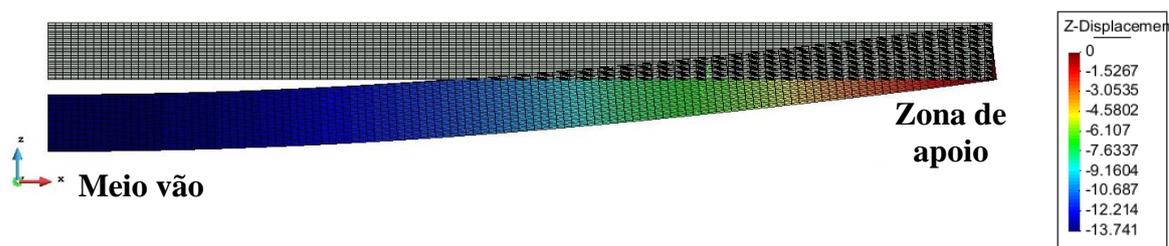


Figura 5.10 - Deslocamentos (plano ZX): em cima encontram-se os deslocamentos na direção Z e em baixo encontram-se os deslocamentos na direção X. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores encontrados na escala encontram-se em milímetros.

A Tabela 5.4 apresenta os deslocamentos verticais determinados pela simulação numérica do painel, bem como o deslocamento analítico calculado através da expressão (2.25) presente no Capítulo 2. Como se observa, o modelo de elementos finitos conduz a um deslocamento inferior ao analítico.

Tabela 5.4 - Deslocamento vertical a meio vão determinado pelo modelo de elementos finitos e analiticamente.

Deslocamento Z analítico [mm]	Deslocamento Z numérico [mm]	Erro [%]
15.55	13.74	-11.6

5.3.2.2 Análise das tensões na direção longitudinal

Na Figura 5.11 apresenta-se a evolução das tensões na direção longitudinal (X) com a altura da secção para a zona de meio vão. Como se observa, o núcleo apresenta tensões axiais desprezáveis e as lâminas possuem tensões axiais máximas de compressão e tração. Verifica-se também a transição brusca da tensão entre camadas.

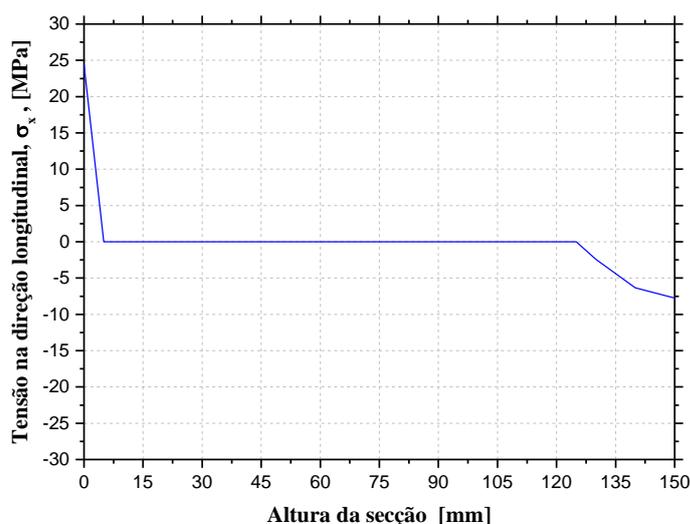


Figura 5.11 - Evolução da tensão na direção longitudinal ao longo da altura do painel na zona de meio vão.

A Figura 5.12 apresenta a distribuição de tensões normais no GFRP, quer na lâmina inferior como na nervura. Como espectável, a tensão máxima ocorre a meio vão onde o momento fletor é máximo. Como se observa, o valor máximo tem um valor de 24.83 MPa. Tendo em conta a bibliografia e os ensaios de caracterização dos laminados pultrudidos à flexão e tração, verifica-se que o valor a que a camada se encontra é de facto extremamente reduzida. Observam-se

também tensões de compressão na parte superior da nervura, com um máximo de -14.35 MPa a meio vão.

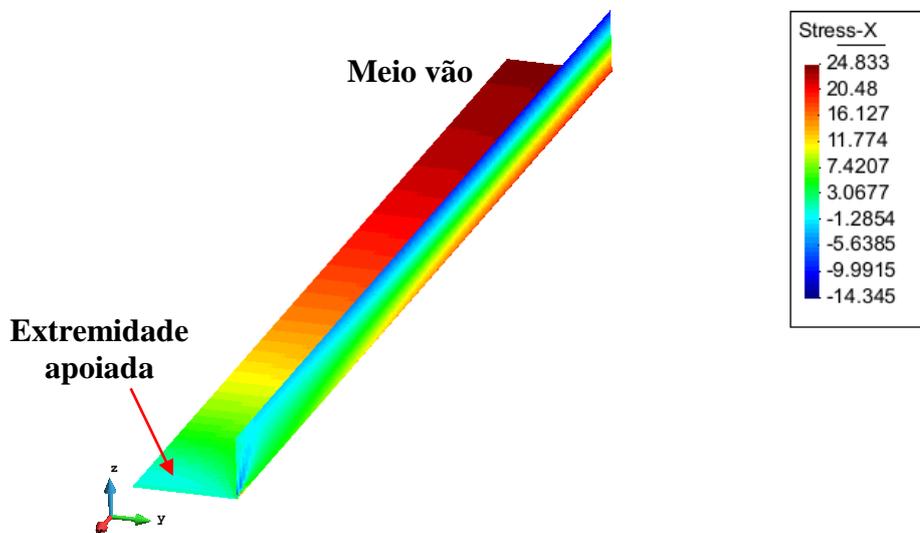


Figura 5.12 - Distribuição das tensões axiais na direção X, na camada inferior e nervura em GFRP.

Na Figura 5.13 apresenta a distribuição de tensões axiais na camada superior (matriz cimentícia de elevado desempenho) e no núcleo (PUR). O valor máximo da tensão a que a camada superior se encontra sujeita ocorre a meio vão e tem um valor de -7.90 MPa (compressão) e é superior ao obtido analiticamente (-7.22 MPa). Dado que a matriz cimentícia a ser utilizada apresenta uma tensão de rotura à compressão significativamente superior, este valor encontra-se dentro do admissível.

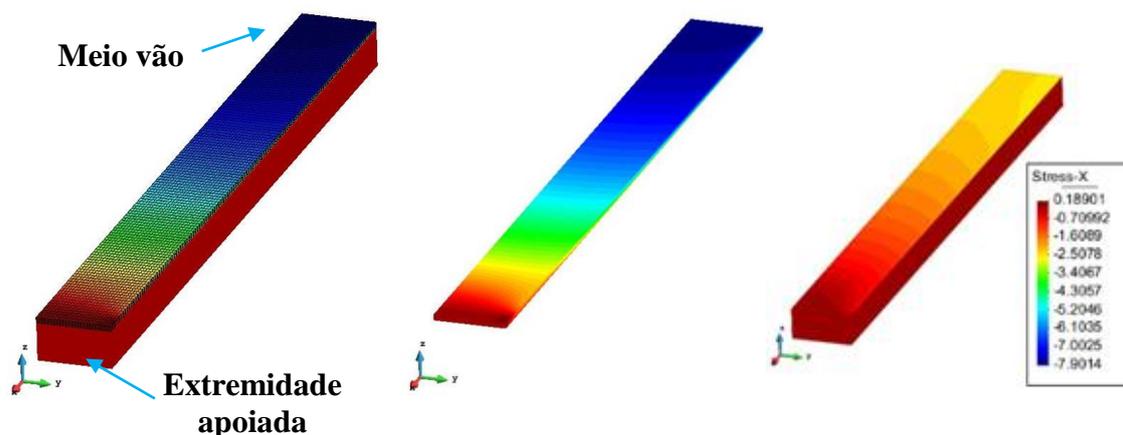


Figura 5.13 - Distribuição das tensões axiais na direção X, na camada superior (matriz cimentícia) e no núcleo (PUR). Notas: na imagem do lado esquerdo, a camada com os respetivos elementos finitos, diz respeito à camada superior; no lado direito encontra-se apenas representada as camadas separadamente.

Na Tabela 5.5 compara-se o valor obtido numericamente com o valor obtido analiticamente, de acordo com a expressão (2.16) e (2.17) (ver Capítulo 2). A tensão máxima obtida numericamente é superior na camada superior e inferior na camada inferior.

Tabela 5.5 - Tensão axial determinada analiticamente através das expressões analíticas descrita no Capítulo 2 e do modelo numérico.

Camada	Tensão máxima na direção X - analítica [MPa]	Tensão máxima na direção X - numérica [MPa]	Erro [%]
Camada superior (matriz cimentícia de elevado desempenho)	-7.22	-7.90	-9.4%
Camada inferior (GFRP)	28.6	24.83	-13.2%

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

6.1 Conclusões

A revisão da literatura disponível acerca do tópico em estudo permitiu adquirir um vasto leque de conhecimentos acerca das características gerais e aplicações inerentes aos painéis sanduíche de foro estrutural, nomeadamente no que concerne à configuração, processos de produção, evolução temporal, comportamento mecânico e dimensionamento. Permitiu também a identificação dos materiais mais utilizados na sua conceção e fabrico, assim como dos sistemas que atualmente melhor desempenho apresentam. Deste modo, identificou-se como essencial para a idealização e conceção deste tipo de elementos estruturais uma caracterização objetiva e completa dos materiais intervenientes, em particular a espuma de poliuretano (PUR) do núcleo, as lâminas de GFRP e C/GFRP das nervuras, a lâmina inferior em GFRP e C/GFRP e a lâmina superior em argamassa de elevada performance.

Deste modo, a caracterização mecânica da espuma de poliuretano à compressão, tração e corte permitiu uma melhor compreensão do comportamento deste material que compõe o núcleo do painel sanduíche. Para cada um dos ensaios, determinaram-se as propriedades elásticas, resistências e modos de rotura.

Nos ensaios realizados relativos ao comportamento em compressão e em tração do PUR adotaram-se procedimentos que estão documentados na literatura. Em compressão, a espuma de poliuretano (PUR) apresentou um comportamento inicial aproximadamente linear até se atingir a força máxima, seguindo-se um decréscimo da força que gradualmente se aproximou de um patamar com o aumento das deformações, para valores de força aproximadamente constantes, tendo-se obtido deformações residuais elevadas. Em tração este material apresentou um comportamento linear elástico até à rotura, que ocorreu de um modo frágil.

Neste estudo assumiu especial importância a realização dos ensaios de corte, pois de acordo com a literatura verifica-se que a rotura por corte é das mais frequentes nos painéis sanduíche, ocorrendo sobretudo ao nível do núcleo. Dada a complexidade deste tipo de ensaio, o estudo começou por fazer uma avaliação das condições de ensaio incluindo a geometria dos provetes e o sistema de carregamento. Esta avaliação teve em vista quer os ensaios à rotura, quer os ensaios de fluência, e teve por base as recomendações constantes das normas ASTM C273-00 e ISO 1922:2001(E).

Nos ensaios de corte verificou-se que os parâmetros força máxima de corte, tensão máxima de corte, distorção última e, em menor escala, módulo de corte dependem tanto do campo de deformação gerado como da geometria do provete adotada. Deste modo, constatou-se que o uso de relações L/t não padronizadas conduz à alteração dos modos de rotura dos provetes ao nível da interface PUR/adesivo. Assim, quanto menor a relação L/t utilizada, menores são os valores da força de corte obtidos na rotura, devido essencialmente ao efeito estrutural do sistema de ensaio no provete. Como se verificou, é importante que o provete possua um comprimento suficientemente grande (não inferior a 12 vezes a espessura tal como sugere a norma ASTM C273-00) de modo a minimizar o efeito estrutural provocado pelo sistema de ensaio no provete. Contudo, na ausência de condições que permitam o cumprimento da relação L/t indicada na norma ASTM C273-00, os resultados obtidos para relações L/t inferiores poderão ser utilizados na avaliação da maior parte dos parâmetros, dado serem valores conservativos, exceto no caso da força máxima de corte.

Em suma, o sistema de ensaio desenvolvido conduziu a bons resultados, correspondendo assim aos requisitos identificados inicialmente para o programa experimental. A configuração de ensaio proposta foi validada tanto pelo programa experimental como pelas simulações numéricas.

A caracterização mecânica em flexão e em tração dos provetes pultrudidos em GFRP e híbridos permitiu avaliar o comportamento que este tipo de material apresenta, tendo sido possível comprovar que este é linear elástico até à rotura. O desempenho dos provetes ensaiados permitiu ainda identificar alguns problemas no comportamento mecânico evidenciados por mecanismos de rotura prematuros, sobretudo associados à delaminação entre camadas. Provavelmente estes estarão relacionados com o processo de produção, e poderão vir a ser alvo de atenção em futuras revisões do processo produtivo.

Os provetes em GFRP ensaiados à flexão, para além de apresentarem comportamentos mecânicos e modos de rotura semelhantes, também exibiram valores médios de carga, tensão e extensão máximas muito similares. Por outro lado, a resposta dos provetes híbridos em flexão é bastante diferente das observadas nos provetes de GFRP, devido essencialmente ao facto de ter sido condicionada por um modo de rotura prematuro. Comparando a *performance* das três séries, conclui-se que os provetes em GFRP representam nas condições atuais uma melhor solução, não se assinalando diferenças significativas entre as séries 1 e 2.

Nos ensaios de tração, os provetes evidenciaram um comportamento linear elástico, como é natural neste tipo de material. Ressalva-se ainda o facto de, nos provetes cuja orientação da direção maior difere da direção da pultrusão (provetes orientado a 15° e 30°), o comportamento ser principalmente controlado pela matriz (resposta quase linear elástica). As diferenças que se verificaram face às diferentes solicitações (resposta e dispersão) são concordantes e encontram-se em conformidade com a literatura. Como se observa, entre provetes da mesma série orientados a 0°, 15° e 30°, conclui-se que o uso do reforço bidirecional (utilizado nos provetes da Série 1) não influenciou substancialmente as propriedades obtidas. Em termos de solução final estas são similares, embora os provetes da Série 2 apresentem um comportamento ligeiramente superior.

Analisados os modos de rotura obtidos durante os ensaios de flexão constatou-se que é necessário melhorar a técnica e o processo de fabrico do material, nomeadamente no que respeita à conexão entre o reforço intermédio de carbono e a matriz/*roving*. Analisando os modos de rotura e resultados dos ensaios de tração constatou-se que a interligação ao nível da interface tecido ortogonal/matriz-*roving* também poderá ser alvo de otimização de processos.

Por último, as simulações numéricas conducentes ao dimensionamento do painel sanduíche mostraram que o uso de uma camada superior com propriedades mecânicas melhoradas aumenta significativamente a rigidez à flexão do painel.

Adicionalmente, a simulação numérica baseada no MEF do painel sanduíche híbrido providenciou valores bastante aproximados dos obtidos analiticamente, tendo-se obtido um erro máximo de cerca de 13% (tensão na direção principal da lâmina em GFRP).

6.2 Perspetivas de desenvolvimentos futuros

Os painéis sanduíche híbridos representam uma solução de carácter estrutural relativamente recente e inovador comparativamente com as soluções tradicionais em betão armado e aço. Nesse contexto, existe uma necessidade de se realizarem estudos adicionais e mais aprofundados, nomeadamente quanto à viabilidade da aplicação dos mesmos como solução estrutural na reabilitação de pisos de edifícios. Assim, de seguida, encontram-se indicadas várias matérias a serem desenvolvidas e investigadas em futuros trabalhos:

- Desenvolvimento do compósito cimentício presente na camada superior (tipo e teor de fibras de reforço);
- Caracterização exaustiva das propriedades físicas e mecânicas dos diferentes tipos de materiais que compõem o painel à rotura e em fluência (continuação);
- Estudar a influência da temperatura nas propriedades dos materiais que constituem o painel sanduíche híbrido;
- Caracterização do comportamento estrutural a curto prazo (estático e dinâmico) e a longo prazo dos painéis sanduíche;
- Ensaio de caracterização do comportamento de ligação (painel-painel e painel-apoios);
- Desenvolvimento e calibração de modelos numéricos para a previsão do comportamento em serviço (estático e dinâmico) e à rotura dos painéis sanduíche e das suas ligações, com recurso a software de elementos finitos (continuação);
- Estudos mais aprofundados dos diferentes modos de rotura, e desenvolvimento de expressões numéricas capazes de estimar com precisão razoável o surgimento dos mesmos;
- Avaliação do comportamento dos painéis sanduíche quando sujeitos a cargas concentradas;
- Estudo do comportamento em serviço em pisos de edifícios, considerando o seu comportamento quanto ao isolamento térmico e acústico;
- Estudos experimentais e numéricos do comportamento dos painéis sanduíche híbridos em situações de incêndio;
- Estudo experimental e numérico do ciclo de vida, da durabilidade do comportamento dos painéis sanduíche híbridos e da sua sustentabilidade;
- Avaliar a aplicabilidade e a viabilidade económica da solução desenvolvida em pisos de edifícios “*in situ*”;
- Preparação de um manual com regras de dimensionamento e especificações técnicas para a produção, montagem e utilização do sistema em desenvolvimento;
- Avaliar a aplicabilidade da solução desenvolvida em tabuleiros de pontes pedonais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, H. G. (2013). *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels: The Commonwealth and International Library: Structures and Solid Body Mechanics Division*. Oxford: Pergamon Press.

Almeida, I. (2009). *Structural behaviour of composite sandwich panels for applications in the construction industry*. MSc dissertation in Civil Engineering, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal.

ALTO PERFIS PULTRUDIDOS, Lda., IST, & UM (2015). Projeto *EASYFLOOR "Desenvolvimento de painéis sanduíche compósitos para a reabilitação de pisos de edifícios"* - PARTE A e B [Documento Confidencial] / Sistemas de incentivos à investigação e desenvolvimento tecnológico / Projetos em Co-Promoção.

Site do fabricante ALTO Perfis Pultrudidos, Lda: <http://alto.pt/>.

Appleton, J. A. (2003). *Reabilitação de Edifícios Antigos: Patologias e tecnologias de intervenção*. Amadora: ORION.

Site da empresa AS COMPOSITE INC: <http://www.ascomposite.com/>, em 8/3/2016.

Ascione, L., Caron, J.-F., Godonou, P., van IJselmuiden, K., Knippers, J., Mottram, T., . . . Tromp, L. (2016a). *PROSPECT FOR NEW GUIDANCE IN THE DESIGN OF FRP: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*; EUR 27666 EN; doi:10.2788/22306.

Ascione, L., Caron, J.-F., Godonou, P., van IJselmuiden, K., Knippers, J., Mottram, T., . . . Tromp, L. (2016b). *PROSPECT FOR NEW GUIDANCE IN THE DESIGN OF FRP: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*; EUR 27666 EN; doi:10.2788/22306.

ASTM C273-00 "*Standard test method for shear properties of sandwich core materials*", ASTM International, West Conshohocken, 2000.

ASTM D 3039/D 3039M – 00 "*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*", ASTM International, West Conshohocken, 2000.

ASTM. (2004). ASTM C297/C297M - 04 "*Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions*", ASTM International, West Conshohocken, 2004.

ASTM. (2005). ASTM C365/C365M - 05 "*Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores*" ASTM International, West Conshohocken, 2005.

ASTM. (2007). ASTM D7264/D7264M – 07 "*Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*" ASTM International, West Conshohocken, 2007.

Astrom, B. T. (1997). *Manufacturing of polymer composites*. United Kingdom: Chapman & Hall.

- Bank, L. C. (2006). *Composites for construction: structural design with FRP materials*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Barbero, E. J. (2010). *Introduction to Composite Materials Design, Second Edition*. Boca Raton-London-New York: Taylor & Francis Group.
- Barbosa, P. N. B. (2014). *Comportamento em fluência de painéis sanduíche compósitos com núcleos de espumas de poliuretano rígido e polietileno tereftalato*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Barros, J. A. (2011). *Materiais de elevado desempenho na inovação estrutural*, Relatório científico 11-DEC/E-16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães-Azurém, Portugal.
- Site da empresa CCLAB: from <http://cclab.epfl.ch/page-13730-en.html>, em 9/3/2016.
- Chen, D., & El-Hacha, R. (2011). Hybrid FRP-concrete structural member: research and development in North America Advances. In: Ye L, Feng P, Yue Q, editors. *5th Int. Conference FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010)*, Beijing, China, September 27-29, (pp. 185-190). n.d: Springer & Tsinghua University Press.
- Chu, T., Ranson, W., & Sutton, M. (1985). Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental mechanics*, 25(3), 232-244.
- CNR-DT 205/2007. Guide for the Design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements. *Italian National Research Council, Rome, Italy*.
- Hexcel Composites. (2000). *Honeycomb sandwich design technology*, Catálogo da empresa Hexcel Composites. Publication No. AGU, Duxford.
- Site do blog "Fabricação de Compósitos": <http://fabricacaodecompositos.blogspot.pt/2012/06/paineis-sanduiche.html>, em 2/3/2016.
- Correia, J. R. (2004). *Perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP). Aplicação de vigas mistas GFRP-Betão na construção*. Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Correia, J. R. (2008). *GFRP pultruded profiles in civil engineering: hybrid solutions, bonded connections and fire behaviour*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Correia, J. R. (2013). THE NEW FRP MATERIALS FOR CIVIL ENGINEERING STRUCTURAL APPLICATIONS. In *57th Meeting of the European Council of Civil Engineers (ECCE) Ordem dos Engenheiros*, Lisboa, 31/05/2013.
- Site da empresa NetComposites Ltd (autor: Cripps, D.): <http://netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/vacuum-bagging/>, em 13/3/2016.

- Davalos, J. F., Qiao, P., Xu, X. F., Robinson, J., & Barth, K. E. (2001). Modeling and characterization of fiber-reinforced plastic honeycomb sandwich panels for highway bridge applications. *Composite structures*, 52(3), 441-452.
- Davies, J. M. (2001). *Lightweight sandwich construction*. Osney Mead, Oxford: Blackwell Science Ltd, 370.
- Dawood, M., Taylor, E., & Rizkalla, S. (2010). Two-way bending behavior of 3-D GFRP sandwich panels with through-thickness fiber insertions. *Composite structures*, 92(4), 950-963.
- de Castro, P. M., Moreira, P. M., Öchsner, A., Correia, J., Garrido, M., Gonilha, J., Reis, L. (2012). GFRP sandwich panels with PU foam and PP honeycomb cores for civil engineering structural applications: effects of introducing strengthening ribs. *International Journal of Structural Integrity*, 3(2), 127-147.
- de Freitas, S. T., Kolstein, H., & Bijlaard, F. (2010). Sandwich system for renovation of orthotropic steel bridge decks. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 13(3), 278-301.
- DIAB Guide to core and sandwich (2012). Descarregado do site da empresa DIAB Group: <http://www.diabgroup.com/>, em 4/3/2016.
- EN, N. (1992). 1-1 (2010) Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. *Instituto Português da Qualidade*, P36.
- Fam, A., & Sharaf, T. (2010). Flexural performance of sandwich panels comprising polyurethane core and GFRP skins and ribs of various configurations. *Composite structures*, 92(12), 2927-2935.
- Fangueiro, R. (2011). *Fibrous and composite materials for civil engineering applications*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.
- Fiberline Composites. (2003). Fiberline design manual. Descarregado do site da empresa Fiberlines Composites: <https://fiberline.com/>, em 5/3/2016.
- Site da empresa Fibrolux: <http://fibrolux.com/pt/>, em 15/3/2016.
- Flynn, S. K. (2013). Balsa wood at the core of the new bridge. *Composites Manufacturing*, 29(1), 18.
- Garrido *et al.* (2017). Technical Report in development by IST&UM. [em desenvolvimento].
- Garrido, M. A. d. J. (2016). *Composite sandwich panel floors for building rehabilitation*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Gurit. (2011). Site da empresa Gurit: <http://www.gurit.com/villa-roof-switzerland-2011.aspx>, em 18/3/2016.

- Gurit. (2012). Site da empresa Gurit: <http://www.gurit.com/makkah-clock-tower-2011.aspx>, em 18/3/2016.
- Gurit. (2013). Site da empresa Gurit: <http://www.gurit.com/haramain-high-speed-rail-2013.aspx>, em 18/3/2016.
- HONEYCOMBS, n. (2003). *Résistance en flexion*. Documento da empresa nidaplast. Disponível em [http://manardb.free.fr/Casa-trotter/Nidaplast/Resistance en flexion.pdf](http://manardb.free.fr/Casa-trotter/Nidaplast/Resistance%20en%20flexion.pdf).
- Site associado à Universidade de Gent - horizon: <http://www.horizon-ugent.be/solar-decathlon/>.
- INE, I. P., (2013). *O Parque habitacional e a sua reabilitação - análise e evolução 2001-2011*. Lisboa, Portugal: Instituto Nacional de Estatística (INE) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- ISO. (1993). ISO 527-1:1993. Plastics – Determination of tensile properties – Part 1: General principles. ISO, Geneva, Switzerland.
- ISO. (1997). ISO 527-4:1997. Plastics – Determination of tensile properties – Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites. ISO, Geneva, Switzerland.
- Johnson, C. M., Mohamed, T. S., & Rizkalla, S. H. (2006). Behavior of three-dimensionally woven glass fiber reinforced polymeric bridge deck. *COMPOSITES RESEARCH JOURNAL*, 1(2), 27-42.
- Jones, R. M. (1998). *Mechanics of composite materials*. Philadelphia: Taylor & Francis.
- Keller, T., De Castro, J., & Schollmayer, M. (2004). Adhesively bonded and translucent glass fiber reinforced polymer sandwich girders. *Journal of Composites for Construction*, 8(5), 461-470.
- Keller, T., Haas, C., & Vallée, T. (2008a). Structural concept, design, and experimental verification of a glass fiber-reinforced polymer sandwich roof structure. *Journal of Composites for Construction*, 12(4), 454-468.
- Keller, T., Schaumann, E., & Vallée, T. (2007). Flexural behavior of a hybrid FRP and lightweight concrete sandwich bridge deck. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(3), 879-889.
- Keller, T., Vallée, T., & Murcia, J. (2008b). Function-integrated GFRP sandwich roof structure—Experimental validation of design. *Paper presented at the Proceedings of the 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*, Zurich, Switzerland, CD-ROM.

- Lascoup, B., Aboura, Z., Khellil, K., & Benzeggagh, M. (2006). On the mechanical effect of stitch addition in sandwich panel. *Composites Science and Technology*, 66(10), 1385-1398.
- Lecture 5.4: *Hand Lay-up and Spray Lay-up*. Disponível em <http://nptel.ac.in/courses/112107085/module5/lecture4/lecture4.pdf>.
- Liu, Y., He, J., Fan, H., Chen, A., & Dai, L. (2011). Experimental study on flexural behaviour of hybrid GFRP/concrete bridge deck. *Paper presented at the Proceedings of the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010)*, Beijing, China, September 27-29. (pp. 197-201). n.d: Springer & Tsinghua University Press.
- Machado, J. (2015). *Estudo da ligação entre componentes estruturais de GFRP (glass fiber reinforced polymer) e componentes estruturais em betão*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães-Azurém, Portugal.
- Mastali, M., Barros, J. A., & Valente, I. (2014). Laje sandwich em polímero reforçado com fibra de vidro e argamassa de ultra elevada ductilidade para a reabilitação estrutural. *JPEE2014-5ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, 1-15.
- Mastali, M., Barros, J. A., Valente, I., & Gonçalves, D. (2015). Development of innovative hybrid sandwich panel slabs Part I: Experimental results. *Composite structures*, 133, 476-498.
- Mendes, P. J., Barros, J. A., Sena-Cruz, J. M., & Taheri, M. (2011). Development of a pedestrian bridge with GFRP profiles and fiber reinforced self-compacting concrete deck. *Composite structures*, 93(11), 2969-2982.
- Nasseh, J. (2014). Site: <http://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/Site/?p=994>, em 18/3/2016.
- Norton, T. M. (2004). *3D Orthogonal Woven Glass Fiber Reinforced Polymeric Bridge Deck: Fabrication and Experimental Investigation*. Thesis for the Degree of Master of Science, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, United States of America.
- Nunes, F. F. (2016). *Structural behaviour of FRP pultruded beams and columns*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Parys, T. V., & Tassignon, T. (2013). *Solar Decathlon China 2013: Construction And Engineering Process Of The Prefabricated Composite House 'Solatrium'*. Master Thesis, UNIVERSITEIT GENT, Bélgica. Disponível em: http://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/033/419/RUG01-02033419_2013_0001_AC.pdf.

- Pereira, E. B., Fischer, G., & Barros, J. A. (2012). Direct assessment of tensile stress-crack opening behavior of Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC). *Cement and concrete Research*, 42(6), 834-846.
- Peters, S. T. (1998). *Handbook of composites (2nd ed)*. London: Chapman & Hall.
- Potluri, P., Kusak, E., & Reddy, T. (2003). Novel stitch-bonded sandwich composite structures. *Composite structures*, 59(2), 251-259.
- Site da empresa PULTREX: <http://pultrex.com/guide-to-pultrusion-machines/>, em 18/3/2016.
- Reis, E. (2005). *Characteristics of innovative 3-D FRP sandwich panels*. PhD. thesis, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, United States of America.
- Reis, E. M., & Rizkalla, S. H. (2008). Material characteristics of 3-D FRP sandwich panels. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1009-1018.
- Russo, A., & Zuccarello, B. (2007). Experimental and numerical evaluation of the mechanical behaviour of GFRP sandwich panels. *Composite structures*, 81(4), 575-586.
- Sena-Cruz. (2005). *Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Sena-Cruz. (2013). USER MANUAL SECTION 4.0. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães-Azurém, Portugal.
- Sena-Cruz, J., Barros, J. A., Azevedo, Á. F., & Gouveia, A. V. (2007). Numerical simulation of the nonlinear behavior of RC beams strengthened with NSM CFRP strips. *IN CONGRESS ON NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING; IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING*, 28, Porto, 2007 – “Proceedings of CMNE/CILAMCE 2007” [S.l.]: APMTAC 2007.
- Sena-Cruz, J. M. (2015). REPAIRING AND STRENGTHENING TECHNIQUES. Apontamentos teóricos. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães-Azurém, Portugal.
- Shams, A., Horstmann, M., & Hegger, J. (2014). Experimental investigations on textile-reinforced concrete (TRC) sandwich sections. *Composite structures*, 118, 643-653.
- Sharaf, T., & Fam, A. (2008). Flexural load tests on sandwich wall panels with different rib configurations. *Paper presented at the Proceedings of the 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*, Zurich, Switzerland, CD-ROM.
- Shawkat, W., Honickman, H., & Fam, A. (2008). Investigation of a novel composite cladding wall panel in flexure. *Journal of composite materials*, 42(3), 315-330.
- Song, X. (2003). Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM): model development and verification. Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute

and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics. Blacksburg, Virginia, United States of America.

Sopal, G., Rizkalla, S., & Solomon, G. (2012). *Performance of new 3D GFRP sandwich panels with corrugated GFRP sheets. Paper presented at the Proceedings of the 11th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012)*, Rome, Italy.

Steeves, C. A., & Fleck, N. A. (2004). Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(4), 561-583.

Steve. (2016). Home Sweet Cube. Disponível em: <http://compositesandarchitecture.com/?p=4057>.

Site da empresa STRONGWELL: <http://www.strongwell.com/>, em 19/3/2016.

Thomsen, O. T., Bozhevolnaya, E., & Lyckegaard, A. (2006). Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials. *Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 29-31 August 2005*: Springer Science & Business Media.

Vilhena, A. (2013). Reabilitação habitacional e o setor da construção civil. *O Parque Habitacional e a sua Reabilitação: Retrato e Prospetiva, Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa*, Portugal.

Wang, L., Liu, W., Wan, L., Fang, H., & Hui, D. (2014). Mechanical performance of foam-filled lattice composite panels in four-point bending: Experimental investigation and analytical modeling. *Composites Part B: Engineering*, 67, 270-279.

Zenkert, D. (2005). An introduction to sandwich structures. *Student edition*: Emas Publishing, London.

Zi, G., Kim, B. M., Hwang, Y. K., & Lee, Y. H. (2008). The static behavior of a modular foam-filled GFRP bridge deck with a strong web-flange joint. *Composite structures*, 85(2), 155-163.

Zoghi, M. (2013). *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering*. Boca Raton-London-New York: Taylor & Francis Group.

Zollo, R. F. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, 19(2), 107-122.

Zureick, A., & Scott, D. (1997). Short-term behavior and design of fiber-reinforced polymeric slender members under axial compression. *Journal of Composites for Construction*, 1(4), 140-149.

ANEXO I - Ficha técnica do adesivo usada na colagem do PUR

Ficha de Produto
Versão 3 (02 / 2012)

SikaForce® -7710 L100

Adesivo para painéis de sandwich de uso geral

Dados técnicos do produto

Propriedades	Componente A SikaForce® -7710 L100	Componente B SikaForce® -7010
Base química	Poliol, com cargas	Derivados de isocianatos
Cor (CQP ¹⁾ 001-1)	Bege	Castanho
Cor - mistura	Bege	
Mecanismo de cura	Poli Adição	
Densidade (CQP 006-5)	1,6 g/cm ³ aprox.	1,2 g/cm ³ aprox.
Densidade mistura (calculado)	1,5 g/cm ³ aprox.	
Rácio de mistura	em volume 100	25
	em peso 100	19
Conteúdo de sólidos	100 %	100 %
Viscosidade ²⁾ (CQP 538-2)	30 000 mPas aprox. (Brookfield RVT 8/20)	250 mPas aprox. (Brookfield RVT 2/50)
Viscosidade mistura	10 000 mPas aprox. (Brookfield RVT 8/20)	
Tempo mistura ²⁾ (CQP 536-3)	100 min. aprox.	
Temperatura de aplicação	15 a 30°C	
Tempo de abertura ²⁾ (CQP 590-1)	100 min aprox. (ver diagrama 1)	
Tempo prensagem ²⁾ (CQP 590-1)	230 min aprox. (ver diagrama 1)	
Dureza Shore D ²⁾ (CQP 537-2)	80 D aprox.	
Resistência à tração ²⁾ (CQP 545-2 / ISO 527)	13 N/mm ² aprox.	
Alongamento à ruptura ²⁾ (CQP 545-2 / ISO 527)	8 % aprox.	
Resistência ao arrancamento (CQP 546-2 / ISO 4587)	9 N/mm ² aprox.	
Tempo de armazenagem em contentores de 1.000 litros	6 meses	9 meses
Tempo de armazenagem em pequenas embalagens	12 meses	9 meses

¹⁾CQP = Procedimento Qualidade SIKA

²⁾+23°C e 50% H.R.

³⁾Condições de cura de acordo com CQP 542-2

Descrição

O SikaForce®-7710 L100 é usado em conjunto com o SikaForce®-7010 formando um adesivo base poliuretano bi-componente.

O SikaForce®-7710 L100 é produzido de acordo com as normas de qualidade ISO 9001/14001 e com o programa de actuação responsável.

Vantagens

- Cura à temperatura ambiente
- Isento de solventes
- Tempo de abertura longo conjugado com tempo de prensagem curto

Campos de Aplicação

Colagem de metais, madeira, fibra de vidro e fibrocimento a espuma de poliuretano ou poliestireno e lâ de rocha no fabrico de painéis sanduiche ou de outro tipo de tipologias.

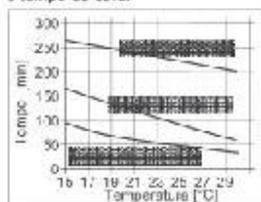
Este produto é para uso apenas por profissionais experientes. Devem ser efectuados testes de aderência com os substratos e condições reais para assegurar compatibilidade.



SikaForce® -7710 L100 1 / 2

Mecanismo de cura

A cura do SikaForce®-7710 L100 desenvolve-se por reacção química dos dois componentes. Temperaturas superiores aceleram a reacção assim como temperaturas inferiores aumentam o tempo de cura.



Depende! Tempo de cura e tempo de aplicação com SikaForce®-7710 L100.

Resistência química

No caso de exposição a agentes químicos ou benzeno, aconselhamos a realização de testes.

Por favor contacte os nossos serviços técnicos para aconselhamento.

Método de Aplicação

Preparação da superfície

É normalmente necessário preparar as superfícies a colar de forma a assegurar aderência e resistência mecânica adequada. Assegurar que os substratos estão limpos e secos.

Depois do processo de limpeza, um pré-tratamento físico ou químico poderá ser necessário, dependendo da superfície e tipo de material. O tipo de pré-tratamento necessário só pode ser determinado através de ensaio. Por favor contacte os nossos serviços técnicos para aconselhamento em aplicações específicas.

Aplicação

Estimam-se consumos entre 150 e 350 g/m², dependendo dos substratos a colar. O rendimento para uma determinada combinação de substratos deve ser determinado a partir de testes efectuados.

Aplicação Manual

Agitar o componentes A e B cuidadosamente antes de usar, e misturá-los constantemente até formar uma mistura homogénea. Aplicar com um rolo antes de expirar o tempo da aplicação da mistura e pressionar os substratos antes do fim do open-time. Por favor contacte os nossos serviços técnicos para aconselhamento.

Aplicação automatizada

Contactar os nossos serviços técnicos para aconselhamento.

Fresagem

Deve ser aplicada uma pressão adequada para obter resultados satisfatórios. A pressão específica depende do material do núcleo e deve ser aferida em testes. A força de prensagem deve ser sempre inferior à resistência à compressão do núcleo. Os elementos a colar não devem ser movidos durante o processo de prensagem.

Remoção

O SikaForce®-7710 L100 não curado, pode ser removido das ferramentas e equipamentos com SikaForce®-7200 Cleaner. Uma vez curado o material apenas pode ser retirado mecanicamente. Em caso de contacto com as mãos, lavar de imediato com os toalhetes Sika® Top Clean e água. Não usar solventes.

Condições de armazenamento

Deve ser mantido entre +10°C e +30°C num lugar seco. Não expor à luz directa ou directa. Após abertura da embalagem o conteúdo deve ser protegido da humidade atmosférica. A temperatura mínima durante o transporte é de -20°C no máximo de 7 dias.

Outras informações

Cópias das seguintes publicações estão disponíveis quando pedidas:
- Ficha de Segurança

Valores base

Todos os valores apresentados nesta ficha de produto são baseados em testes de laboratório.

Valores obtidos podem variar devido a circunstâncias fora do nosso controle.

Informação Higiene e Segurança

Para informações e aconselhamento sobre segurança no manuseamento, armazenamento e disposição dos produtos químicos, os utilizadores devem ter em conta as folhas de segurança que contêm dados relativos a segurança, físicos, ecológicos, toxicológicos e outros.

Informação Legal

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças na natureza dos materiais das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia e responsabilidade como talizagem ou aplicação para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e aos pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas feitas estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específicos do produto e que diz respeito, que são entregues sempre que pedido.



Informação adicional disponível em:
www.sika.pt
www.sika.com

Sika Portugal SA
Divisão Indústria
Rua Sarmateu, 112
4605-782 V.N. Gaia
Portugal
Tel. +351 22 377 69 00
Fax +351 22 377 69 77



SikaForce®-7710_109_2/2

ANEXO II - Caracterização geométrica dos provetes de PUR ensaios ao corte

Tabela II.1 - Designação genérica e caracterização geométrica dos provetes ensaiados ao corte do Grupo I e II (t-espessura do provete, b-largura do provete, L-comprimento do provete).

Grupo	Série	t [mm]	b [mm]	L [mm]	Massa [g]	L/t -		
Grupo 1	PUR_ST_30_360_01	30,12	121,45	360,67	88,00	12		
	PUR_ST_30_360_02	30,44	120,50	360,67	87,67			
	PUR_ST_30_360_03	29,89	119,50	360,33	86,00			
	PUR_ST_30_360_04	29,78	119,14	360,50	87,00			
	PUR_ST_30_360_05	29,94	119,74	359,33	88,67			
	PUR_ST_30_360_06	29,89	119,68	360,67	86,00			
	Média	30,01	120,00	360,36	87,22			
	Desvio Padrão	0,22	0,77	0,48	0,99			
	Cov [%]	0,72	0,64	0,13	1,14			
	Grupo 1	PUR_ST_30_180_01	29,36	119,99	180,33		43,17	6
PUR_ST_30_180_02		30,12	119,92	180,33	43,00			
PUR_ST_30_180_03		30,16	118,32	180,33	43,00			
Média		29,88	119,41	180,33	43,06			
Desvio Padrão		0,37	0,77	0,00	0,08			
Cov [%]		0,01	0,01	0,00	0,00			
Grupo 1		PUR_ST_30_120_01	29,90	119,72	120,30	28,00	4	
		PUR_ST_30_120_02	29,63	119,96	119,64	28,00		
		PUR_ST_30_120_03	29,63	119,96	119,64	28,00		
		Média	29,72	119,88	119,86	28,00		
	Desvio Padrão	0,13	0,11	0,31	0,00			
	Cov [%]	0,00	0,00	0,00	0,00			
Grupo 1	PUR_ST_30_60_01	29,84	120,43	60,93	14,33	2		
	PUR_ST_30_60_02	29,94	119,52	60,39	14,67			
	PUR_ST_30_60_03	27,86	119,29	60,68	14,00			
	Média	29,21	119,75	60,67	14,33			
	Desvio Padrão	0,96	0,50	0,22	0,27			
	Cov [%]	3,27	0,41	0,36	1,90			

Tabela II.1 (cont.) - Designação genérica e caracterização geométrica dos provetes ensaiados ao corte do Grupo I e II (t-espessura do provete, b-largura do provete, L-comprimento do provete).

Grupo	Série	T [mm]	b [mm]	L [mm]	Massa [g]	L/t -	
Grupo II	PUR_ST_60_360_01	61,83	120,08	359,67	177,33	6	
	PUR_ST_60_360_02	61,43	120,74	359,67	179,00		
	PUR_ST_60_360_03	61,33	118,62	360,50	175,00		
	PUR_ST_60_360_04	61,45	118,00	360,67	180,33		
	PUR_ST_60_360_05	61,43	119,74	359,33	179,00		
	Média	61,49	119,44	359,97	178,13		
	Desvio Padrão	0,17	0,99	0,52	1,83		
	Cov [%]	0,28	0,83	0,14	1,03		
	PUR_ST_60_240_01	61,60	121,37	239,67	118,00		4
	PUR_ST_60_240_02	61,61	120,44	240,00	119,33		
Média	61,61	120,90	239,83	118,67			
Desvio Padrão	0,00	0,47	0,17	0,67			
Cov [%]	0,00	0,38	0,07	0,56			
PUR_ST_60_120_01	61,05	120,62	119,38	59,67	2		
PUR_ST_60_120_02	60,34	119,94	120,15	59,00			
Média	60,69	120,28	119,77	59,33			
Desvio Padrão	0,36	0,34	0,39	0,33			
Cov [%]	0,59	0,28	0,32	0,56			

ANEXO III - Resultados dos ensaios de corte do PUR

Tabela III.1 - Parâmetros obtidos para todos os provetes que compõem os Grupos I e II.

Grupo	Série	Densidade	$F_{max, 2\%}$	$\tau_{max, 2\%}$	$\gamma_{ult, 2\%}$	$F_{max,ap}$	$\tau_{max,ap}$	$\gamma_{max,ap}$	G	MR
		[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[mm/mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
Grupo I (t=30)	PUR_ST_30_360_01	66.69	10.73	0.25	0.07	13.06	0.30	0.26	5.41	I
	PUR_ST_30_360_02	66.28	10.62	0.25	0.07	13.60	0.32	0.24	5.19	S
	PUR_ST_30_360_03	66.81	11.34	0.26	0.07	13.49	0.31	0.26	5.66	S
	PUR_ST_30_360_04	68.01	11.31	0.26	0.07	14.20	0.33	0.29	5.59	S
	PUR_ST_30_360_05	68.83	12.19	0.29	0.07	14.69	0.34	0.20	5.74	I
	PUR_ST_30_360_06	66.67	11.37	0.26	0.07	13.83	0.32	0.29	5.67	S
	Média	67.21	11.26	0.26	0.07	13.81	0.32	0.26	5.55	
	Desvio Padrão	0.90	0.51	0.01	0.00	0.52	0.01	0.03	0.19	
	CoV [%]	1.34	4.57	4.69	1.52	3.77	3.88	11.49	3.42	
	PUR_ST_30_180_01	n.d	5.32	0.25	0.07	6.12	0.29	0.21	5.14	I
PUR_ST_30_180_02	66.01	5.01	0.23	0.07	5.87	0.27	0.21	5.16	I	
PUR_ST_30_180_03	66.83	5.16	0.24	0.07	5.75	0.27	0.21	5.31	I	
Média	66.42	5.16	0.24	0.07	5.91	0.28	0.21	5.20		
Desvio Padrão	0.41	0.13	0.01	0.00	0.16	0.01	0.00	0.08		
CoV [%]	0.62	2.47	2.48	2.01	2.64	2.44	0.80	1.48		

Notas: (1) MR – modos de rotura: I = rotura pela interface adesivo/PUR; S = rotura por corte do poliuretano.

Tabela III.1 (cont.) - Parâmetros obtidos para todos os provetes que compõem os Grupos I e II.

Grupo	Série	Densidade [kg/m ³]	F _{max, 2%} [kN]	τ _{max, 2%} [MPa]	γ _{ult, 2%} [mm/mm]	F _{max,ap} [kN]	τ _{max,ap} [MPa]	γ _{max,ap} [MPa]	G [MPa]	MR
Grupo 1 (t=30)	PUR_ST_30_120_01	65.84	3.44	0.24	0.07	3.78	0.26	0.18	4.91	I
	PUR_ST_30_120_02	65.84	3.58	0.25	0.07	3.87	0.27	0.17	5.41	I
	PUR_ST_30_120_03	65.84	3.51	0.25	0.07	3.77	0.26	0.15	5.14	I
	Média	65.84	3.51	0.25	0.07	3.81	0.27	0.17	5.15	
	Desvio Padrão	0.00	0.06	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.20	
	CoV [%]	0.00	1.64	1.86	1.14	1.18	1.30	6.54	3.96	
	PUR_ST_30_60_01	65.47	1.49	0.21	0.06	1.52	0.21	0.12	4.48	I
	PUR_ST_30_60_02	67.87	1.50	0.21	0.06	1.61	0.22	0.12	4.85	I
	PUR_ST_30_60_03	69.42	1.63	0.23	0.06	1.68	0.23	0.11	5.20	I
	Média	67.58	1.54	0.21	0.06	1.60	0.22	0.12	4.84	
Desvio Padrão	1.63	0.07	0.01	0.00	0.07	0.01	0.00	0.30		
CoV [%]	2.41	4.25	4.27	3.27	4.09	4.28	3.03	6.09		

Notas: MR – modos de rotura: I = rotura pela interface adesivo/PUR; S = rotura por corte do poliuretano.

Tabela III.1 (cont.) - Parâmetros obtidos para todos os provetes que compõem os Grupos I e II.

Grupo	Série	Densidade [kg/m ³]	F _{max, 2%} [kN]	τ _{max, 2%} [MPa]	γ _{ult, 2%} [mm/mm]	F _{max,ap} [kN]	τ _{max,ap} [MPa]	γ _{max,ap} [MPa]	G [MPa]	MR
	PUR_ST_60_360_01	66.41	10.17	0.24	0.07	10.95	0.26	0.13	5.20	I
	PUR_ST_60_360_02	67.10	9.36	0.22	0.06	9.41	0.22	0.09	5.09	I
	PUR_ST_60_360_03	66.72	9.72	0.23	0.06	10.01	0.23	0.11	5.15	I
	PUR_ST_60_360_04	68.95	10.45	0.25	0.06	11.33	0.27	0.13	5.54	I
	PUR_ST_60_360_05	68.83	7.87	0.18	0.08	9.85	0.23	0.25	3.07	I
	Média	67.60	9.93	0.23	0.06	10.42	0.24	0.11	5.24	
	Desvio Padrão	0.99	0.42	0.01	0.00	0.76	0.02	0.01	0.17	
	CoV [%]	1.46	4.20	4.37	1.56	7.30	7.46	13.00	3.31	
Grupo II (t=60)	PUR_ST_60_240_01	65.85	6.32	0.22	0.06	6.43	0.23	0.09	4.96	I
	PUR_ST_60_240_02	67.01	6.40	0.22	0.06	6.46	0.23	0.08	5.18	I
	Média	66.43	6.36	0.22	0.06	6.45	0.23	0.08	5.07	
	Desvio Padrão	0.58	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.11	
	CoV [%]	0.87	0.61	0.54	1.28	0.24	0.17	10.00	2.27	
	PUR_ST_60_120_01	67.87	-	-	-	2.39	0.17	0.04	4.93	I
PUR_ST_60_120_02	67.86	-	-	-	2.23	0.16	0.03	4.87	I	
	Média	67.86	-	-	-	2.31	0.16	0.03	4.90	
	Desvio Padrão	0.01	-	-	-	0.08	0.01	0.00	0.03	
	CoV [%]	0.01	-	-	-	3.45	3.77	6.52	0.60	

Notas: MR – modos de rotura: I = rotura pela interface adesivo/PUR; S = rotura por corte do poliuretano.

ANEXO IV - Modos de rotura dos provetes de PUR ensaios ao corte

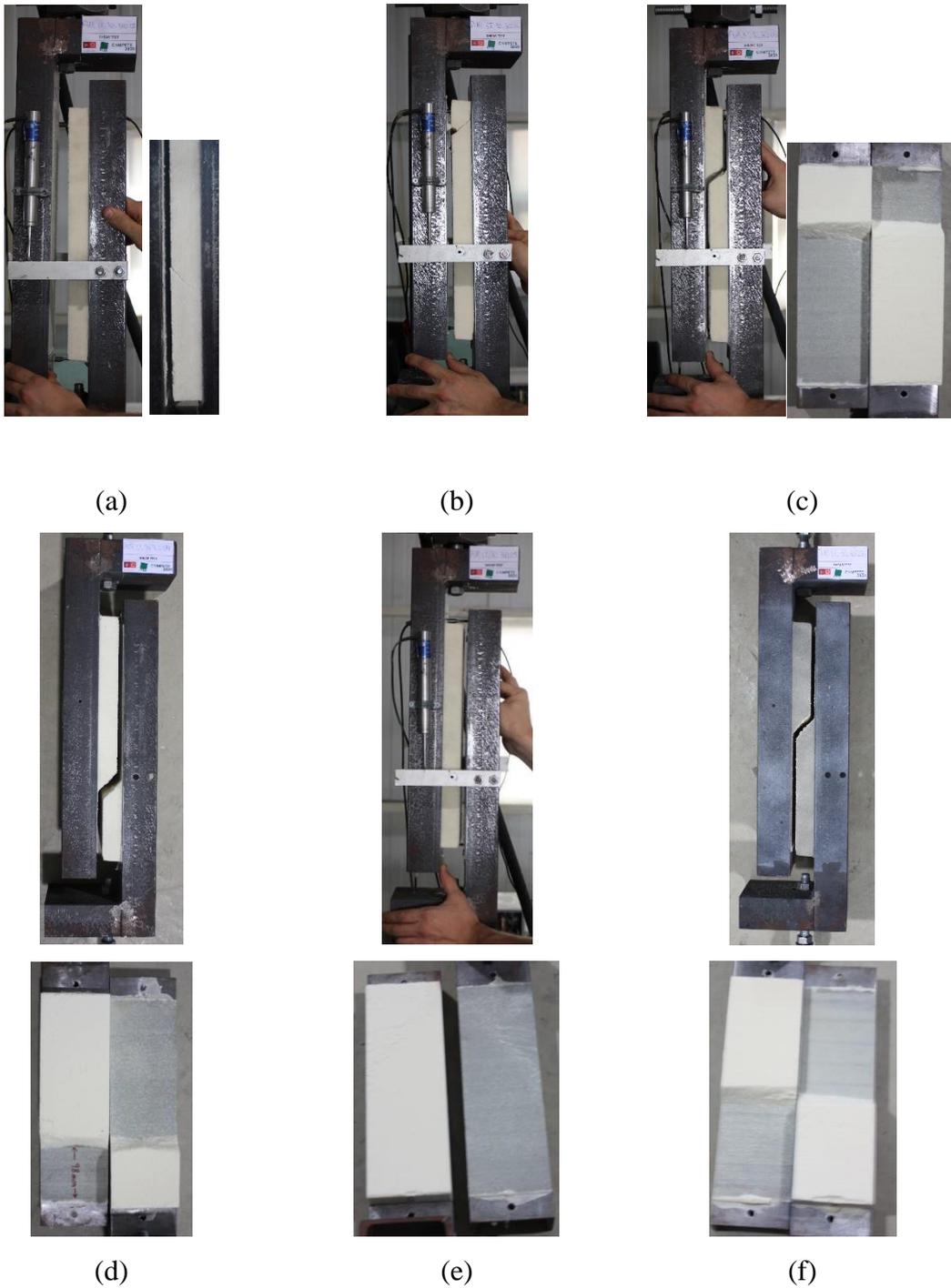


Figura IV.1 - Modos de rotura dos PUR_ST_30_360 (Grupo I): (a) PUR_ST_30_360_01; (b) PUR_ST_30_360_02 (à direita: vista posterior); (c) PUR_ST_30_360_03; (d) PUR_ST_30_360_04; (e) PUR_ST_30_360_05 e (f) PUR_ST_30_360_06.

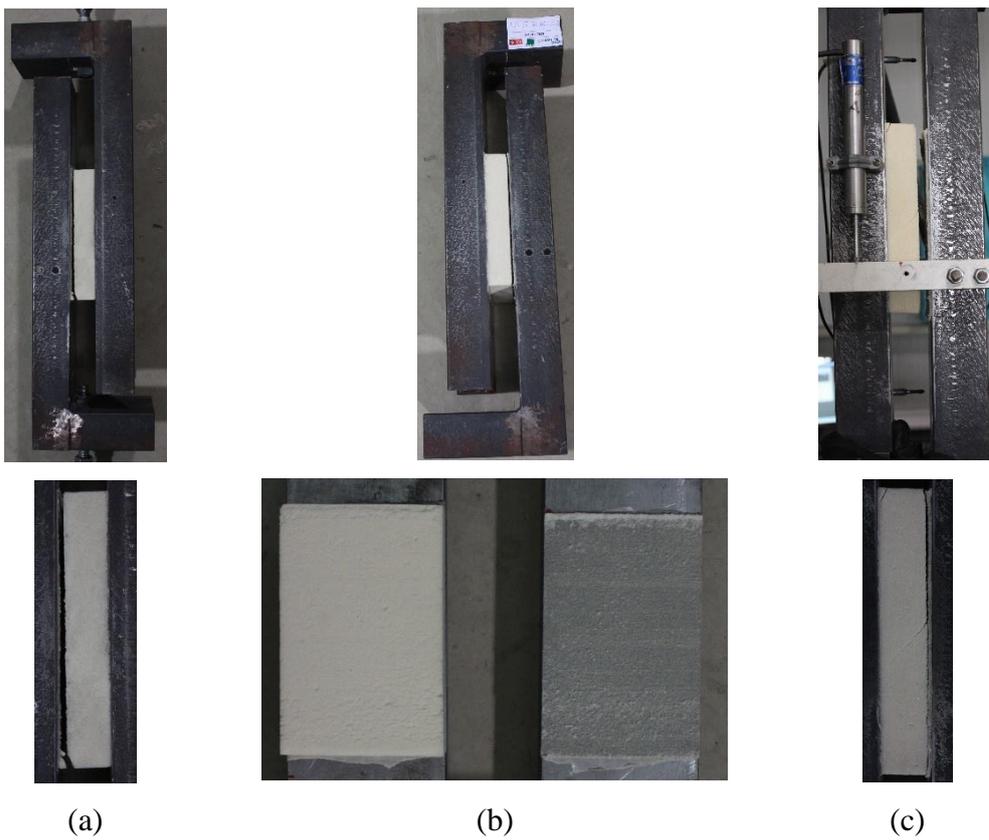


Figura IV.1 (cont.) - Modos de rotura dos PUR_ST_30_180 (Grupo I): (a) PUR_ST_30_180_01 (vistas posteriores); (b) PUR_ST_30_180_02 e (c) PUR_ST_30_180_03.

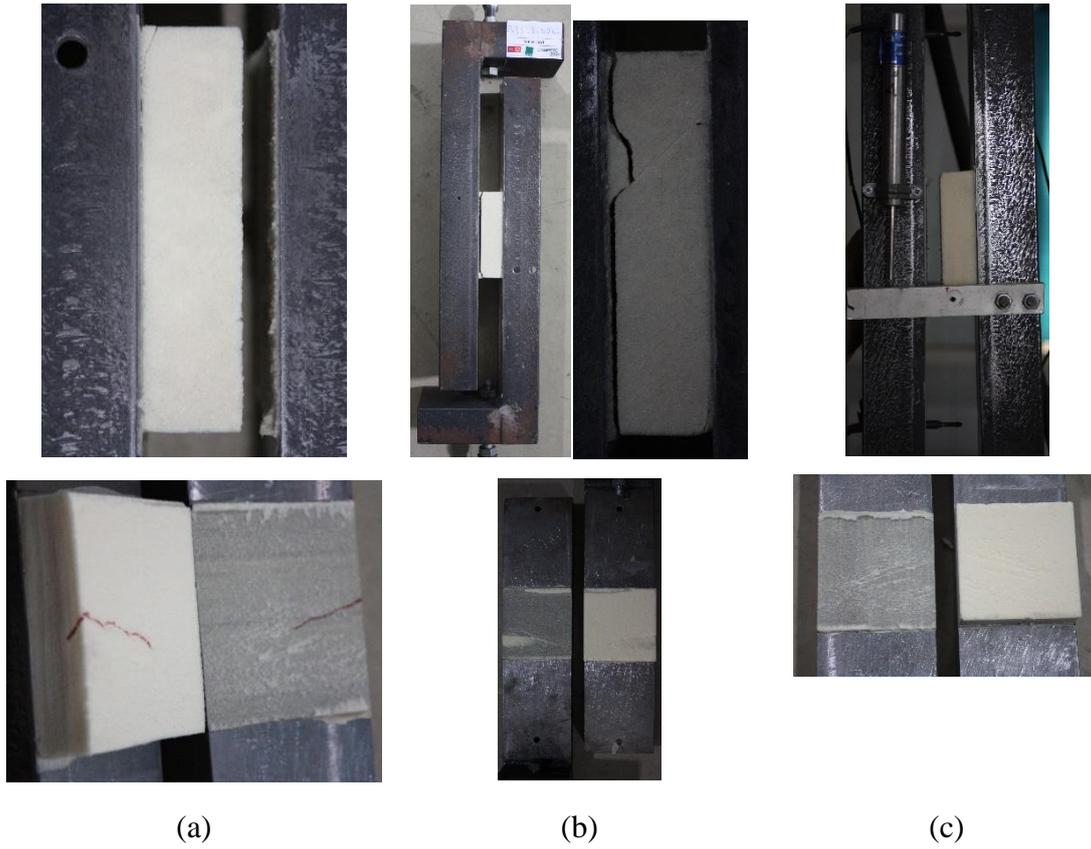


Figura IV.1 (cont.) - Modos de rotura dos PUR_ST_30_120 (Grupo I): (a) PUR_ST_30_120_01; (b) PUR_ST_30_120_02 (em cima à direita: vista posterior) e (c) PUR_ST_30_120_03.

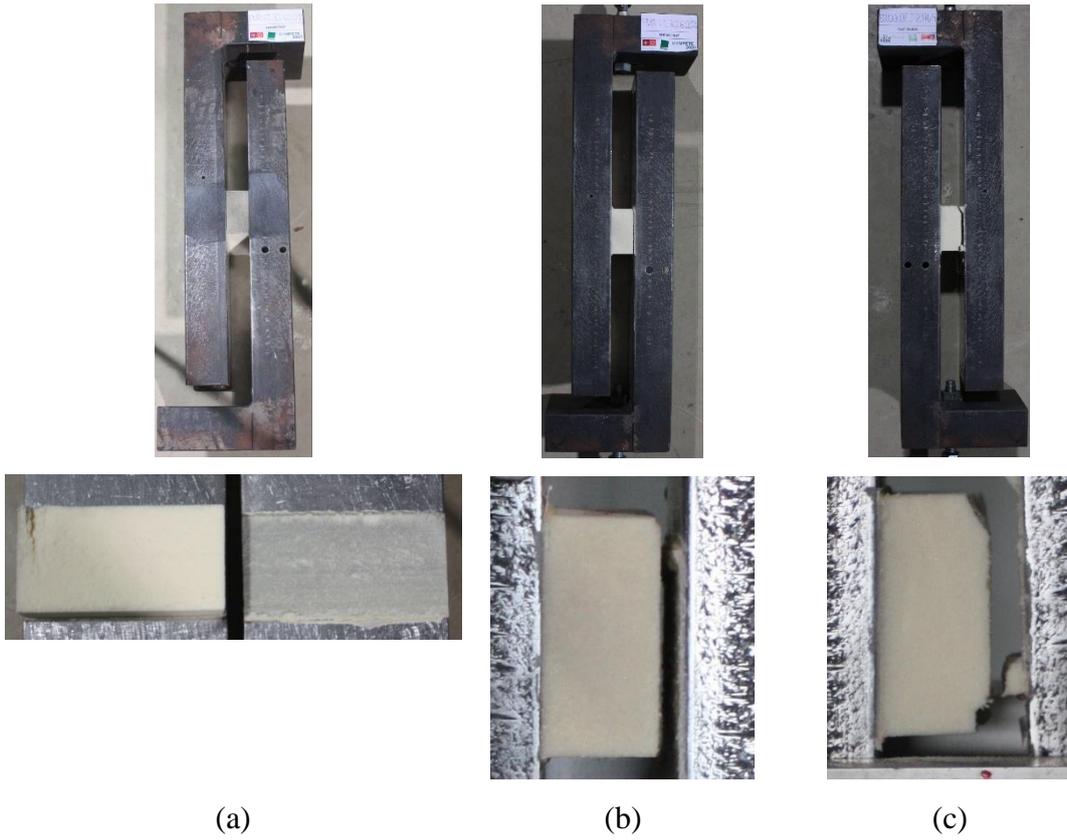


Figura IV.1 (cont.) - Modos de rotura dos PUR_ST_30_60 (Grupo I): (a) PUR_ST_30_60_01; (b) PUR_ST_30_60_02 e (c) PUR_ST_30_60_03.

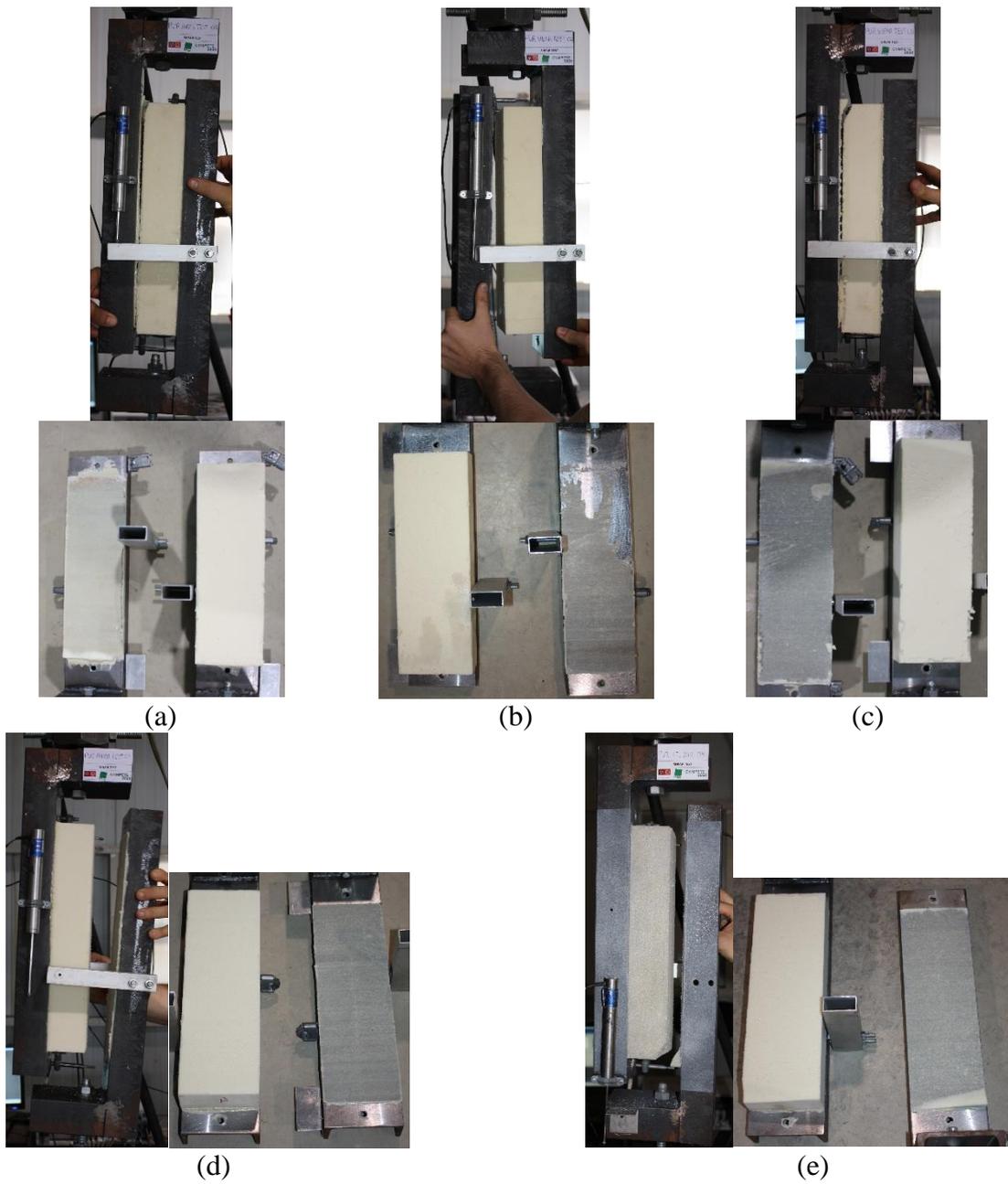
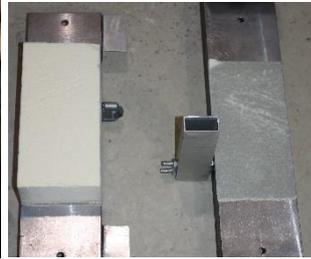
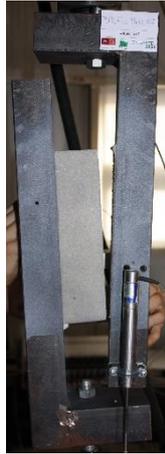


Figura IV.1 (cont.) - Modos de rotura dos PUR_ST_60_360 (Grupo II): (a) PUR_ST_60_360_01; (b) PUR_ST_60_360_02; (c) PUR_ST_60_360_03; (d) PUR_ST_60_360_04 e (e) PUR_ST_60_360_05.

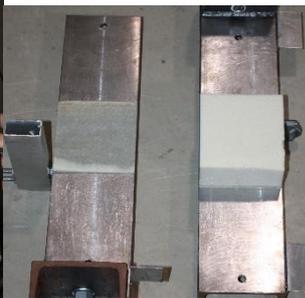


(a)



(b)

Figura IV.1 (cont.) - Modos de rotura dos PUR_ST_60_240 (Grupo II): (a) PUR_ST_60_240_01 e (b) PUR_ST_60_240_02.



(a)



(b)

Figura IV.1 (cont.) - Modos de rotura dos PUR_ST_60_120 (Grupo II): (a) PUR_ST_60_120_01 e (b) PUR_ST_60_120_02.

ANEXO V - Caracterização geométrica dos provetes ensaiados à flexão

Tabela V.1 - Características gerais dos provetes extraídos para a realização dos ensaios de flexão, incluindo as dimensões e a respetiva densidade (L_c - comprimento; b - largura; e - espessura).

Séries	Provete	b [mm]	e [mm]	L_c [mm]	Densidade [kg/m ³]
Série 1 (viga 1)	V1_B_GFRP_0°_01	24.81	9.96	247.33	2005.48
	V1_B_GFRP_0°_02	26.65	9.92	249.67	1950.63
	V1_B_GFRP_0°_03	26.01	9.98	248.33	1997.19
	V1_B_GFRP_0°_04	25.82	9.96	246.33	1957.71
	Média	25.82	9.95	247.92	1977.76
	Desvio Padrão	0.66	0.02	1.23	23.89
	Cov [%]	2.55	0.22	0.50	1.21
Série 2 (viga 2)	V2_B_GFRP_0°_01	25.93	9.91	246.33	1881.88
	V2_B_GFRP_0°_02	25.49	9.85	247.67	1995.47
	V2_B_GFRP_0°_03	25.66	9.98	250.00	1941.34
	V2_B_GFRP_0°_04	25.43	9.89	248.00	1964.20
	Média	25.63	9.91	248.00	1945.73
	Desvio Padrão	0.19	0.05	1.31	41.57
	Cov [%]	0.75	0.47	0.53	2.14
Série 3 (viga 3)	V2_B_G/GFRP_0°_01	15.20	10.21	249.67	1928.19
	V2_B_G/GFRP_0°_02	15.25	10.00	250.00	1996.68
	V2_B_G/GFRP_0°_03	15.08	9.97	250.00	1997.90
	V2_B_G/GFRP_0°_01	15.21	9.99	250.00	2011.04
	Média	15.19	10.04	249.92	1983.45
	Desvio Padrão	0.06	0.10	0.14	32.40
	Cov [%]	0.41	0.96	0.06	1.63

ANEXO VI - Caracterização geométrica dos provetes ensaiados à tração

Tabela VI.1 – Designação genérica e caracterização geométrica dos provetes das Séries 1 e 2, (L_c - comprimento; b - largura; e - espessura).

Séries	Provete	b [mm]	e [mm]	L_c [mm]
Série 1 (viga 1)	V1_B_GFRP_0°_01	24.91	9.96	249.00
	V1_B_GFRP_0°_02	24.93	9.99	249.33
	V1_B_GFRP_0°_03	24.88	9.96	249.00
	Média	24.91	9.97	249.11
	Desvio Padrão	0.02	0.01	0.16
	Cov [%]	0.08	0.15	0.06
	V1_A_GFRP_0°_01	25.16	9.86	250.00
	V1_A_GFRP_0°_02	25.33	9.86	250.00
	V1_A_GFRP_0°_03	25.18	9.88	250.00
	Média	25.22	9.87	250.00
	Desvio Padrão	0.08	0.01	0.00
	Cov [%]	0.31	0.07	0.00
	V1_A_GFRP_15°_01	23.78	9.94	250.67
	V1_A_GFRP_15°_02	24.26	9.91	251.33
	V1_A_GFRP_15°_03	23.76	9.88	251.00
	Média	23.93	9.91	251.00
	Desvio Padrão	0.23	0.02	0.27
	Cov [%]	0.96	0.25	0.11
	V1_A_GFRP_30°_01	23.42	9.92	250.00
	V1_A_GFRP_30°_02	24.50	9.92	248.42
	V1_A_GFRP_30°_03	24.66	9.92	250.00
Média	24.19	9.92	249.47	
Desvio Padrão	0.55	0.00	0.75	
Cov [%]	2.27	0.00	0.30	

Tabela VI.1 (cont.) – Designação genérica e caracterização geométrica dos provetes das Séries 1 e 2,
(L_c - comprimento; b - largura; e - espessura).

Séries	Provete	b [mm]	h [mm]	L [mm]
Série 2 (viga 2)	V2_B_GFRP_0°_01	25.65	9.93	250.00
	V2_B_GFRP_0°_02	25.92	9.86	248.67
	V2_B_GFRP_0°_03	25.46	9.96	250.00
	Média	25.68	9.91	249.56
	Desvio Padrão	0.19	0.04	0.63
	Cov [%]	0.75	0.42	0.25
	V2_A_GFRP_0°_01	24.74	10.08	250.00
	V2_A_GFRP_0°_02	25.79	9.96	250.00
	V2_A_GFRP_0°_03	25.25	9.97	250.00
	Média	25.26	10.00	250.00
	Desvio Padrão	0.43	0.05	0.00
	Cov [%]	1.70	0.53	0.00
	V2_A_GFRP_15°_01	24.65	9.98	250.00
	V2_A_GFRP_15°_02	23.11	9.97	250.00
	V2_A_GFRP_15°_03	23.07	9.97	249.00
	Média	23.61	9.97	249.67
	Desvio Padrão	0.73	0.00	0.47
	Cov [%]	3.11	0.05	0.19
	V2_A_GFRP_30°_01	23.17	9.97	250.00
	V2_A_GFRP_30°_02	24.12	9.95	249.00
	V2_A_GFRP_30°_03	24.03	9.98	248.00
Média	23.77	9.97	249.00	
Desvio Padrão	0.43	0.01	0.82	
Cov [%]	1.79	0.13	0.33	

ANEXO VII - Resultados dos ensaios de tração

Tabela VII.1 - Parâmetros obtidos para todos os provetes que compõem as Séries 1 e 2 à tração direta.

Séries	Provete	Densidade [kg/m ³]	P _{max} [kN]	σ _{fmax,x} [MPa]	ε _{fmax,x} [×10 ⁻³]	E _{f,x} [GPa]	MR [-]
	V1_B_GFRP_0°_01	2013.26	96.58	389.10	15.48	34.47	MMV
	V1_B_GFRP_0°_02	2009.10	87.90	352.87	10.04	35.23	MMV
	V1_B_GFRP_0°_03	2011.99	87.12	351.60	10.64	34.30	MMV
	Média	2011.45	90.53	364.52	12.05	34.67	
	Desvio Padrão	1.74	4.29	17.39	2.44	0.40	
	Cov [%]	0.09	4.74	4.77	20.23	1.17	
	V1_A_GFRP_0°_01	2026.91	85.66	345.22	10.81	32.83	MMV
	V1_A_GFRP_0°_02	2000.69	90.50	362.37	10.77	33.56	MMV
	V1_A_GFRP_0°_03	2026.05	96.34	387.44	11.59	34.75	MMV
	Média	2017.88	90.83	365.01	11.06	33.72	
	Desvio Padrão	12.16	4.37	17.34	0.38	0.79	
Série 1	Cov [%]	0.60	4.81	4.75	3.39	2.35	
(viga 1)	V1_B_GFRP_15°_01	1969.36	19.69	83.32	5.28	18.70	AGM
	V1_B_GFRP_15°_02	2017.68	18.49	76.96	4.76	18.01	AGM
	V1_B_GFRP_15°_03	2025.91	17.72	75.53	4.49	23.96	AGM
	Média	2004.31	18.63	78.60	4.84	20.22	
	Desvio Padrão	24.95	0.81	3.39	0.33	2.66	
	Cov [%]	1.24	4.35	4.31	6.79	13.14	
	V1_B_GFRP_30°_01	2026.34	9.87	42.46	5.03	8.92	AGM
	V1_B_GFRP_30°_02	1966.54	10.52	43.27	5.88	9.05	AGM
	V1_B_GFRP_30°_03	2021.04	10.21	41.75	5.68	8.67	AGM
	Média	2004.64	10.20	42.49	5.53	8.88	
	Desvio Padrão	27.03	0.27	0.62	0.37	0.16	
	Cov [%]	1.35	2.61	1.47	6.61	1.77	

Nota: A terminologia adotada para os modos de rotura é a que se encontra na norma ASTM D 3039/D 3039M-00.

Tabela VII.1 (cont.) - Parâmetros obtidos para todos os provetes que compõem as Séries 1 e 2 à tração direta.

Viga	Provete	Densidade [kg/m ³]	P_{max} [kN]	σ_{fmax,x} [MPa]	ε_{fmax,x} [×10 ⁻³]	E_{t,x} [GPa]	MR [-]
	V2_B_GFRP_0°_01	1869.20	98.94	388.57	11.30	36.16	MMV
	V2_B_GFRP_0°_02	1882.74	105.96	414.67	15.06	36.11	MMV
	V2_B_GFRP_0°_03	1971.25	104.91	413.91	10.21	39.91	MMV
	Média	1907.73	103.27	405.71	12.19	37.39	
	Desvio Padrão	45.26	3.09	12.13	2.07	1.78	
	Cov [%]	2.37	2.99	2.99	17.02	4.77	
	V2_A_GFRP_0°_01	1908.04	98.50	395.08	10.19	37.59	MMV
	V2_A_GFRP_0°_02	1896.29	104.21	405.62	11.87	34.68	MMV
	V2_A_GFRP_0°_03	1913.33	99.04	393.54	11.12	36.07	MMV
	Média	1905.89	100.58	398.08	11.06	36.11	
	Desvio Padrão	7.12	2.57	5.37	0.69	1.19	
	Cov [%]	0.37	2.56	1.35	6.21	3.29	
Série 2 (viga 2)	V2_B_GFRP_15°_01	1921.13	28.70	116.69	5.07	25.01	AGM
	V2_B_GFRP_15°_02	1904.69	23.52	102.06	4.72	22.01	AGM
	V2_B_GFRP_15°_03	1905.28	27.66	120.27	5.81	22.36	AAT
	Média	1910.37	26.63	113.01	5.20	23.13	
	Desvio Padrão	7.61	2.24	7.88	0.45	1.34	
	Cov [%]	0.40	8.42	6.97	8.75	5.79	
	V2_B_GFRP_30°_01	1910.27	9.87	42.68	5.03	8.97	AAT
	V2_B_GFRP_30°_02	1916.95	10.52	43.81	5.88	9.16	AAT
	V2_B_GFRP_30°_03	1894.85	14.03	58.47	5.41	11.22	AGM
	Média	1907.36	11.47	48.32	5.44	9.78	
	Desvio Padrão	9.25	1.83	7.19	0.35	1.02	
	Cov [%]	0.49	15.94	14.88	6.43	10.40	

Nota: A terminologia adotada para os modos de rotura é a que se encontra na norma ASTM D 3039/D 3039M-00.