



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

André Manuel Correia Oliveira

Caracterização de painéis sanduíche  
híbridos para a reabilitação de pisos de  
edifícios

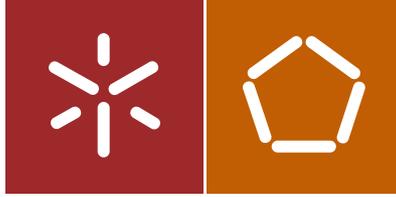
Caracterização de painéis sanduíche  
híbridos para a reabilitação de pisos de edifícios

André Manuel Correia Oliveira

UMinho | 2018

abril de 2018





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

André Manuel Correia Oliveira

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 efectuado sob a orientação de  
Professor Doutor José Manuel de Sena Cruz  
Professora Doutora Maria Isabel Brito Valente

## AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é o culminar de mais uma etapa. Portanto, aproveito este espaço para deixar os meus sinceros agradecimentos a todas as entidades, amigos e familiares que tornaram possível a concretização do presente trabalho.

Ao Professor José Sena Cruz, orientador científico da dissertação, quero expressar o meu profundo agradecimento pela compreensão, disponibilidade, dedicação e incentivos demonstrados. Quero ainda agradecer a sinceridade, o rigor e a transmissão de conhecimento, que em muito contribuiu para o enriquecimento da dissertação.

À Professora Isabel Valente, co-orientadora da dissertação, agradeço o acompanhamento, bem como a sua disponibilidade, espírito crítico e ensinamentos partilhados.

Ao Gonçalo Escusa, que me acompanhou durante a realização da dissertação, agradeço sinceramente a amizade, a 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-UM, agradeço o acompanhamento durante a realização dos trabalhos experimentais.

À Elisa Pereira os agradecimentos nunca serão suficientes por todo o amor, incentivo, compreensão e dedicação, que tanto têm contribuído nas várias etapas da minha vida.

Aos meus Pais e Irmã, pelo apoio e pela confiança que sempre depositaram em mim, demonstrados em todas as fases da minha vida.

Agradeço a colaboração e o material cedido para a realização dos ensaios experimentais às seguintes empresas: ALTO – Perfis Pultrudidos Lda.; CiviTest – Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda.; Artecanter – Industria criativa, Lda.; Sika Portugal, SA; MAPEI – produtos químicos para a construção e Kerakoll Portugal, SA.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito o projeto “EasyFloor – Desenvolvimento de painéis sanduíche composto para reabilitação de pavimentos”, envolvendo a empresa ALTO – Perfis Pultrudidos, Lda., CERIS / Instituto Superior Técnico e ISISE / Universidade do Minho, apoiada por fundos FEDER através do Programa Operacional de POCI (Programa Operacional de Competitividade e Internacionalização) e da Agência Nacional de Inovação (ANI) – projeto no. 3480 (POCI-01-0247-FEDER-003480).

## RESUMO

Nos últimos anos, o crescente interesse e investimento na área da reabilitação justificou uma crescente necessidade de elementos estruturais leves, de elevada rigidez, resistência e durabilidade. Como consequência, houve necessidade de desenvolver novas soluções, tendo-se verificado que as soluções compósitas, nas quais se incluem os painéis sanduíche, apresentam vantagens face a outras tipologias.

A presente dissertação insere-se no âmbito do Projeto de Investigação “EasyFloor”, desenvolvido pelo consórcio que inclui a Universidade do Minho, o Instituto Superior Técnico (IST) e a empresa ALTO-Perfis Pultrudidos, Lda. Este projeto tem por objetivo o desenvolvimento de painéis sanduíche totalmente compósitos e painéis sanduíche híbridos inovadores que serão utilizados na substituição de pisos degradados em edifícios antigos. No âmbito desta dissertação, pretende-se efetuar um conjunto de tarefas associadas ao desenvolvimento e à caracterização mecânica destes painéis sanduíche híbridos. Os painéis são constituídos por uma lâmina inferior em G/CFRP (*glass/carbon fiber reinforced polymer*), duas almas laterais também em G/CFRP, uma lâmina superior em SCSFRMC (*self-compacting steel fiber reinforced micro concrete*) e um núcleo em PUR (*Polyurethane*) ou em PIR (*Polyisocyanurate*). Por razões técnicas, entre o SCSFRMC e o núcleo existirá uma lâmina de GFRP. O processo de produção dos painéis será por pultrusão, estando prevista uma ligação mecânica por encaixe entre painéis.

De modo a assegurar uma adequada ligação entre a lâmina de GFRP e a camada de SCSFRMC foi avaliada a influência i) do tipo de preparação da superfície da lâmina e ii) do tipo de adesivo que procura melhorar a dita ligação, por intermédio de ensaios de “*pull-off*”. De forma a proceder à otimização do painel sanduíche nas suas diversas vertentes, foi necessário determinar as propriedades mecânicas das diferentes componentes do painel. Desta forma, numa primeira fase procedeu-se à caracterização mecânica do SCSFRMC, através de ensaios de compressão e flexão. Por intermédio de ensaios de flexão e de tração uniaxial, foi ainda caracterizado o comportamento das lâminas de GFRP. Finalmente, foi também caracterizado o núcleo (PUR e PIR) por intermédio de ensaios de compressão e corte. Estes resultados foram posteriormente utilizados como dados iniciais das simulações numéricas efetuadas ao painel sanduíche, recorrendo ao método dos elementos finitos. Estas simulações permitiram prever a resposta estrutural dos painéis sanduíche para diferentes configurações de carregamento e diferentes condições fronteira, previstas no projeto “EasyFloor”.

**Palavras-chave:** painel sanduíche híbrido, SCSFRMC, G/CFRP, GFRP, PUR, PIR, ensaios experimentais e simulações numéricas.

## ABSTRACT

In recent years, the increasing interest and investment in rehabilitation has justified a growing need for light structural elements of high stiffness, strength and durability. As a consequence, new solutions were investigated, and it became clear that composite solutions, including sandwich panels, have advantages over other types.

This master's dissertation is framed in the research project "EasyFloor" developed by a consortium comprising University of Minho, Instituto Superior Técnico (IST) and the company ALTO-Perfis Pultrudidos, Lda. The aim of this project is to develop innovative fully composite panels and hybrid sandwich panels which will be used to replace ruined floors of old buildings. In the scope of this dissertation it is intended to carry out a set of tasks associated to the development and the mechanical characterization of hybrid sandwich panels. The panels are composed of a lower strip made of G/CFRP (*glass/carbon fiber reinforced polymer*), two side webs also made of G/CFRP, a top strip made of SCSFRMC (*self-compacting steel fiber reinforced micro concrete*) and a core made of PUR (*Polyurethane*) or PIR (*Polyisocyanurate*). For technical reasons, between SCSFRMC and the core there will be a GFRP slide. The panels will be produced by pultrusion. A mechanical connection between panels will be provided.

In order to ensure an adequate connection between the GFRP slide and SCSFRMC layer, it was decided to assess the influence i) the slide surface preparation technique and ii) the type of adhesive that improves the already mentioned connection by means of pull-off tests. In order to optimize the sandwich panel in a global manner, it was necessary to determine the mechanical properties of the different components of the panel. Thus, in a first phase, the mechanical characterization of SCSFRMC was carried out through compression and bending tests. By means of flexural and uniaxial tensile tests, the behaviour of the GFRP slides was also characterized. Finally, the core (PUR and PIR) was characterized with compression and shear tests. These results were later used as initial data of the numerical simulations based on the sandwich panel, using the finite element method. These simulations were developed to obtain the predictive structural responses of the sandwich panels for the different test configurations foreseen in the "EasyFloor" project.

**Keywords:** hybrid sandwich panel, SCSFRMC, G/CFRP, GFRP, PUR, PIR, experimental tests and numerical simulations.



# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	iii
<b>RESUMO</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>ÍNDICE</b> .....	ix
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	xxv
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Enquadramento geral .....	1
1.2 Projeto EasyFloor: breve descrição .....	3
1.3 Objetivos e metodologia da dissertação .....	7
1.4 Estrutura da dissertação .....	9
<b>2 ESTADO DO CONHECIMENTO</b> .....	11
2.1 Introdução .....	11
2.2 Painéis sanduíche desenvolvidos para aplicações estruturais .....	12
2.3 Painéis sanduíche híbridos .....	15
2.4 Propriedades dos materiais constituintes do painel sanduíche híbrido .....	22
2.4.1 SCSFRMC .....	22
2.4.2 Ligações adesivas .....	24
2.4.3 Polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) .....	29
2.4.4 Poliuretano (PUR) e poliisocianurato (PIR) .....	33
2.5 Sistemas de ligação do betão a GFRP .....	35
<b>3 INFLUÊNCIA DO TIPO DE PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE NA LIGAÇÃO MECÂNICA ENTRE BETÃO E LÂMINAS DE GFRP – Investigação experimental</b> ...	41
3.1 Introdução .....	41
3.2 Características dos materiais utilizados .....	42
3.2.1 GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer) .....	42
3.2.2 Adesivos .....	44
3.2.3 SCSFRMC (Self-Compacting Steel Fiber Reinforced Micro-Concrete) .....	49
3.3 Programa de ensaios .....	50
3.3.1 Ensaio de “pull-off” .....	50
3.3.2 Ensaio de caracterização da superfície do GFRP .....	56
3.3.3 Ensaio de caracterização mecânica do SCSFRMC .....	66

3.4	Resultados e análise.....	74
3.4.1	Materiais intervenientes: GFRP .....	74
3.4.2	Materiais intervenientes: SCSFRMC.....	79
3.4.3	Ensaio de “pull-off”.....	84
3.5	Análise comparativa .....	93
3.6	Conclusões.....	96
<b>4</b>	<b>COMPORTAMENTO MECÂNICO DE LÂMINAS DE GFRP – Investigação experimental</b> .....	<b>97</b>
4.1	Introdução.....	97
4.2	Investigação experimental.....	99
4.2.1	Materiais intervenientes .....	99
4.2.2	Programa de ensaios.....	101
4.3	Resultados e análise.....	110
4.3.1	Ensaio de Flexão.....	110
4.3.2	Ensaio de Tração Direta .....	122
4.3.3	Análise comparativa.....	137
4.4	Conclusões.....	141
<b>5</b>	<b>COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PUR E PIR – Investigação experimental</b> .....	<b>145</b>
5.1	Introdução.....	145
5.2	Investigação experimental.....	146
5.2.1	Materiais intervenientes .....	146
5.2.2	Programa de ensaios.....	146
5.3	Resultados e análise.....	160
5.3.1	Ensaio de Compressão.....	160
5.3.2	Ensaio de Corte.....	164
5.3.3	Análise comparativa.....	170
5.4	Conclusões.....	174
<b>6</b>	<b>ESTUDOS NUMÉRICOS DE PAINÉIS SANDUÍCHE HÍBRIDOS</b> .....	<b>177</b>
6.1	Introdução.....	177
6.2	Calibração do modelo de elementos finitos .....	177
6.3	Estudos paramétricos.....	186
6.3.1	Caso 1.....	186
6.3.2	Caso 2.....	186

6.3.3	Caso 3 .....	187
6.4	Resultados e análise .....	189
6.4.1	Caso 1 .....	189
6.4.2	Caso 2 .....	194
6.4.3	Caso 3 .....	202
6.5	Conclusões .....	219
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS</b> .....	<b>221</b>
7.1	Conclusões .....	221
7.2	Perspetivas de desenvolvimentos futuros .....	226
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>229</b>
	<b>ANEXO I</b> – Fichas técnicas dos adesivos selecionadas para os ensaios de “pull-off” .....	<b>235</b>
	<b>ANEXO II</b> – Modos de rotura dos Ensaios de Flexão em provetes de GFRP .....	<b>251</b>
	<b>ANEXO III</b> – Modos de rotura dos Ensaios de Tração Direta em provetes de GFRP .....	<b>257</b>
	<b>ANEXO IV</b> – Ficha técnica do adesivo utilizada nos Ensaios de Corte para a colagem do PUR/PIR .....	<b>263</b>
	<b>ANEXO V</b> – Modos de rotura dos Ensaios de Compressão em provetes de PUR/PIR .....	<b>265</b>
	<b>ANEXO VI</b> – Modos de rotura dos Ensaios de Corte em provetes de PUR/PIR .....	<b>269</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Geometria do painel sanduíche híbrido desenvolvido na Universidade do Minho, no âmbito do Projeto EasyFloor. ....	3
Figura 1.2 – 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).....	4
Figura 2.1 – Painel sanduíche proposto por Reis et al. (2005 e 2008). ....	13
Figura 2.2 – Painel sanduíche proposto por Sharaf et al. (2010): (a) Esquema do painel e (b) Ensaio de flexão em quatro pontos.....	13
Figura 2.3 – “Clickhouse”: (a) modelo proposto e (b) pormenor da ligação entre o painel sanduíche e perfil GFRP (ALTO Perfis Pultrudidos, Lda.). ....	14
Figura 2.4 – Projeto “LEGOUSE”: (a) painel sanduíche com identificação dos componentes; (b) secção transversal e (c) protótipo construído (Barros et al. 2015).....	14
Figura 2.5 – Painéis desenvolvidos por Norton (2004): (a) painel tipo 2 sem treliça no núcleo e com conetores metálicos e (b) painel tipo 3 com treliça no núcleo e com conetores compósitos. ....	15
Figura 2.6 – Modos de rotura na interface GFRP-betão do painel proposto por Norton (2004): (a) perda de ligação na interface em análise e consequente rotura por corte do GFRP e (b) delaminação provocada pela rotura da ligação GFRP-betão.....	16
Figura 2.7 – Painel sanduíche híbrido proposto por Johnson et al. (2006): (a) representação e constituição e (b) modo de rotura ocorrendo delaminação na interface GFRP/betão. ....	17
Figura 2.8 – Viga híbrida proposta por Keller et al. (2007). Nota: dimensões em [mm].....	18
Figura 2.9 – Painel sanduíche proposto e ensaiado por Liu et al., 2011. Nota: dimensões em [mm]. ....	18
Figura 2.10 – Modos de rotura observados nos painéis híbridos propostos por Liu et al. (2011): (a) sem tratamento da interface; (b) com tratamento da interface e pormenor do escorregamento entre o GFRP e o betão; (c) escorregamento entre a interface GFRP-betão e (d) rotura por corte de nervuras em “T”. ....	19
Figura 2.11 – Produção do painel sanduíche híbrido (adaptado de (Mastali et al., 2015)). ....	20
Figura 2.12 – Danos sucessivos observados durante o ensaio do painel sanduíche híbrido (adaptado de (Mastali et al., 2015)). ....	21

Figura 2.13 – Representação dos materiais base para desenvolver o SCSFRMC do presente projeto (Escusa et al., Projeto “Easyfloor”, 2017). .....	23
Figura 2.14 – Representação esquemática de uma ligação adesiva e correspondente junta (adaptado Petrie, 2000). .....	26
Figura 2.15 – Distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição para juntas adesivas: (a) adesivos rígidos e flexíveis e (b) diferentes espessuras de adesivo, (Silva et al., 2011). .....	26
Figura 2.16 – Modos de rotura em juntas adesivas, (Azevedo, 2014). .....	27
Figura 2.17 – Representações da disposição típica das camadas num compósito pultrudido (adaptado de (Correia, 2013)). .....	31
Figura 2.18 – Utilização de perfis de GFRP em estruturas secundárias: (a) Plataforma de trabalhos com escada isolante e guarda-corpos (ALTO); (b) escadas com guarda-corpos (STRONGWELL); (c) Painel (STRONGWELL) e (d) gradis para pavimentos (STRONGWELL). .....	32
Figura 2.19 – Utilização de perfis de GFRP em estruturas principais: (a) Ponte Aberfeldy (1992) – primeira ponte pedonal 100% compósita; (b) Ponte Pontresina (1997) – utilização de ligações coladas, pela primeira vez; (c) Edifício EyeCatcher (1999) – referência da utilização de perfis de GFRP em edifícios e (d) Ponte de Lérida (2001) – sobrepõe três importantes eixos de transportes. (Correia, 2004); .....	33
Figura 2.20 – Propriedades mecânicas dos materiais mais utilizados no núcleo de painéis sanduíche: (a) compressão; (b) tração e (c) corte (adaptado de (Davies, 2001)). .....	35
Figura 2.21 – Viga híbrida desenvolvida, (Deskovic et al., 1995). Nota: dimensões em [mm]. .....	36
Figura 2.22 – Vigas desenvolvidas: a) (Canning et al., 1999) e b) (Hullat et al., 2000). .....	37
Figura 2.23 – Seções das vigas apresentadas por Nordin e Tajsten (2004). Nota: dimensões em [mm]. .....	38
Figura 2.24 – Carbon Shell System (Seible et al., 2004): (a) sistema proposto e (b) Kings Stormwater Channel Bridge. Nota: dimensões em [mm]. .....	39
Figura 2.25 – Hybrid Tube System (Seible et al., 2004). Nota: dimensões em [mm]. .....	39
Figura 3.1 – Perfil I400 para extração de amostras .....	43
Figura 3.2 – Constituição do GFRP utilizado (ALTO, Perfis Pultrudidos, Lda.) .....	43
Figura 3.3 – Adesivos estudados: (a) SikaTop Armatec-110 EpoCem; (b) Sikadur – 32 EF; (c) Eporip e (d) Kerabuild Eco Epoprimer. .....	45

Figura 3.4 – Provette tipo para ensaio de “pull-off” (vista em corte).....	51
Figura 3.5 – Setup do ensaio de “pull-off” (vista em planta). Nota: (i) _0N indica a posição do ensaio na placa de GFRP e (ii) Cotas em [mm]. .....	52
Figura 3.6 – Equipamento E142 da Matest, utilizado nos ensaios de tipo “pull-off”. .....	53
Figura 3.7 – Representação do ensaio de “pull-off” (Adaptado de ASTM C 1583 – 04). .....	55
Figura 3.8 – Modos esquemáticos de rotura: (a) Rotura no SCSFRMC; (b) Rotura de ligação na interface SCSFRMC/GFRP; (c) Rotura no material de GFRP; (d) Rotura de ligação na interface disco/GFRP, (Adaptado de ASTM C 1583 – 04). .....	55
Figura 3.9 – Trajeto percorrido pelo laser na aquisição da rugosidade em 2 direções da superfície de GFRP. Nota: dimensões em [mm]. .....	56
Figura 3.10 – Configuração do sistema de medição da rugosidade de superfície das placas de GFRP. ....	57
Figura 3.11 – Fotografias do sistema de ensaio de análise microscópica das placas de GFRP e do equipamento microscópico utilizado. ....	57
Figura 3.12 – Fotografias microscópicas efetuadas nas placas de GFRP: (a) tratamento com lixa 24; (b) tratamento com lixa 80 e (c) sem tratamento de superfície. ....	58
Figura 3.13 – Aplicação do tratamento com lixa.....	59
Figura 3.14 – Preparação das cofragens e colocação do GFRP para aplicação dos diferentes adesivos e posterior betonagem do SCSFRMC.....	60
Figura 3.15 – Preparação do SikaTop Armatec – 110 EpoCem – Sika.....	61
Figura 3.16 – Preparação do Sikadur – 32 EF – Sika.....	61
Figura 3.17 – Preparação do Eporip – Mapei.....	61
Figura 3.18 – Preparação do Kerabuild Eco Epoprimer – Kerakoll.....	61
Figura 3.19 – Preparação da superfície de GFRP para receber o adesivo.....	62
Figura 3.20 – Aplicação dos adesivos: (a) SikaTop Armatec-110 EpoCem; (b) Sikadur – 32 EF; (c) Eporip e (d) Kerabuild Eco Epoprimer. ....	62
Figura 3.21 – Betonagem dos provetes: (a) betoneira utilizada para fabricação do SCSFRMC; (b) amassadura em execução de SCSFRMC e (c) provetes no final da betonagem.....	63
Figura 3.22 – Caroteador utilizado para perfuração dos provetes.....	63
Figura 3.23 – Aplicação de adesivo para colagem dos discos.....	64
Figura 3.24 – Ensaio de arrancamento (“pull-off”): (a) Posicionamento da máquina e aplicação de carga (início); (b) Fase final do ensaio; (c) Modos de rotura identificados.....	64
Figura 3.25 – Final do ensaio tipo de “pull-off” .....	65

Figura 3.26 – Modos de rotura obtidos nos ensaios de “pull-off”: (a) rotura pelo adesivo; (b) rotura pelo SCSFRMC e (c) ligação descolou quando se iniciou o ensaio (descolado)..	66
Figura 3.27 – Modo de rotura identificado antes do início do ensaio: não aderência entre GFRP/SCSFRMC (ligação descolada).	66
Figura 3.28 – (a) Realização do ensaio à compressão; (b) modo de rotura típico observado nos provetes cilíndricos.	69
Figura 3.29 – (a) Realização do ensaio à compressão; (b) modo de rotura típico observado nos provetes cúbicos.	69
Figura 3.30 – Esquema de suporte e de aplicação da carga no ensaio de flexão, (Barros et al., 2011).	70
Figura 3.31 – Sistema de ensaio utilizado (de acordo com a recomendação do RILEM).	70
Figura 3.32 – Equipamento e sistema de reação utilizado nos ensaios de flexão.	71
Figura 3.33 – Abertura de entalhes em provetes prismáticos.	72
Figura 3.34 – Esquema do ensaio à flexão em 3 pontos incluindo dimensões do provete e disposição dos transdutores: (a) Vista de perfil; (b) Vista em corte. Nota: cotas em [mm] (Escusa et al., 2015).	74
Figura 3.35 – Diferentes níveis de rugosidade das superfícies de GFRP: (a) tratamento com lixa 24; (b) tratamento com lixa 80 e (c) sem tratamento de superfície.	75
Figura 3.36 – Perfil de rugosidade obtido pelo laser: (a) tratamento com lixa 24; (b) tratamento com lixa 80 e (c) sem tratamento de superfície.	76
Figura 3.37 – Final do ensaio: (a) modo de rotura por compressão dos provetes cilíndricos e (b) modo de rotura por compressão dos provetes cúbicos.	80
Figura 3.38 – Provetes ensaiados aos 28 dias de idade: respostas tensão em flexão vs. CMOD.	81
Figura 3.39 – Provelte tipo após o ensaio de flexão: (a) vista lateral e (b) superfície de fratura	82
Figura 3.40 – Modos de rotura observados nos ensaios de tipo “pull-off”: (a) P_SP24_A1.1 ; (b) P_SP24_A2.2; (c) P_SP24_A3.3; (d) P_SP24_A4.4; (e) P_SP24_A5.5; (f) P_SP80_A1.1; (g) P_SP80_A2.2; (h) P_SP80_A3.3; (i) P_SP80_A4.4; (j) P_SP80_A5.5; (k) P_NT_A1.1; (l) P_NT_A2.2; (m) P_NT_A3.3; (n) P_NT_A4.4 e (o) P_NT_A5.5..	92
Figura 3.41 – Relação entre o tipo de tratamento de superfície de GFRP, adesivo de ligação e a tensão de arrancamento dos provetes ensaiados.	95

Figura 4.1 – Identificação dos componentes da secção transversal do painel sanduíche híbrido proposto. Nota: dimensões em [mm].....	97
Figura 4.2 – Configuração e constituição dos provetes dos laminados em GFRP: (a) provetes V1 e (b) provetes V2 e V3.....	99
Figura 4.3 – Representação esquemática dos laminados de GFRP ensaiados à flexão e tração direta. ....	100
Figura 4.4 – Fotografia dos laminados de GFRP ensaiados à flexão e tração direta. ....	100
Figura 4.5 – Sistema de ensaio adotado em ensaios de flexão com laminados em GFRP: (a) “Procedure A” (ASTM D7264/D7264M – 07); (b) configuração utilizada no ensaio...	101
Figura 4.6 – Configuração do ensaio de flexão (3 pontos) em provetes de GFRP. ....	104
Figura 4.7 – Configuração dos provetes para ensaio de tração direta: (a) provetes V1; (b) vista lateral de todos os provetes ensaiados e (c) provetes V2 e V3. Nota: dimensões em [mm]. .....	107
Figura 4.8 – Procedimentos realizados para a preparação dos provetes para os ensaios de tração direta. ....	108
Figura 4.9 – Configuração do ensaio de tração: (a) equipamento universal de ensaios hidráulico com sistema de amarras e provete no início do ensaio. (b) Registo de dados durante o ensaio. ....	109
Figura 4.10 – Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para os provetes ensaiados a flexão, na direção longitudinal ao reforço principal: (a) provetes V1; (b) provetes V2 e (c) provetes V3.....	111
Figura 4.11 – Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para os provetes ensaiados à flexão, na direção longitudinal ao reforço principal.....	112
Figura 4.12 – Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para os provetes ensaiados a flexão, na direção transversal ao reforço principal: (a) provetes V1; (b) provetes V2 e (c) provetes V3.....	113
Figura 4.13 – Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para os provetes ensaiados à flexão, na direção transversal ao reforço principal.....	114
Figura 4.14 – Modos de rotura obtidos de ensaios de flexão em laminados de GFRP: (a) direção longitudinal (direção de pultrusão) (V2_GFRP_L_03) e (b) direção transversal (oposta à direção de pultrusão) (V2_GFRP_T_03). ....	117
Figura 4.15 – Modos de rotura após os ensaios de flexão em provetes de laminados em GFRP, em ambas as direções (longitudinal: parte direita de cada fotografia e transversal: parte	

esquerda de cada fotografia): (a) V1; (b) V2 e (c) V3. Nota: o nível de deformação encontra-se “exagerado” relativamente ao ensaio padrão, uma vez que todos os provetes foram continuamente carregados, com o objetivo de amplificar o padrão de rotura.... 117

Figura 4.16 – Evolução da deformação e modo de rotura demonstrado pelos provetes de GFRP, testados na direção longitudinal e transversal, respetivamente: (a) provete V2\_GFRP\_L\_03 e (b) provete V2\_GFRP\_T\_03. .... 118

Figura 4.17 – Comparação de resultados para os provetes de V1, V2 e V3 a partir dos respetivos valores médios de: (a) tensão máxima de flexão na face superior; (b) extensão máxima na face superior e (c) módulo de elasticidade de flexão, na direção longitudinal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete V2.119

Figura 4.18 – Comparação de resultados para os provetes de V1, V2 e V3 a partir dos respetivos valores médios de: (a) tensão máxima de flexão na face superior; (b) extensão máxima na face superior e (c) módulo de elasticidade de flexão, na direção transversal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete V2.120

Figura 4.19 – Variação com base nos valores médios, referentes à direção longitudinal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete V2. .... 121

Figura 4.20 – Variação com base nos valores médios, referentes à direção transversal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete V2.122

Figura 4.21 – Curvas tensão de tração versus extensão dos provetes ensaiados à tração direta, orientados na direção longitudinal: (a) V1, (b) V2 e (c) V3. .... 123

Figura 4.22 – Curvas tensão de tração versus extensão dos provetes ensaiados à tração direta, direção longitudinal: V1; V2 e V3. .... 124

Figura 4.23 – Curvas tensão de tração versus extensão dos provetes ensaiados à tração direta, direção transversal: (a) V1: 250×25×4 mm<sup>3</sup>, (b) V2: 250×25×5 mm<sup>3</sup> e (c) V3: 250×25×5 mm<sup>3</sup> com ATH na sua constituição. .... 125

Figura 4.24 – Curvas tensão de tração versus extensão dos provetes ensaiados à tração direta, direção transversal: V1; V2 e V3. .... 126

Figura 4.25 – Classificação dos modos de rotura típicos dos ensaios de tração. (ASTM D 3039/D 3039M-00 (ASTM, 2000b)). .... 129

Figura 4.26 – Modos de rotura obtidos em provetes orientados na direção longitudinal, com respetiva classificação: (a) DGM e (b) LAB. .... 130

Figura 4.27 – Modos de rotura tipo obtidos nos provetes, na direção transversal, com respetiva classificação segundo a norma de ensaio utilizada: (a) AGM e (b) AAB.....	131
Figura 4.28 – Modos de rotura obtidos nos provetes: (a) V1_GFRP_L à esquerda e V1_GFRP_T à direita; (b) V2_GFRP_L à esquerda e V2_GFRP_T à direita e (c) V3_GFRP_L à esquerda e V3_GFRP_T à direita.....	131
Figura 4.29 – Comparação dos vários parâmetros obtidos entre V1, V2 e V3, orientados na direção longitudinal: (a) força máxima atingida; (b) tensão de tração máxima; (c) extensão máxima e (d) módulo de elasticidade. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete V2. ....	132
Figura 4.30 – Comparação dos vários parâmetros obtidos entre provetes de diferentes constituições (V1, V2 e V3), na direção transversal: (a) a força máxima atingida; (b) a tensão de tração máxima; (c) a extensão máxima e (d) o módulo de elasticidade. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete V2.	133
Figura 4.31 – Comparação das forças máximas obtidas entre provetes de diferentes tipos e direções, onde a parte esquerda dos gráficos representa a direção longitudinal e a parte direita a direção transversal: (a) provete V1; (b) provete V2 e (c) provete V3. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda.....	134
Figura 4.32 – Comparação das tensões de tração máximas obtidas entre provetes de diferentes tipos e direções, onde a parte esquerda dos gráficos representa a direção longitudinal e a parte direita a direção transversal: (a) provete V1; (b) provete V2 e (c) provete V3. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda. ....	135
Figura 4.33 – Comparação das extensões máximas obtidas entre provetes de diferentes tipos e direções, onde a parte esquerda dos gráficos representa a direção longitudinal e a parte direita a direção transversal: (a) provete V1; (b) provete V2 e (c) provete V3. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda.....	136
Figura 4.34 – Comparação dos módulos de elasticidade obtidos entre provetes de diferentes tipos e direções, onde a parte esquerda dos gráficos representa a direção longitudinal e a parte direita a direção transversal: (a) provete V1; (b) provete V2 e (c) provete V3. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda. ....	137

Figura 4.35 – Comparação das tensões máximas obtidas a partir dos ensaios de flexão e tração direta: (a) direção longitudinal e (b) direção transversal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda. ....	138
Figura 4.36 – Comparação das extensões máximas obtidas a partir dos ensaios de flexão e tração direta: (a) direção longitudinal e (b) direção transversal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda. ....	139
Figura 4.37 – Comparação dos módulos de elasticidade obtidos a partir dos ensaios de flexão e tração direta: (a) direção longitudinal e (b) direção transversal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda. ....	140
Figura 5.1 – Representação esquemática do provete de PUR/PIR ensaiado à compressão...	147
Figura 5.2 – Configuração do ensaio de compressão em PUR: (a) fase pré-inicial do ensaio e (b) fase final do ensaio. ....	149
Figura 5.3 – Configuração do ensaio de compressão em PIR: (a) fase pré-inicial do ensaio e (b) fase final do ensaio.....	149
Figura 5.4 – Ensaios de corte propostos pela (a) ISO 1922:2001(E) e (b) ASTM C273-00. Nota: dimensões em [mm]. ....	151
Figura 5.5 – Configuração dos ensaios de corte em placas utilizado: (a) vista 3D; (b) vista frontal; (c) vista lateral e (d) vista em planta. Notas: dimensões em [mm] (Cruz, 2017). ....	152
Figura 5.6 – Representação esquemática do provete de PUR/PIR ensaiado ao corte. ....	154
Figura 5.7 – Adesivo selecionado para colagem dos provetes de PUR/PIR para ensaios de corte: (a) componente A e (b) componente B. ....	155
Figura 5.8 – Etapas de preparação para os ensaios de corte dos provetes de PUR e PIR. (Adaptado de Cruz, 2017). ....	157
Figura 5.9 – Configuração do ensaio de corte em PUR/PIR. ....	158
Figura 5.10 – Relação tensão de compressão versus extensão axial dos provetes de PUR ensaiados à compressão. ....	160
Figura 5.11 – Relação tensão de compressão versus extensão axial dos provetes de PIR ensaiados à compressão. ....	161

Figura 5.12 – Modos de rotura dos provetes ensaiados à compressão: (a) provete tipo PUR (PUR40_CT_02) e (b) provete tipo PIR (PIR40_CT_02).....	163
Figura 5.13 – Curvas da relação entre a tensão de corte e a distorção para os provetes de PUR. ....	164
Figura 5.14 – Curvas da relação entre a tensão de corte e a distorção para os provetes de PIR. ....	165
Figura 5.15 – Determinação de $\tau_{\max,2\%}$ e $\gamma_{\text{ult},2\%}$ : (a) provete PUR40_ST_05 e (b) provete PIR40_ST_05. ....	166
Figura 5.16 – Modo de rotura típico dos provetes de PUR ensaiados ao corte. (Nota: as fotografias encontram-se colocadas de forma sequencial.).....	169
Figura 5.17 – Modo de rotura típico dos provetes de PIR ensaiados ao corte. Nota: as fotografias encontram-se colocadas de forma sequencial.....	169
Figura 5.18 – Relação entre tensão de compressão e extensão axial em provetes de PUR e PIR quando ensaiados à compressão. ....	170
Figura 5.19 – Comparação de valores médios obtidos em ensaios com provetes de PUR e PIR: (a) força máxima; (b) tensão máxima; (c) extensão máxima e (d) módulo de elasticidade de compressão. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete PUR. ....	171
Figura 5.20 – Curvas que traduzem a relação entre a tensão de corte e a distorção nos provetes de PUR e de PIR.....	172
Figura 5.21 – Comparação da força máxima de corte entre provetes de PUR e PIR: (a) força para uma deformação de corte de 2%, $F_{\max,2\%}$ , e (b) força na rotura, $F_{\max,ap}$ (valor aparente). Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete PUR. ....	172
Figura 5.22 – Comparação da tensão máxima de corte entre provetes de PUR e PIR: (a) tensão para uma deformação de corte de 2%, $\tau_{\max,2\%}$ , e (b) tensão na rotura, $\tau_{\max,ap}$ (valor aparente). Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete PUR. esquerda. ....	173
Figura 5.23 – Comparação da distorção última de corte entre provetes de PUR e PIR: (a) distorção para uma deformação de corte de 2%, $\gamma_{\text{ult},2\%}$ e (b) distorção na rotura, $\gamma_{\text{ult},ap}$ (valor aparente). Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete PUR.....	173

Figura 5.24 – Comparação do módulo de corte entre provetes de PUR e PIR. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete PUR. ....	174
Figura 6.1 – Geometria do painel sanduíche híbrido do Projeto “EasyFloor”. Nota: Dimensões em [mm]......	178
Figura 6.2 – Painel sanduíche híbrido para simulações numéricas: GFRP (azul), SCSFRMC (cinzento) e PIR (amarelo)......	179
Figura 6.3 – Configuração da malha do painel sanduíche híbrido: (a) inicial e (b) final. ....	181
Figura 6.4 – Configuração das condições fronteira e carregamento. Nota: Dimensões em [m]. .....	181
Figura 6.5 – Configuração das condições fronteira e carregamento do painel sanduíche híbrido. .....	182
Figura 6.6 – Deformada e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm]. ....	185
Figura 6.7 – Configuração de ensaio do Caso 1 .....	186
Figura 6.8 – Configuração de ensaio do Caso 2. ....	187
Figura 6.9 – Configuração de ensaio do Caso 3 i). ....	188
Figura 6.10 – Configuração de ensaio do Caso 3 ii). ....	188
Figura 6.11 – Configuração de ensaio do Caso 3 iii). ....	188
Figura 6.12 – Configuração de ensaio do Caso 3 iv). ....	189
Figura 6.13 – Deformada do Caso 1 e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm]. ....	190
Figura 6.14 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa]. .....	191
Figura 6.15 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa]. ....	192
Figura 6.16 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa]. ....	193
Figura 6.17 – Deformada do Caso 2 e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples correspondente ao final do painel corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm]. ....	195

Figura 6.18 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC. Nota: a zona de apoio simples correspondente ao final do painel corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].	196
Figura 6.19 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP. Nota: a zona de apoio simples correspondente ao final do painel corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].	197
Figura 6.20 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR. Nota: a zona de apoio simples correspondente ao final do painel corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].	198
Figura 6.21 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC: (a) Secção S2 e (b) Secção S1; Nota: valores na escala encontram-se em [MPa].	199
Figura 6.22 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP: (a) Secção S2 e (b) Secção S1; Nota: valores na escala encontram-se em [MPa].	200
Figura 6.23 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR: (a) apoio AP1 e (b) apoio AP2. Nota: valores na escala encontram-se em [MPa].	201
Figura 6.24 – Deformada do Caso 3 i) e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm].	203
Figura 6.25 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].	204
Figura 6.26 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].	205
Figura 6.27 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].	205
Figura 6.28 – Deformada do Caso 3 ii) e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm].	207
Figura 6.29 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].	208
Figura 6.30 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].	209
Figura 6.31 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].	209

Figura 6.32 – Deformada do Caso 3 iii) e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm]......	211
Figura 6.33 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa]. .....	212
Figura 6.34 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa]....	213
Figura 6.35 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa]....	213
Figura 6.36 – Deformada do Caso 3 iv) e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm]......	215
Figura 6.37 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa]. .....	216
Figura 6.38 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa]....	217
Figura 6.39 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa]....	217
Figura 6.40 – Comparação dos resultados obtidos nos estudos paramétricos do Caso 3. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao Caso 3 i)...	218

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Juntas adesivas comuns: vantagens e desvantagens (adaptado de Mortensen, 1998). .....	25
Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens dos perfis de GFRP pultrudidos (ALTO; Correia, 2004). .....	30
Tabela 2.3 – Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecíveis (adaptado de Ascione et al., 2016b; Correia, 2004). ....	31
Tabela 2.4 – Intervalos usuais das principais propriedades do material utilizado em perfis de GFRP (Correia, 2004). ....	32
Tabela 3.1 – Dimensões do Perfil I400 (ALTO, Perfis Pultrudidos, Lda.). ....	43
Tabela 3.2 – Principais propriedades mecânicas do material GFRP utilizado, (José A. Gonilha et al., 2014). ....	44
Tabela 3.3 – Campos de aplicação e características técnicas dos adesivos selecionados (extraída das fichas técnicas). ....	45
Tabela 3.4 – Características técnicas dos adesivos selecionados (informação recolhida das fichas técnicas): Parte 1. ....	47
Tabela 3.5 – Características técnicas dos adesivos selecionados (informação recolhida nas fichas técnicas): Parte 2. ....	48
Tabela 3.6 – Composição para 1 m <sup>3</sup> de SCSFRMC. ....	49
Tabela 3.7 – Nomenclatura utilizada para os ensaios de tipo “pull-off” ....	51
Tabela 3.8 – Propriedades do sensor laser SICK OD2 – P50W10A0. ....	57
Tabela 3.9 – Levantamento geométrico das placas de GFRP. ....	59
Tabela 3.10 – Caracterização geométrica e designação dos provetes cilíndricos. ....	67
Tabela 3.11 – Caracterização geométrica e designação dos provetes cúbicos. ....	68
Tabela 3.12 – Caracterização geométrica e designação dos provetes dos ensaios de flexão. ....	73
Tabela 3.13 – Resultados da caracterização da rugosidade da superfície, perfil obtido na direção XX. ....	77
Tabela 3.14 – Resultados da caracterização da rugosidade da superfície, perfil obtido na direção YY. ....	78
Tabela 3.15 – Resistência à compressão em provetes cilíndricos e cúbicos. ....	79
Tabela 3.16 – Módulo de elasticidade em compressão do SCSFRMC. ....	80
Tabela 3.17 – Número médio de fibras na superfície de fratura ....	82

Tabela 3.18 – Resultados das tensões residuais e equivalentes à tração em flexão.....	83
Tabela 3.19 – Resultados dos ensaios de “pull-off”, com tratamento lixa 24 aplicado sobre as superfícies das placas de GFRP. ....	85
Tabela 3.20 – Resultados dos ensaios de “pull-off”, com tratamento lixa 80 aplicado sobre as superfícies das placas de GFRP. ....	86
Tabela 3.21 – Resultados dos ensaios de “pull-off”, sem tratamento de superfícies nas placas de GFRP.....	87
Tabela 3.22 – Resultados após ensaio de “pull-off” das placas de GFRP, com tratamento de lixa 24.....	88
Tabela 3.23 – Resultados após ensaio de “pull-off” das placas de GFRP, com tratamento de lixa 80.....	89
Tabela 3.24 – Resultados após ensaio de “pull-off” das placas de GFRP, sem tratamento de superfície.....	90
Tabela 3.25 – Tensões de arrancamento obtidas dos ensaios. ....	95
Tabela 4.1 – Características geométricas dos provetes de ensaios de flexão dos laminados em GFRP, na direção longitudinal (b – largura; e – espessura; $L_c$ – comprimento).....	102
Tabela 4.2 – Características geométricas dos provetes de ensaios de flexão dos laminados em GFRP, na direção transversal (b – largura; e – espessura; $L_c$ – comprimento).....	103
Tabela 4.3 – Características geométricas dos provetes destinados a ensaios de tração direta, na direção longitudinal. ....	106
Tabela 4.4 – Características geométricas dos provetes destinados a ensaios de tração direta, na direção transversal.....	106
Tabela 4.5 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão em provetes de GFRP, orientados na direção longitudinal ao reforço principal. ....	115
Tabela 4.6 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão em provetes de GFRP, orientados na direção transversal ao reforço principal. ....	116
Tabela 4.7 – Resultados obtidos em provetes de GFRP ensaiados à tração direta, orientados na direção longitudinal. ....	127
Tabela 4.8 – Resultados obtidos em provetes de GFRP ensaiados à tração direta, orientados na direção transversal.....	128

Tabela 5.1 – Caraterização geométrica e designação dos provetes de PUR ensaiados à compressão. ....	148
Tabela 5.2 – Caraterização geométrica e designação dos provetes de PIR ensaiados à compressão. ....	148
Tabela 5.3 – Caraterização geométrica dos provetes de PUR ensaiados ao corte.....	154
Tabela 5.4 – Caraterização geométrica dos provetes de PIR ensaiados ao corte. ....	155
Tabela 5.5 – Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compressão em PUR. ....	162
Tabela 5.6 – Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compressão em PIR. ....	162
Tabela 5.7 – Valores dos principais parâmetros obtidos nos ensaios de corte para os provetes de PUR.....	167
Tabela 5.8 – Valores dos principais parâmetros obtidos nos ensaios de corte para os provetes de PIR. ....	167
Tabela 6.1 – Propriedades mecânicas adotadas nas simulações numéricas. ....	180
Tabela 6.2 – Características mecânicas e geométricas dos materiais intervenientes do painel sanduíche. ....	183
Tabela 6.3 – Cálculo do momento de inércia (secção homogeneizada).....	183
Tabela 6.4 – Dados para o cálculo do deslocamento.....	184
Tabela 6.5 – Deslocamento vertical a meio vão, determinado pelo modelo de elementos finitos e de forma analítica. ....	184
Tabela 6.6 – Configuração de carregamento do Caso 3.....	187
Tabela 6.7 – Propriedades do Caso 1 determinadas através do modelo numérico.....	189
Tabela 6.8 – Propriedades do Caso 2 determinadas através do modelo numérico.....	194
Tabela 6.9 – Propriedades do Caso 3 i) determinadas através do modelo numérico. ....	202
Tabela 6.10 – Propriedades do Caso 3 ii) determinadas através do modelo numérico. ....	206
Tabela 6.11 – Propriedades do Caso 3 iii) determinadas através do modelo numérico. ....	210
Tabela 6.12 – Propriedades do Caso 3 iv) determinadas através do modelo numérico. ....	214



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 Enquadramento geral

A reabilitação reveste-se de grande importância um pouco por todo o mundo, tendo vindo a ganhar preponderância na Europa, e particularmente em Portugal, onde há um mercado potencial a ela associado. No contexto nacional, verifica-se que os edifícios construídos antes de 1940 são maioritariamente constituídos por paredes resistentes em alvenaria e pisos formados por elementos de madeira (Appleton, 2003). Em geral, estes edifícios encontram-se em estado precário devido à falta de manutenção e/ou reabilitação. A degradação que ocorre ao nível estrutural poderá trazer consequências graves, entre as quais o próprio colapso da estrutura. 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). Assim, uma intervenção atempada e correta permitirá prolongar a vida útil da estrutura, devendo-se escolher uma solução que permita reduzir o tempo de aplicação e os custos associados à mesma.

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, fatores como o peso, o transporte dos segmentos e o tempo de montagem, 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 (i) leveza; (ii) elevado desempenho mecânico; (iii) fácil instalação; e (iv) 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 (Correia, 2008).

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 solução a desenvolver tem como objetivo obter um sistema construtivo com um custo competitivo e com desempenho melhorado em termos de leveza, facilidade de transporte, rapidez e facilidade de montagem/desmontagem. Pretende-se ainda cumprir as exigências regulamentares de segurança estrutural, de desempenho térmico e acústico e de segurança em situação de incêndio, minimizando eventos de manutenção, aumentando a respetiva durabilidade e garantindo a possibilidade de reutilização. Devido a todas as vantagens anteriormente referidas, a solução a desenvolver pretende competir com outras soluções mais tradicionais onde são correntemente utilizados o betão armado, a madeira, o aço ou as soluções mistas em aço e betão.

Tomando em consideração as propriedades dos materiais utilizados no fabrico do painel, pretende-se aprofundar o estudo do comportamento destes elementos estruturais, quer através de ensaios experimentais, quer com recurso a ferramentas numéricas robustas. Todo esse trabalho poderá assim contribuir para o desenvolvimento de regulamentação dedicada ao dimensionamento e verificação de segurança deste tipo de elementos estruturais.

A Figura 1.1 apresenta a geometria final dos painéis sanduíche híbridos desenvolvidos pela Universidade do Minho no âmbito do Projeto “EasyFloor”.

No que se segue, apresenta-se uma breve descrição do projeto “EasyFloor”.

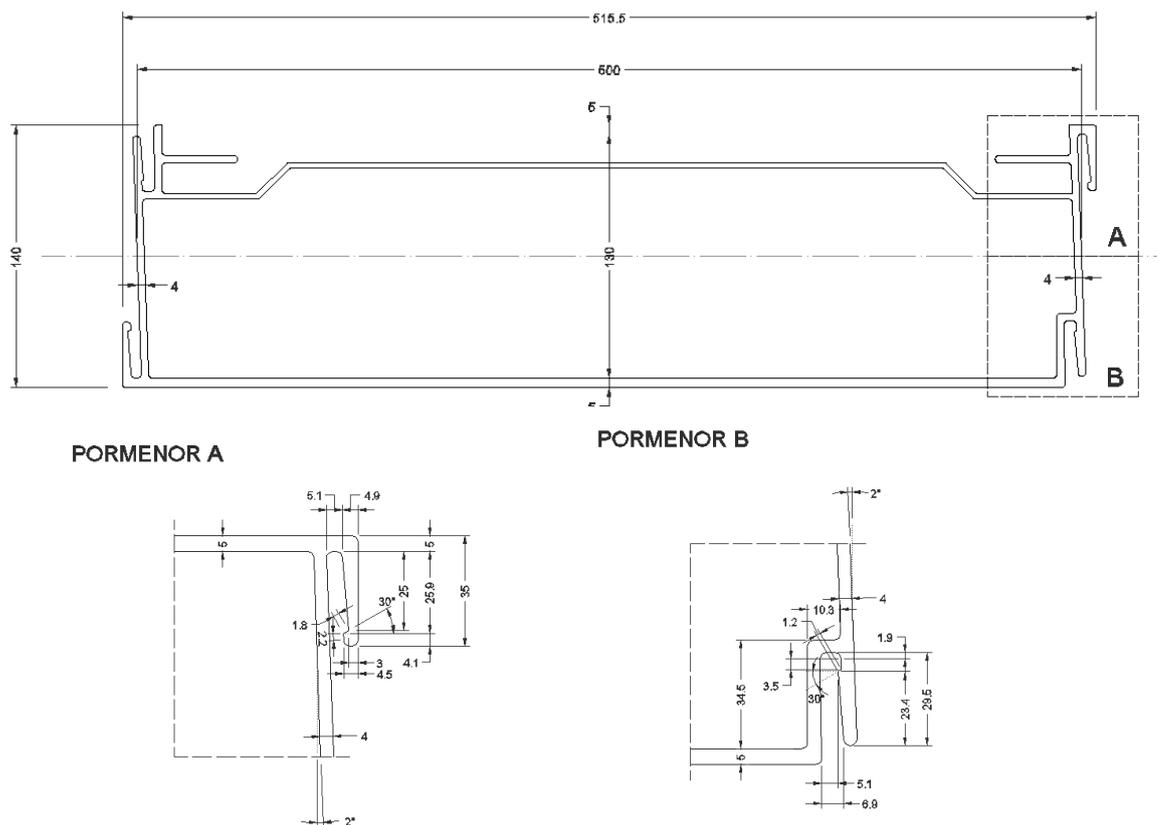


Figura 1.1 – Geometria do painel sanduíche híbrido desenvolvido na Universidade do Minho, no âmbito do Projeto EasyFloor.

## 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 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 1.2): (i) painéis compósitos de 2ª geração, compostos por lâminas exclusivamente em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) 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 micro betão autocompactável reforçado com fibras de aço de elevada ductilidade (SCSFRMC – *self-compacting steel fiber reinforced micro concrete*) e um núcleo em PUR ou PIR, 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.

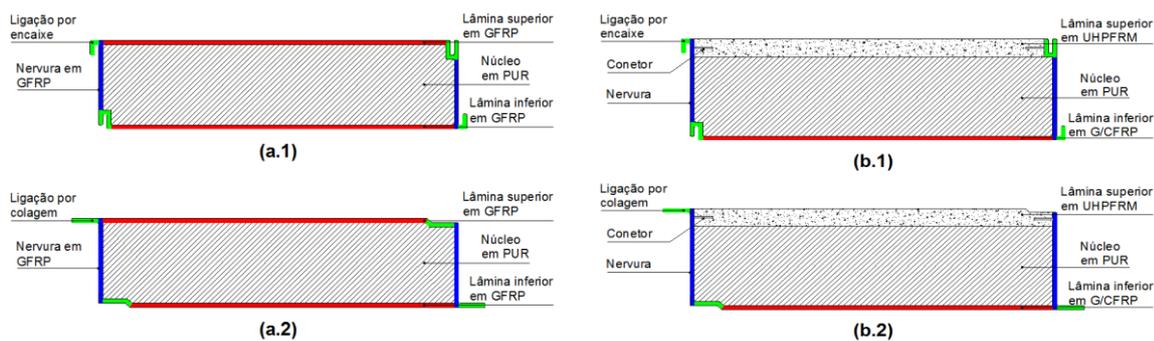


Figura 1.2 – Esquema dos painéis (a) compósitos e (b) híbridos, com sistemas de ligação por encaixe (a.1 e b.1) e por sobreposição (a.2 e b.2) (ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, IST e UM).

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 é mantida através da utilização de uma lâmina superior em SCSFRMC 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 do SCSFRMC**, nomeadamente da composição do compósito cimentício, do tipo e teor das fibras de reforço e caracterização do seu comportamento material;
- (vii) **Ensaio de caracterização 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 caracterização da ligação entre a componente compósita (G/CFRP e PUR) e a lâmina em SCSFRMC dos painéis híbridos** – serão efetuados ensaios de conexão de corte entre a componente compósita do painel (lâmina inferior em G/CFRP e núcleo de PUR) e a lâmina superior em SCSFRMC.
- (ix) **Ensaio de caracterização do comportamento estrutural a curto (estático e dinâmico) e longo prazo dos painéis sanduíche compósitos GFRP (IST) e dos painéis sanduíche híbridos G/CFRP-SCSFRMC (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-SCSFRMC** – 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 estudo do painel sanduíche híbrido proposto, destinado à reabilitação de pisos de edifícios. Nesse contexto, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- i.** Caracterizar mecanicamente os materiais intervenientes no painel sanduíche, em particular o SCSFRMC, as lâminas de GFRP e as espumas de PUR e PIR;
- ii.** Caracterizar mecanicamente a ligação entre a camada de SCSFRMC e a lâmina de GFRP, tendo em conta a influência do tipo de preparação da superfície e o tipo de adesivo, por intermédio de ensaios de “*pull-off*”;
- iii.** Prever a resposta estrutural destes painéis para diferentes configurações de carregamento e diferentes condições fronteira previstas no âmbito da caracterização experimental incluída no projeto “EasyFloor”.

Para a realização do presente trabalho foram necessários alguns meios, nomeadamente bibliografia relacionada com o tema, computador pessoal e software de análise numérica. As campanhas de ensaios experimentais decorreram no Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST-UM). O estudo desenvolvido divide-se em 4 tarefas principais, que se apresentam de seguida:

- i.** Recolha de bibliografia no âmbito do tema da dissertação, designadamente relativa a trabalhos publicados em livros, artigos de jornais ou revistas, registos referentes a congressos, nacionais e internacionais, bem como outros trabalhos desenvolvidos em ambiente académico como dissertações de mestrado ou doutoramento. Esta pesquisa permitiu adquirir as competências necessárias sobre o tema, nomeadamente no que se refere às soluções existentes, aos materiais e arquiteturas usuais e aos processos de fabrico. Esta fase foi importante, porque permitiu perceber a configuração e o comportamento da solução proposta, bem como, o papel que cada componente do painel desempenha na solução global. Nesta fase, também foi muito importante desenvolver competências em processos associados à análise experimental e em ferramentas de análise numérica, que depois foram utilizados no desenvolvimento do presente trabalho;
- ii.** A componente experimental da presente dissertação é dividida em 3 fases. Numa primeira fase, procedeu-se à caracterização do comportamento mecânico das lâminas em GFRP, PUR e PIR e SCSFRMC. Posteriormente, realizou-se o estudo experimental de modo a avaliar a influência do tipo de preparação da superfície e tipo de adesivo na ligação mecânica entre SCSFRMC e lâminas de GFRP. Todos os resultados experimentais serão devidamente analisados e comentados;
- iii.** Construção de modelos numéricos representativos, realizados a partir de software de cálculo que tem como base o Método dos Elementos Finitos (MEF) de modo a obter a resposta estrutural do painel sanduíche híbrido para diferentes configurações de ensaio e diferentes condições fronteira;
- iv.** Redação do corpo da dissertação com base nos resultados e conclusões obtidas em cada um dos pontos anteriores, sendo explanados os métodos utilizados, resultados obtidos e as conclusões principais.

## 1.4 Estrutura da dissertação

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

No Capítulo 2 descrevem-se os painéis sanduíche propostos e os seus constituintes, os processos de fabrico, os trabalhos relevantes anteriormente já desenvolvidos nesta temática e suas aplicações. Posteriormente, apresenta-se cada um dos materiais que compõem o painel sanduíche híbrido a desenvolver. Apresenta-se ainda um levantamento relativo às características dos sistemas de ligação entre betão e GFRP.

No Capítulo 3 apresenta-se o estudo desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência do tipo de preparação da superfície na ligação mecânica entre o SCSFRMC e lâminas de GFRP. Inicialmente apresenta-se os materiais intervenientes e explica-se todo o programa de ensaios. Seguidamente apresenta-se os resultados obtidos e realiza-se uma análise aos mesmos. Paralelamente ao estudo é também efetuada a caracterização do comportamento mecânico (compressão e flexão) de SCSFRMC.

No Capítulo 4 é detalhada a caracterização do comportamento mecânico (flexão e tração) de provetes pultrudidos em GFRP. Assim, é apresentado o programa experimental relativo a cada ensaio, reúnem-se os resultados obtidos e desenvolve-se a sua análise. O capítulo finaliza com uma análise comparativa entre os diferentes ensaios realizados.

No Capítulo 5 apresenta-se a caracterização do comportamento mecânico (compressão e corte) da espuma de poliuretano (PUR) e de poliisocianurato (PIR), sendo um destes posteriormente incorporado na constituição do painel sanduíche. O capítulo inicia-se com a apresentação dos materiais intervenientes, seguindo-se a descrição do programa experimental. Posteriormente, apresentam-se e comparam-se os resultados obtidos.

No Capítulo 6 apresentam-se as simulações numéricas desenvolvidas com recurso a *software* de elementos finitos (*Abaqus 6.13*), com o objetivo de se obter a resposta estrutural do painel sanduíche híbrido para diferentes configurações de ensaio.

Por último, no Capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões do trabalho efetuado e sugerem-se trabalhos complementares a desenvolver num futuro próximo.

# ESTADO DO CONHECIMENTO

---

### 2.1 Introdução

No presente capítulo apresentam-se várias tipologias de painéis sanduíche compósitos estruturais. São analisados painéis sanduíche híbridos com aplicabilidade no contexto da construção, já desenvolvidos por diferentes investigadores.

No âmbito do projeto “Easyfloor”, já apresentado no Capítulo 1, e com o objetivo de superar a limitação comum dos painéis sanduíche tradicionais, como a sua fraca resistência para pisos estruturais, está a ser desenvolvido um inovador sistema designado por painel sanduíche híbrido. Este deve apresentar um custo competitivo, que resulta da redução do tempo de construção e da otimização de material, assegurando uma solução final que é estruturalmente confiável e ambientalmente sustentável.

O painel sanduíche híbrido proposto é composto por uma lâmina inferior em G/CFRP (*glass/carbon fiber reinforced polymer*), duas almas laterais também em G/CFRP, uma lâmina superior em SCSFRMC (*self-compacting steel fiber reinforced micro concrete*) e um núcleo em PUR (*Polyurethane*) ou em PIR (*Polyisocyanurate*). Por razões técnicas, entre o SCSFRMC e o núcleo existirá uma lâmina de GFRP. A camada superior de SCSFRMC tem como finalidade aumentar a resistência e a ductilidade do painel e permitir uma aplicação fácil dos materiais de revestimento. A utilização desta camada superior de compressão irá também aumentar a rigidez à flexão, o desempenho termo-acústico e a resistência ao impacto do painel, bem como fornecer proteção extra contra incêndio ao respetivo núcleo constituído por PUR/PIR.

De modo a melhorar o comportamento da ligação entre a camada de SCSFRMC e as camadas inferiores realizadas com GFRP, é proposta a utilização de materiais adesivos. Deste modo, são apresentados os diferentes tipos de adesivos estruturais e correspondentes ligações adesivas disponíveis no mercado.

Neste capítulo apresentam-se exemplos de aplicação de diferentes sistemas de ligação de betão a GFRP.

## 2.2 Painéis sanduíche desenvolvidos para aplicações estruturais

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).

Apesar das áreas da reparação e do reforço de estruturas de betão oferecerem o maior potencial para a aplicação imediata de materiais compósitos em aplicações estruturais, o desenvolvimento de novos sistemas estruturais combinando o funcionamento direcional, o baixo peso próprio e o elevado desempenho dos FRP's, com as características mais relevantes dos materiais tradicionais (resistência do betão à compressão), indicia um grande potencial (Karbhari *et al.*, 1999).

Além da leveza, elevada rigidez, resistência e ductilidade, o conforto térmico que estes sistemas estruturais garantem é bastante superior ao dos sistemas estruturais convencionais, pois são eliminadas as pontes térmicas. (Lameiras *et al.*, 2010).

Analisando as soluções propostas, até ao momento, para painéis sanduíche compósitos têm vindo a demonstrar fragilidades, entre as quais se destaca a delaminação intercadas 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 às lâminas.

Os painéis sanduíche compósitos têm vindo a ser usados na construção, fundamentalmente como elemento estrutural. A seguir apresentam-se alguns exemplos de aplicações destes tipos de sistemas compósitos.

Russo e Zuccarello (2007), a partir de um tabuleiro em sanduíche de laminado de GFRP com núcleo em espuma de PVC ou poliéster, realizaram ensaios de flexão em três e quatro pontos, de corte, de compressão e de tração. O estudo experimental e as simulações numéricas mostraram que a previsão teórica da força e do mecanismo de rotura destas estruturas sanduíche podem ser afetadas por erros significativos, especialmente na presença de esforço transversal. Em suma, a rotura ocorre por instabilidade local e existe delaminação do painel no caso de núcleos com espumas de PVC e, no caso de poliéster, provoca roturas de coesão.

Reis *et al.* (2005 e 2008) desenvolveram painéis sanduíche constituídos por laminados de GFRP na parte superior e inferior, separados por um núcleo de espuma de poliuretano e conectados por fibras de GFRP. Este tipo de fibras evitam a rotura por delaminação. Estes painéis são projetados para melhorar a eficiência estrutural e evitar problemas de delaminação, tipicamente exibidos por painéis FRP tradicionais. A pesquisa mostrou que são uma alternativa viável e económica a elementos de construção convencionais. Podem ser considerados em várias aplicações, tais como pontes pedonais.

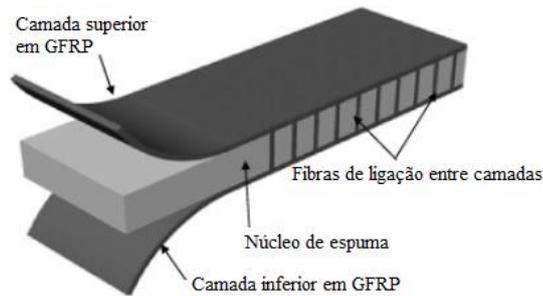


Figura 2.1 – Painel sanduíche proposto por Reis *et al.* (2005 e 2008).

Sharaf *et al.* (2010) estudaram painéis sanduíche de parede, constituídos por lâminas em GFRP e núcleo em espuma, recorrendo a ensaios de flexão em quatro pontos (Figura 2.2). Estes autores propuseram 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. Os resultados indicaram que uma maior densidade do material do núcleo gera um aumento significativo na resistência à flexão última e um aumento da rigidez estrutural do sistema. O escorregamento horizontal na interface do GFRP-núcleo pode acelerar a ocorrência de delaminação do painel sanduíche. Do ponto de vista mecânico, a solução desenvolvida 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, o que limita a viabilidade económica da solução.

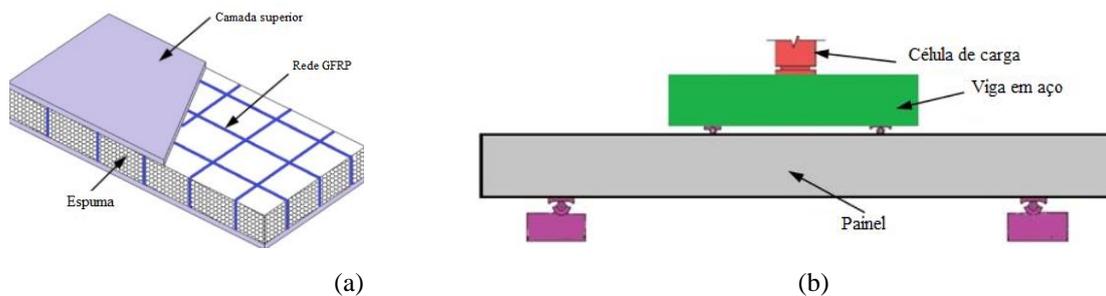


Figura 2.2 – Painel sanduíche proposto por Sharaf *et al.* (2010): (a) Esquema do painel e (b) Ensaio de flexão em quatro pontos.

A nível nacional, foram desenvolvidos projetos de investigação onde a Universidade do Minho participou que comprovam a possibilidade de construir com estruturas sanduíche compósitas. De seguida apresentam-se alguns exemplos.

O projeto “Clickhouse” consistiu no desenvolvimento de um protótipo destinado a zonas de catástrofe e/ou a situações de emergência, construído a partir de materiais compósitos. O protótipo foi executado com painéis sanduíche modulares, constituídos por lâminas em GFRP e núcleo em PUR, conseguindo-se atingir vãos de 3 m para uma sobrecarga de 1.6 kN/m<sup>2</sup>, (Figura 2.3).

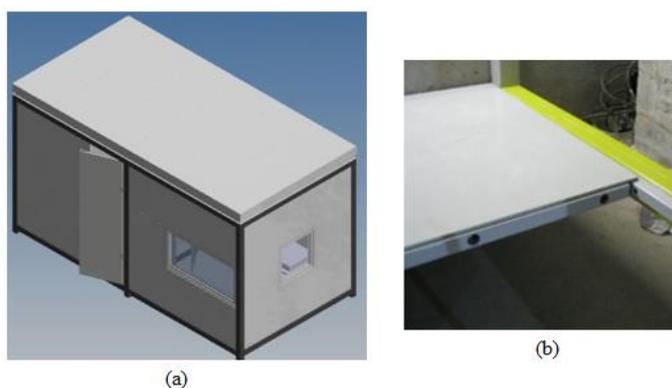


Figura 2.3 – “Clickhouse”: (a) modelo proposto e (b) pormenor da ligação entre o painel sanduíche e perfil GFRP (ALTO Perfis Pultrudidos, Lda.).

No projeto “LEGOUSE”, pretendeu-se desenvolver um edifício pré-fabricado em estrutura sanduíche de custos controlados. Os painéis sanduíche aditados eram compostos por faces em betão autocompactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) e núcleo em poliestireno expandido (EPS) vulgarmente utilizado em Portugal nos sistemas “ETICS”. A ligação entre as duas camadas foi assegurada por conetores em GFRP conseguindo-se atingir vãos máximos de 8 m.

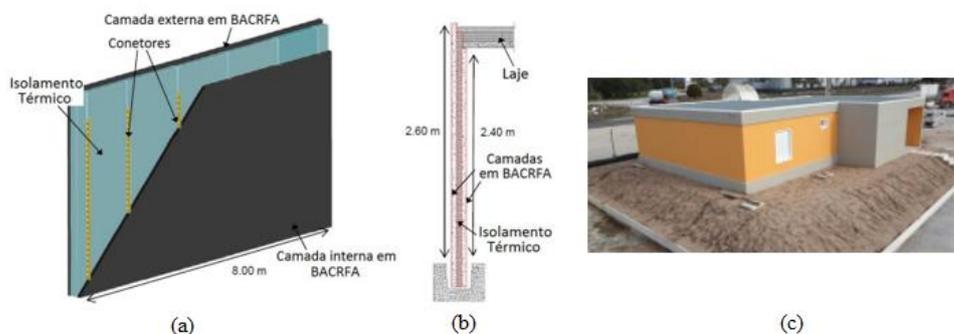


Figura 2.4 – Projeto “LEGOUSE”: (a) painel sanduíche com identificação dos componentes; (b) secção transversal e (c) protótipo construído (Barros *et al.* 2015).

### 2.3 Painéis sanduíche híbridos

As designações utilizadas em painéis sanduíche refletem as diferentes camadas utilizadas na sua constituição. Caso as lâminas sejam compostas por materiais compósitos, está-se na presença de um painel sanduíche compósito. Se as lâminas forem constituídas por materiais diferentes, como por exemplo, os materiais de matriz cimentícia, o painel designa-se híbrido.

As principais vantagens na utilização de painéis sanduíche híbridos, incorporando lâminas de material de origem cimentícia na camada superior de compressão, são: (i) aumentar a resistência e a ductilidade do painel; (ii) aumentar a sua rigidez à flexão; (iii) melhorar o seu desempenho termo-acústico; (iv) melhorar a resistência ao impacto do painel; (v) fornecer proteção extra contra incêndio ao núcleo e (vi) permitir uma aplicação fácil dos materiais de revestimento.

As aplicações comerciais de painéis sanduíche híbridos compósitos são ainda escassas. No entanto, este tipo de soluções apresentam um potencial evidente no mercado da construção, tendo sido desenvolvidos estudos, no sentido de aperfeiçoar e otimizar os métodos de fabrico e o desenvolvimento de novas estruturas compósitas híbridas que contêm FRP e matriz cimentícia na camada de compressão.

Norton (2004) desenvolveu um painel sanduíche híbrido para o tabuleiro de uma ponte. Esse painel era composto por faces em fibra de vidro (E-glass), um núcleo em madeira de balsa, sem ou com treliças em malha de GFRP e uma camada superior de betão. Para melhorar a ligação entre a camada superior de GFRP e a camada de betão foram adotados conectores em aço e compósitos (Figura 2.5).



Figura 2.5 – Painéis desenvolvidos por Norton (2004): (a) painel tipo 2 sem treliça no núcleo e com conectores metálicos e (b) painel tipo 3 com treliça no núcleo e com conectores compósitos.

Da análise dos modos de rotura observados na Figura 2.6 dos painéis sanduíche híbridos, verificou-se que a ligação entre o betão e o GFRP era frágil, para um nível de carga de 77,84 kN no painel tipo 3. No sentido de contornar este tipo de rotura, o autor sugere induzir rugosidade à superfície de GFRP da camada superior ou utilizar adesivo de ligação na interface GFRP-betão, de modo a aumentar a conexão entre estas camadas (Norton, 2004).

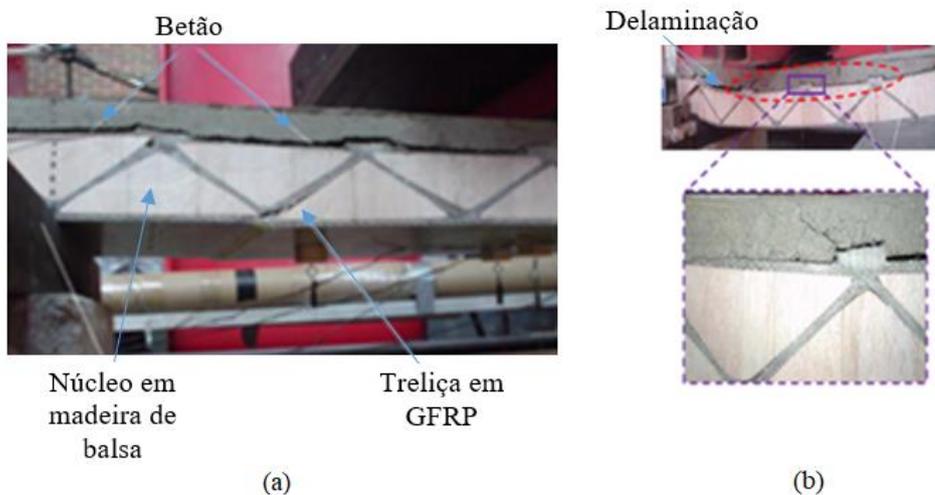


Figura 2.6 – Modos de rotura na interface GFRP-betão do painel proposto por Norton (2004): (a) perda de ligação na interface em análise e consequente rotura por corte do GFRP e (b) delaminação provocada pela rotura da ligação GFRP-betão.

No sentido, de desenvolver uma alternativa às soluções de betão armado convencional, Johnson *et al.* (2006) (Figura 2.7) estudaram o comportamento de tabuleiro inovador 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 ligados por fibras na direção perpendicular formando um material GFRP 3D para toda a seção. O painel possui núcleo de balsa, produzido por infusão a vácuo utilizando resina epoxídica.

Realizaram-se ensaios de flexão em painéis com várias configurações de conexão entre a camada de GFRP e a camada de betão. As seguintes conclusões principais resultaram do estudo realizado: (i) os modos de rotura obtidos dos painéis híbridos estão de acordo com a norma AASHTO; (ii) os autores avaliaram e compararam o comportamento de vários tipos de conectores, tendo verificado que os mais eficientes foram os conectores verticais. No entanto, a ligação foi inadequada, por isso os autores sugerem que se deve usar uma interface rugosa; e (iii) o uso do processo de tecelagem 3D elimina a rotura por delaminação observada em algumas plataformas de pontes realizadas em GFRP e atualmente disponíveis no mercado. Comparando os dois tipos de painéis ensaiados, verificou-se que os painéis sanduíche híbridos tinham cerca do dobro da rigidez e do peso dos painéis constituídos apenas por GFRP.

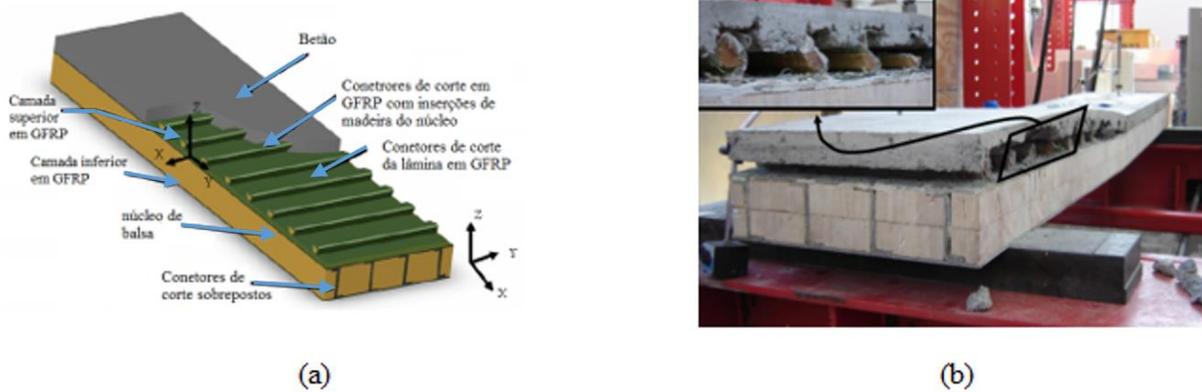


Figura 2.7 – Painel sanduíche híbrido proposto por Johnson *et al.* (2006): (a) representação e constituição e (b) modo de rotura ocorrendo delaminação na interface GFRP/betão.

Uma outra solução, apresentada por Keller *et al.* (2007) (Figura 2.8), consiste num painel híbrido composto com nervuras tipo “T” em GFRP pultrudido sobre o qual é aplicada uma camada de betão leve (LC) e outra camada de betão de elevado desempenho reforçado com fibra (UHPFRC), com menor espessura. Os perfis de GFRP funcionam como elemento resistente de tração enquanto a camada de menor espessura de betão procura absorver os esforços de compressão. O projeto da viga demonstrou que não seria necessário utilizar uma camada de UHPFRC, sendo esta substituída por uma camada de betão normal (NC) na viga experimental. Com esta solução tornou-se o sistema 50% mais leve do que a solução convencional que adotava betão armado.

No estudo foram ensaiadas à flexão 8 vigas, cada uma com vão de 3600 mm, tendo sido testados dois tipos de interface entre o GFRP e o núcleo: (i) em metade dos provetes ensaiados à flexão foi aplicada uma camada de adesivo epoxídico, de forma a melhorar a conexão entre o betão leve e o GFRP; (ii) na outra metade não foi aplicado material adesivo.

Nos provetes onde não foi aplicado adesivo, o esforço de corte foi transmitido apenas pela alma e pelo banzo superior das nervuras do painel de GFRP, enquanto que nos outros provetes, as vigas se revelaram mais eficientes, verificando-se o aumento da capacidade de carga (104% em média), concluindo-se que a aplicação de adesivo foi eficiente. Em ambos os casos a rotura ocorreu por esforço transversal no núcleo, sendo este constituído por betão leve. Nas vigas onde não foi aplicado o adesivo epoxídico verificou-se ainda um deslocamento prematuro na interface GFRP-núcleo apresentando uma rotura dúctil, ao contrário das vigas onde foi aplicado o adesivo, que exibiram uma rotura mais frágil (Keller *et al.*, 2007).

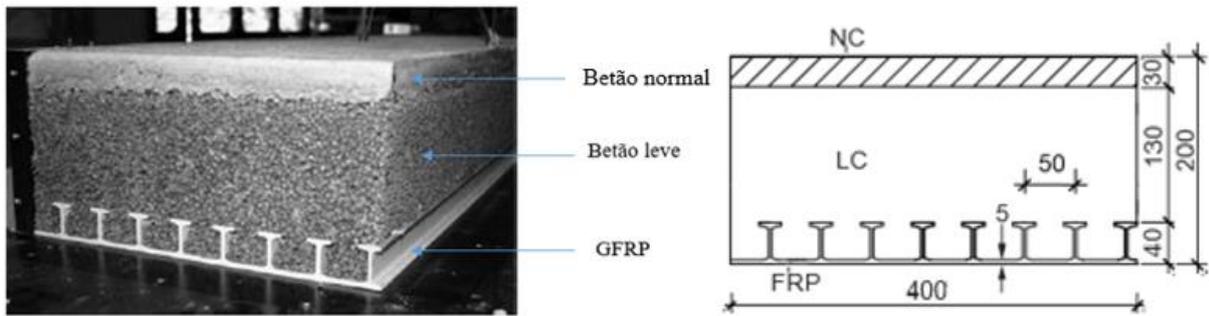


Figura 2.8 – Viga híbrida proposta por Keller *et al.* (2007). Nota: dimensões em [mm].

Liu *et al.* (2011) (Figura 2.9) desenvolveram um painel sanduíche híbrido inovador para pontes, constituído por uma camada inferior de laminado em GFRP pultrudido e com secção transversal trapezoidal, ao qual se associaram nervuras com secção transversal em “T”, que resistem aos esforços de tração, e por uma camada em betão armado na parte superior do painel, com o objetivo principal de resistir aos esforços de compressão. Construíram-se 6 painéis com 3 m de vão, para ensaios de flexão com/sem diferentes armaduras penetrantes e com/sem tratamento da interface GFRP-betão (preenchimento de areia).

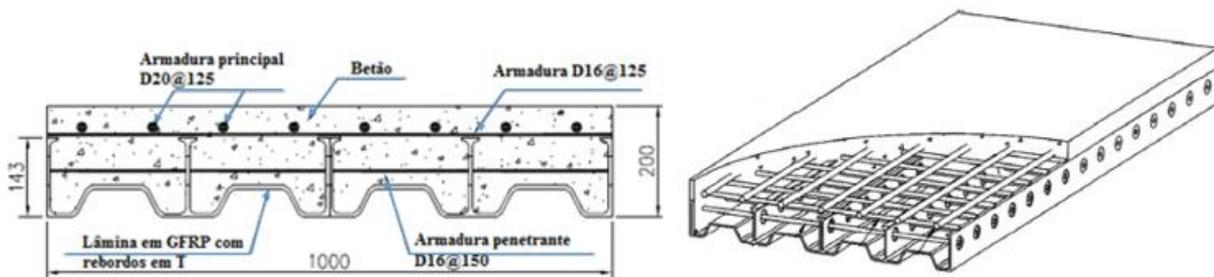


Figura 2.9 – Painel sanduíche proposto e ensaiado por Liu *et al.*, 2011. Nota: dimensões em [mm].

Os modos de rotura apresentados (Figura 2.10) foram: (i) os painéis sem tratamento na interface apresentaram escorregamento em ambas as extremidades, fendas a meio vão e fendas de corte; (ii) os painéis com tratamento da interface não apresentaram escorregamento entre a camada de GFRP e a camada de betão para a carga última. A camada superior de betão sofreu esmagamento para a carga última e observou-se uma fenda diagonal entre o ponto de aplicação da carga e o apoio.

Os resultados experimentais indicaram que: (i) tanto o tratamento superficial da interface como o uso de armaduras penetrantes melhoraram a conexão da interface GFRP-betão, promovendo maior resistência e maior rigidez à flexão do painel; (ii) o tratamento superficial apresentou a maior influência no aumento da resistência e da rigidez à flexão do painel do que a inserção de

armaduras penetrantes e (iii) a posição o eixo neutro não se alterou significativamente com o aumento da carga quando o tratamento da interface foi aplicado. Observou-se que quando não se realizou o tratamento da interface, o eixo neutro baixava com o aumento da carga devido à perda de rigidez que resulta do escorregamento entre as camadas.

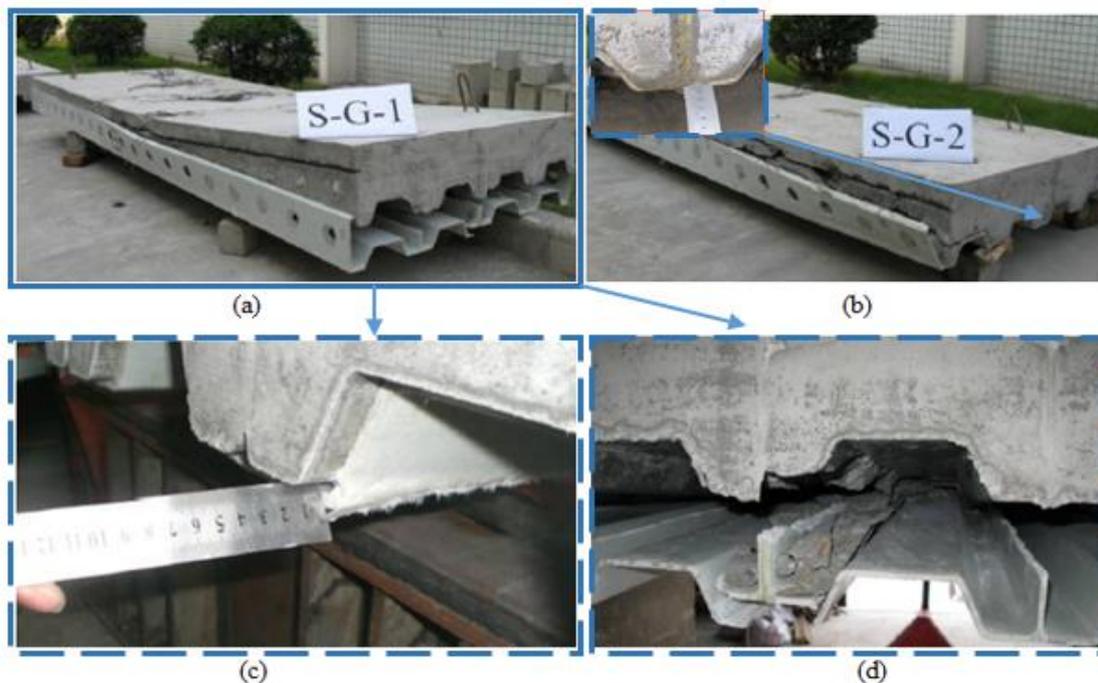


Figura 2.10 – Modos de rotura observados nos painéis híbridos propostos por Liu *et al.* (2011): (a) sem tratamento da interface; (b) com tratamento da interface e pormenor do escorregamento entre o GFRP e o betão; (c) escorregamento entre a interface GFRP-betão e (d) rotura por corte de nervuras em “T”.

No âmbito do projeto de investigação “RehabGFRP”, que decorreu entre 2012 e 2016, foram desenvolvidos painéis sanduíche compósitos e híbridos, compostos por uma camada inferior de tração e nervuras realizados com laminados de GFRP. A utilização de nervuras de GFRP teve como objetivo melhorar a ligação na interface GFRP-núcleo e aumentar a rigidez à flexão do painel proposto. Foram sendo estudados diferentes materiais para o núcleo (PUR, PET e balsa) e formas de aumentar a resistência ao corte deste (Garrido, 2016). Para o painel sanduíche híbrido foi adotado PUR para o núcleo e na camada superior de compressão foi colocada argamassa reforçada com fibras de ultraelevada ductilidade (UDFRM) (Figura 2.11). Esta camada aumenta a resistência à encurvadura local das nervuras transversais de GFRP, contribui para a resistência e ductilidade do comportamento estrutural da laje, aumenta a proteção da laje às temperaturas elevadas e permite a instalação na face superior da laje de elementos cerâmicos ou outros materiais convencionais de acabamento, (Garrido, 2016; Mastali *et al.*, 2014).

A partir de simulações numéricas (FEM) e estudos paramétricos desenvolvidos por Mastali *et al.* (2014), conclui-se que a espessura das nervuras GFRP é o parâmetro que mais influencia a capacidade de carga do painel sanduíche híbrido.

Após a análise numérica foi realizada uma investigação experimental (Mastali *et al.*, 2015), onde foram executados ensaios de flexão em duas lajes, sendo o fabrico do painel híbrido por VARTM. Desde logo, se comprovou que este método de produção é muito eficiente, observando-se um comportamento de rotura pseudo-dúctil. Contudo durante o ensaio, constatou-se uma série de danos antes da rotura, que se apresentam na Figura 2.12.

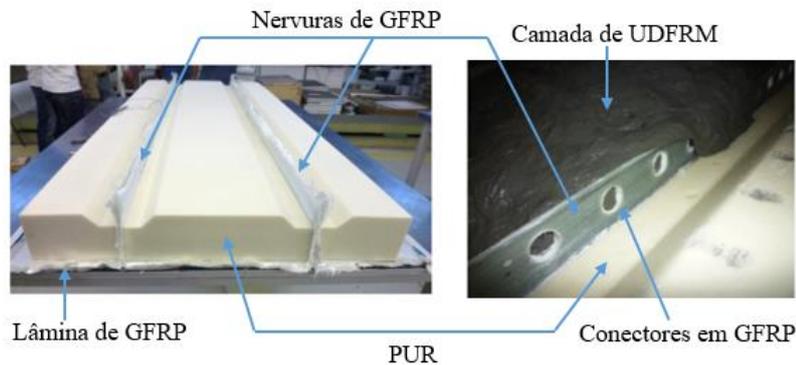


Figura 2.11 – Produção do painel sanduíche híbrido (adaptado de (Mastali *et al.*, 2015)).



Figura 2.12 – Danos sucessivos observados durante o ensaio do painel sanduíche híbrido (adaptado de (Mastali *et al.*, 2015)).

Em suma, os painéis sanduíche híbridos desenvolvidos apresentam um bom funcionamento estrutural e uma boa capacidade de carga para os fins propostos. O custo de fabrico foi elevado e o rigor geométrico dos painéis é difícil de garantir com a técnica de VARTM, dificultando as ligações entre painéis adjacentes.

É de salientar o estudo realizado por Machado (2015), paralelamente à anterior investigação, focado no comportamento de conectores e com o objetivo de otimizar a ligação da interface das diferentes camadas do painel sanduíche híbrido citado anteriormente. Foram estudados três tipos diferentes de ligação para a interface entre nervuras de GFRP e camada de UDFRM. Através de ensaios de *Pull-Out*, comprovou-se que o maior registo de carga máxima e os valores de índice de ductilidade mais elevados foram obtidos para os conectores perfurados de GFRP.

## 2.4 Propriedades dos materiais constituintes do painel sanduíche híbrido

Nesta subsecção apresenta-se uma breve descrição do painel sanduíche compósito em estudo e definem-se as propriedades dos materiais utilizados na sua composição.

### 2.4.1 SCSFRMC

Ao longo dos anos, tem-se assistido ao desenvolvimento e otimização de materiais de matriz cimentícia. Esses esforços têm tido como objetivo aumentar a ductilidade, a resistência a ações mecânicas, de impacto e de fadiga, assim como a durabilidade destes materiais, recorrendo, entre outras estratégias, à introdução de fibras cuja resistência última à tração e flexão são elevadas. Estes materiais são designados por materiais de matriz cimentícia reforçados com fibras (FRC – *Fibre Reinforced Concrete*).

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 de elasticidade e dos super-plastificantes de última geração, têm-se verificado que os FRC's apresentam propriedades em estado fresco e endurecido bastante melhoradas. Posteriormente, surgiram estudos relativos ao betão auto-compactável (SSC, na literatura inglesa *self-compacting concrete*). O betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (SFRSCC) associa os benefícios intrínsecos ao reforço proporcionado pelas fibras (eliminação total ou parcial de armaduras convencionais) com os derivados da não necessidade de aplicação de vibração para aplicação deste compósito. Deste modo, o SFRSCC pode substituir o betão tradicional em aplicações estruturais, permitindo produzir elementos mais leves, mais duráveis e de produção mais célere (Barros *et al.*, 2011).

Para além disso, têm sido desenvolvidos betões ultrafluidos reforçados com mais do que um tipo de fibras de modo a maximizar a contribuição mecânica de cada tipo de fibra, (Stähli, P., 2008).

O UHPFRC (*Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete*) (Figura 2.13) apresenta excelentes propriedades no estado fresco e endurecimento em tração (3-10 ‰ de extensão de pico), sendo muito utilizado em aplicações de reabilitação. Caraterizado por uma mistura ultracompacta com uma permeabilidade extremamente baixa (Roux *et al.*, 1995) e notável resistência mecânica (resistência à compressão >150 MPa e resistência à tração entre 10 e 20 MPa).

A proporção muito baixa de água previne a hidratação completa de uma parte importante do cimento (cerca de 70%) e fornece ao material um comportamento hidrófilo significativo e uma capacidade de auto-cura para microfissura (Charron *et al*, 2004 e Parant, 2003).

Existem vários tipos de UHPFRC com mistura de diferentes tipos e tamanhos de fibra, criando assim um reforço multinível que induz o endurecimento significativo da tensão de tração. (Habel, 2004, Denarié, 2005 e SAMARIS D25b, 2006).

Como o UHPFRC pode apresentar um comportamento com endurecimento à tração, a sua utilização no presente projeto pode ser adequada. A utilização do UHPFRC permite obter uma camada muito resistente e impermeável. A sua utilização em elementos pré-fabricados permite reduzir ou evitar o uso de armaduras ordinárias devido à resistência à tração conferida pelas fibras de aço, o que conduz a elementos mais esbeltos e leves.

Uma desvantagem importante a assinalar é que este material exhibe tipicamente elevada retração autogénea devido à relação água/ligante bastante baixa, utilização de adições extremamente finas e sem adição de agregado grosso.

Embora o UHPFRC seja um material de construção promissor, a sua utilização prática ainda está no início em virtude das suas características não estarem totalmente estabelecidas. Isto é particularmente verdade no que se refere ao conhecimento limitado sobre o desenvolvimento das propriedades mecânicas nas primeiras idades, as deformações provocadas por retração e fluência e, o seu impacto na durabilidade.

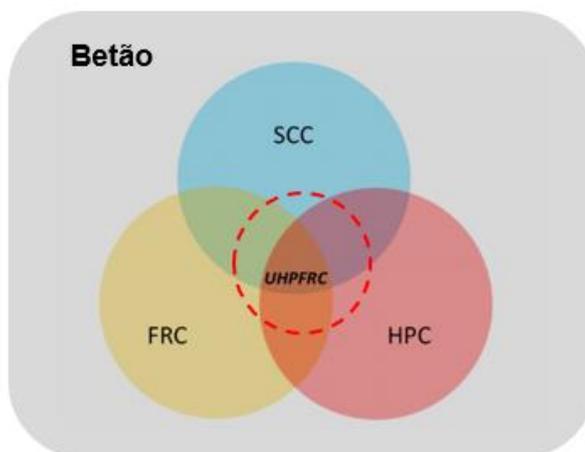


Figura 2.13 – Representação dos materiais base para desenvolver o SCSFRMC do presente projeto (Escusa *et al.*, Projeto “Easyfloor”, 2017).

## 2.4.2 Ligações adesivas

Os adesivos são materiais desde há muito existentes na natureza. São de origem natural e podem ser originados tanto por plantas (caso da goma-arábica) como pelos próprios seres-vivos que os utilizam em seu benefício. O homem, apercebendo-se das vantagens da utilização deste tipo de material, começou a aplicá-lo, havendo registos do seu uso desde quinze séculos a.C. no Egito. Com o passar do tempo, e a existência de novas necessidades, tornou-se relevante a evolução das ligações adesivas. Nos anos 40 do Séc. XX nasceram os primeiros adesivos sintéticos poliméricos que permitem melhorar as propriedades dos adesivos naturais e aumentar a sua gama de aplicabilidade (Pinto, 2007).

À época, os adesivos apresentavam bastantes limitações. Por exemplo, eram frágeis e fraturavam com facilidade. Com base em alguns avanços científicos e tecnológicos, foi possível, na altura, introduzir polímeros com boa tenacidade na composição química dos adesivos e criar com sucesso ligações adesivas em materiais como madeiras e metais (Silva *et al.*, 2007). Desde então, têm sido realizados esforços no sentido de melhorar as características mecânicas dos adesivos de forma a competirem com outras formas de união.

Existem diversos critérios de agrupamento dos adesivos, podendo estes serem divididos quanto à (Ribeiro, 2012): (i) origem, (ii) família (classificação baseada na composição química), (iii) modo de apresentação, (iv) tipos de aderentes mais apropriados em função das características do substrato, (v) processo de endurecimento, (vi) comportamento perante solicitações, (vii) resistência, (viii) tempo de cura e (ix) preço.

Normalmente, uma junta adesiva pode estar sujeita a tensões de tração e de corte, encontrando-se na maior parte dos casos sujeita a ambas simultaneamente, obtendo-se assim um modo de carregamento misto.

### Caraterização de adesivos estruturais

Os adesivos estruturais apresentam um elevado desempenho mecânico. Esta classificação é aplicada quando os adesivos apresentam uma elevada resistência mecânica, em que a tensão de rotura ao corte é superior a 6,9 MPa (Petrie, 2000), o que lhes permite servir como uma alternativa a outros materiais de ligação, como parafusos ou soldadura, em aplicações permanentes. Estas ligações superam, muitas das vezes, as ligações mecânicas em diversos aspetos, tais como: melhor distribuição de tensões, aumento da rigidez das estruturas, boa relação resistência/peso, melhor aparência, gama alargada de tipos de materiais a unir, entre outros. Contudo, apresentam também desvantagens, sendo estas: dificuldade em garantir que o

adesivo trabalha maioritariamente ao corte e dificuldade em evitar tensões localizadas, influência da preparação superficial, reduzida resistência à temperatura e humidade, entre outras, (Silva *et al.*, 2007 e Carbas, 2008).

### **Juntas adesivas**

A junta adesiva é obtida pela ligação de pelo menos duas superfícies de materiais sólidos, a partir da propriedade de adesão de um determinado adesivo ligante, (Cognard, 2005). As juntas adesivas são uma ótima substituição, em certas aplicações, de outros métodos tradicionais de ligação, como a soldadura e a fixação por parafusos. Estes podem danificar a estrutura que estão a conectar, provocando zonas mais frágeis sujeitas a altas concentrações de tensão e podendo até danificar o tratamento de proteção que tenham sido aplicados, (Carbas, 2008). Quando comparadas com outros métodos de ligação, as juntas adesivas geralmente apresentam um menor peso global, preços acessíveis e em alguns casos conseguem acompanhar ou até melhorar a resistência da junta. A Tabela 2.1 apresenta as principais vantagens e desvantagens das juntas adesivas comuns.

Tabela 2.1 – Juntas adesivas comuns: vantagens e desvantagens (adaptado de Mortensen, 1998).

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Melhor vedação;</li> <li>- Melhor acabamento;</li> <li>- Melhor eficiência na transferência de carga;</li> <li>- Melhor resistência à fadiga;</li> <li>- Melhor eficiência aerodinâmica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Preparação da área de aplicação do adesivo é crítica para a resistência da junta;</li> <li>- Baixa resistência para cargas de arrancamento;</li> <li>- Não é desmontável;</li> <li>- Rotura frágil;</li> <li>- Capacidade limitada de resistência a altas temperaturas;</li> </ul>

Para obtermos uma ligação precisamos de obter uma adesão, sendo este um fenómeno físico-químico inerente a mais do que um material, que atua nas imediações da zona de interface. A adesão depende das propriedades dos materiais envolvidos na união, do estado das superfícies a ligar e é bastante influenciada pelo meio envolvente, principalmente temperatura e humidade.

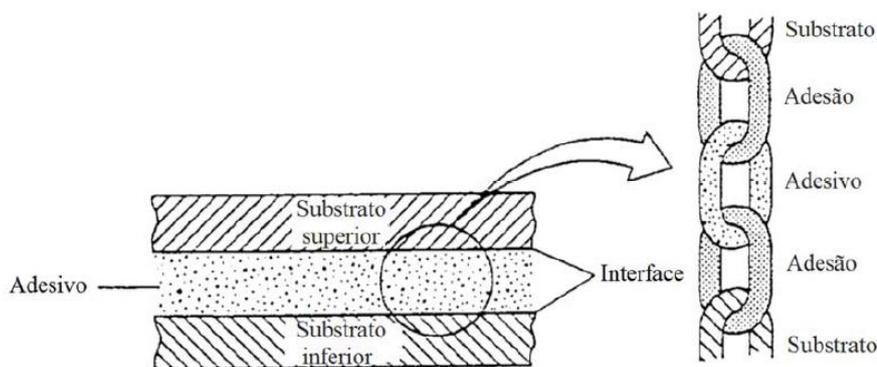


Figura 2.14 – Representação esquemática de uma ligação adesiva e correspondente junta (adaptado Petrie, 2000).

A distribuição de esforços em juntas adesivas não é uniforme, havendo sempre zonas mais propícias à concentração de tensões. Esta ocorre em zonas de descontinuidade geométrica e nas extremidades da camada de adesivo, conforme se pode verificar na Figura 2.15 a). Estes fenómenos limitam a resistência das juntas. No entanto, estas concentrações de tensões podem ser suavizadas utilizando um adesivo mais flexível (Figura 2.15 a)), ou aumentando a sua espessura (Figura 2.15 b)).

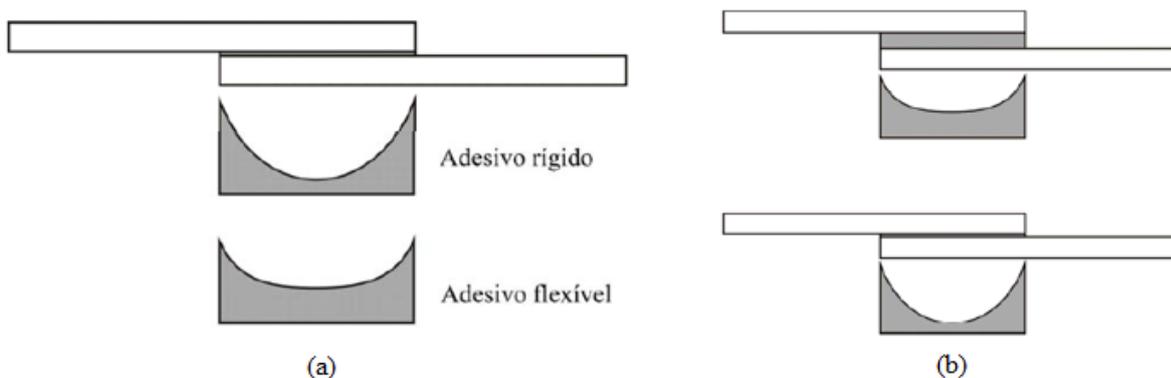


Figura 2.15 – Distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição para juntas adesivas: (a) adesivos rígidos e flexíveis e (b) diferentes espessuras de adesivo, (Silva *et al.*, 2011).

Existem diferentes modos de carregamento fundamentais no estudo das ligações adesivas, tais como: tração, corte, clivagem e arrancamento, (Silva *et al.*, 2007).

Os modos de rotura mais relevantes foram identificados por Fernandes (2012) e Constante (2014):

- Rotura adesiva, ao contrário do tipo de rotura anteriormente referido, ocorre quando o adesivo descola do substrato/sobreposição, na zona de interface. Este tipo de rotura pode

- surgir quando a preparação de superfície não foi eficaz, quando se fez a seleção errada do adesivo ou mesmo quando existe um processo de cura que não é o adequado;
- Rotura coesiva pelo adesivo dá-se quando existe uma quebra da junta apenas pelo interior do adesivo, sem contacto com as superfícies do aderente. Este modo de rotura, indica que a preparação das superfícies dos aderentes foi bem sucedida, isto porque a interface entre o adesivo e os aderentes se manteve intacta. Também indica que o adesivo selecionado foi o indicado para a aplicação analisada (caso tenha cumprido os objetivos em termos de resistência);
  - Rotura no aderente (coesiva) acontece quando o material dos substratos cede, antes do próprio adesivo ou da sua adesão aos substratos. As causas para o aparecimento deste tipo de rotura podem estar relacionadas: fraca resistência do material dos substratos relativamente ao esforço aplicado (em comparação com o adesivo) e a existência de algum defeito na constituição do aderente que ponha em causa a sua resistência, ou caso a geometria da junta seja desfavorável à uniformização de tensões em certas zonas do substrato;
  - Rotura mista, que consiste na combinação entre rotura adesiva e rotura coesiva no adesivo. Este tipo de rotura é bastante comum e as causas da sua origem podem dever-se à preparação superficial não uniforme, ao processo de cura não adequado e à concentração de tensões em determinadas zonas.

A Figura 2.16 apresenta os modos de rotura comuns quando se recorre a ligações de juntas adesivas.

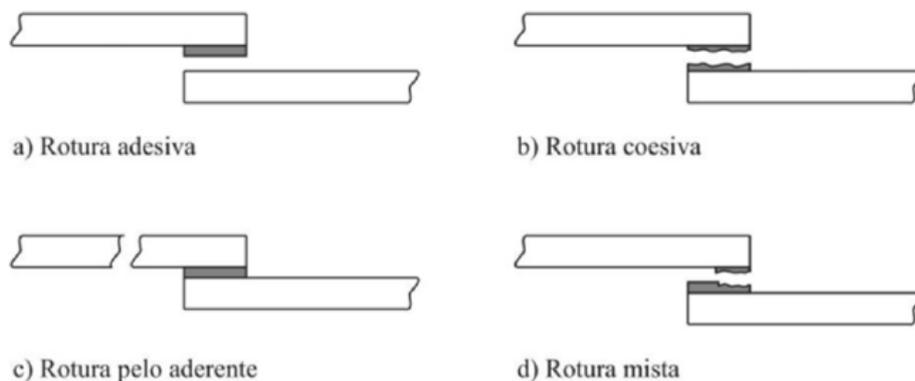


Figura 2.16 – Modos de rotura em juntas adesivas, (Azevedo, 2014).

### **Adesivo na interface núcleo-GFRP**

A adesão das lâminas em GFRP ao núcleo deve promover a transmissão de tensões entre ambos os materiais, garantindo o funcionamento estrutural do painel sanduíche híbrido. Como em todas as ligações adesivas, deve garantir-se que a resistência da ligação é superior ou igual à resistência dos materiais do núcleo ou das lâminas.

Os adesivos de ligação mais comuns são os de poliuretano de um ou dois componentes. Os de um componente são mais apropriados para os núcleos flexíveis e os de dois para núcleos rígidos. Na escolha do tipo de adesivo, deve-se ter em conta a compatibilidade química entre os materiais, as suas características mecânicas e a resistência ao fogo e temperatura.

A escolha do método de fabrico influencia o adesivo a adotar para a ligação. Podem-se distinguir dois grupos associados ao método de fabrico: i) quando as faces e o núcleo são produzidos separadamente, o adesivo é posteriormente usado para unir as camadas; ii) quando as lâminas FRP e o núcleo são produzidos ao mesmo tempo numa linha de montagem, sendo 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/m<sup>2</sup> (Davies, 2001).

### 2.4.3 Polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP)

Os materiais compósitos surgem no setor da Construção Civil, como consequência do aumento dos preços dos materiais utilizados tradicionalmente, como o betão armado e o aço, ao que acrescem, as limitações desses materiais, a crescente exigência da indústria e a procura de estruturas com fim arquitetónico. Isto torna as construções “mais leves”, tendo-se verificado um grande desenvolvimento de novos materiais compósitos, (Mendes *et al.*, 2011).

Os FRP's destacam-se pelas suas vantagens como sejam, a sua elevada resistência mecânica, a reduzida densidade, a elevada durabilidade em ambientes agrestes, a reduzida condutibilidade térmica e a reduzida necessidade de manutenção. No entanto, estes materiais apresentam fatores que tornam a sua aplicação na prática ainda um pouco reduzida, como o seu comportamento frágil e reduzido módulo de elasticidade, evidenciado sobretudo quando se trata de GFRP. Um outro fator, pelo o qual estes materiais ainda não são muitos utilizados, assenta nos custos superiores aos dos materiais tradicionais. No entanto, é importante realçar que este tipo de material pode ser particularmente resistente em ambientes agressivos, podendo esta característica ser um fator preponderante (Correia, 2004).

#### Constituintes e propriedades gerais

Os perfis pultrudidos de fibra de vidro, ou perfis de GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*) são elementos estruturais compósitos constituídos por fibras de vidro, embebidas numa matriz polimérica, normalmente de poliéster ou viniléster. Integram-se no grupo dos elementos que utilizam materiais plásticos reforçados com fibras, ou materiais FRP's (*Fibre Reinforced Polymer*), (Correia, 2004).

O GFRP utilizado no presente projeto pertence ao grupo dos FRP's e é produzido por pultrusão, obtendo-se assim custos de produção bastante competitivos. O seu bom comportamento mecânico potencia-o como material estrutural, (Bank, 2006). Em relação aos materiais tradicionais, apresenta vantagens, das quais se destacam: o reduzido peso próprio, a elevada resistência mecânica e a elevada durabilidade. Concretamente, a utilização de elementos de GFRP apresenta como vantagens, face às chapas de aço, uma maior facilidade de aplicação, um menor peso próprio e uma maior resistência a ambientes corrosivos. Por comparação com a utilização de elementos em CFRP, não obstante ser uma solução menos resistente e menos rígida, apresenta um custo significativamente mais baixo, (Correia, 2004).

Na Tabela 2.2 comparam-se as principais vantagens e desvantagens dos materiais tradicionais (betão armado, aço) e dos perfis de GFRP.

Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens dos perfis de GFRP pultrudidos (ALTO; Correia, 2004).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reduzido peso próprio;</li> <li>– Elevada relação entre a resistência mecânica e o peso próprio;</li> <li>– Excelente resistência à corrosão;</li> <li>– Facilidade no transporte para o estaleiro e instalação em obra;</li> <li>– Possibilidade de produzir qualquer forma estrutural;</li> <li>– Elevada resistência à fadiga;</li> <li>– Excelente isolamento elétrico, térmico e magnético;</li> <li>– Facilidade de pigmentação;</li> <li>– Estabilidade dimensional que se traduz num coeficiente de dilatação térmico baixo e resistência ao calor e ao frio;</li> <li>– Baixos custos de manutenção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reduzido módulo de elasticidade;</li> <li>– Problemas associados à fluência;</li> <li>– Elevada deformabilidade;</li> <li>– Comportamento frágil;</li> <li>– Necessidade do desenvolvimento de novas formas estruturais e sistemas de ligação;</li> <li>– Ausência de regulamentação específica;</li> <li>– Custos iniciais ainda pouco competitivos na maior parte das aplicações.</li> </ul>

A Figura 2.17 apresenta esquematicamente a constituição e disposição típica das camadas que constituem um perfil pultrudido. À superfície de cada laminado são posicionados véus de superfície (*surfacing veils*), que são mantas de reforço, normalmente constituídas por fibras dispostas aleatoriamente, contendo um teor em resina superior às mantas interiores, destinando-se a proteger as fibras dos agentes atmosféricos de degradação. Os reforços, colocados na zona central do laminado, combinam as mechas de filamentos contínuos e paralelos (*rovings*) proporcionando o reforço longitudinal e as mantas com fibras dispostas em várias direções (*mats e fabrics*), constituem o reforço na direção transversal e ao corte.



Figura 2.17 – Representações da disposição típica das camadas num compósito pultrudido (adaptado de (Correia, 2013)).

De uma forma geral, os perfis pultrudidos de fibra de vidro são elementos compósitos constituídos por fibras de vidro embebidas numa matriz polimérica. As resinas termoendurecíveis como o poliéster insaturado, o viniléster, os epóxidos e as fenólicas podem ser utilizadas na matriz polimérica, (Bank, 2006). Na Tabela 2.3, encontram-se as propriedades típicas das principais resinas.

Tabela 2.3 – Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecíveis (adaptado de Ascione *et al.*, 2016b; Correia, 2004).

Propriedades	Poliéster	Viniléster	Epóxi	Fenólicas
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	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

As propriedades dos perfis GFRP, à semelhança da generalidade dos FRP's, dependem essencialmente das características dos seus materiais constituintes (tipo, teor e formas da fibra de reforço e tipo de matriz polimérica), da orientação, processo de fabrico do perfil, da interação entre as fibras e a matriz, entre outros. Na Tabela 2.4 são apresentados os intervalos típicos das propriedades dos perfis GFRP produzidos pelos maiores fabricantes. Refere-se que as propriedades são mais elevadas na direção da pultrusão do que em qualquer outra direção (anisotropia).

Tabela 2.4 – Intervalos usuais das principais propriedades do material utilizado em perfis de GFRP (Correia, 2004).

<b>Propriedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>Direção paralela às fibras</b>	<b>Direção transversal às fibras</b>
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	

### Campos de aplicação dos perfis GFRP

Os perfis pultrudidos de GFRP começaram por ser utilizados maioritariamente 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, gradis para pavimentos, plataformas, saneamento básico, estações de tratamento de águas residuais, painéis de fachada, etc.); (iv) no setor do lazer e desporto (vara de salto, banco de jardim, etc.) e (v) na indústria petroquímica, (ALTO; Correia, 2004).

A Figura 2.18 apresenta alguns exemplos de aplicação, citados anteriormente.

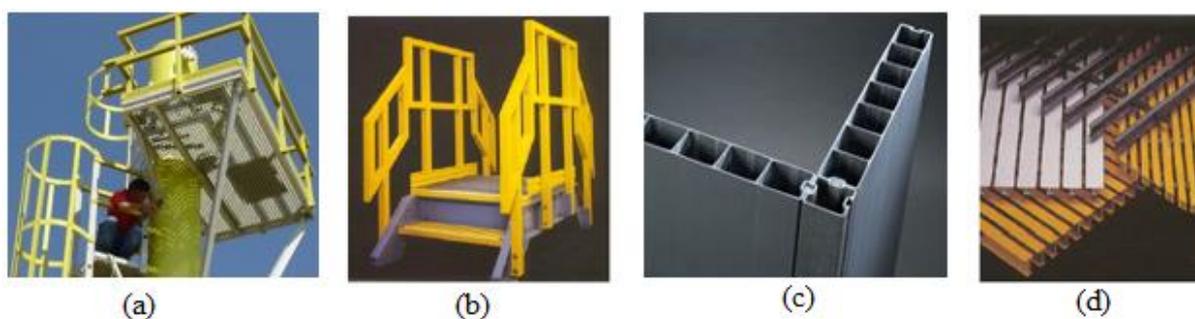


Figura 2.18 – Utilização de perfis de GFRP em estruturas secundárias: (a) Plataforma de trabalhos com escada isolante e guarda-corpos (ALTO); (b) escadas com guarda-corpos (STRONGWELL); (c) Painel (STRONGWELL) e (d) gradis para pavimentos (STRONGWELL).

A partir da 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.

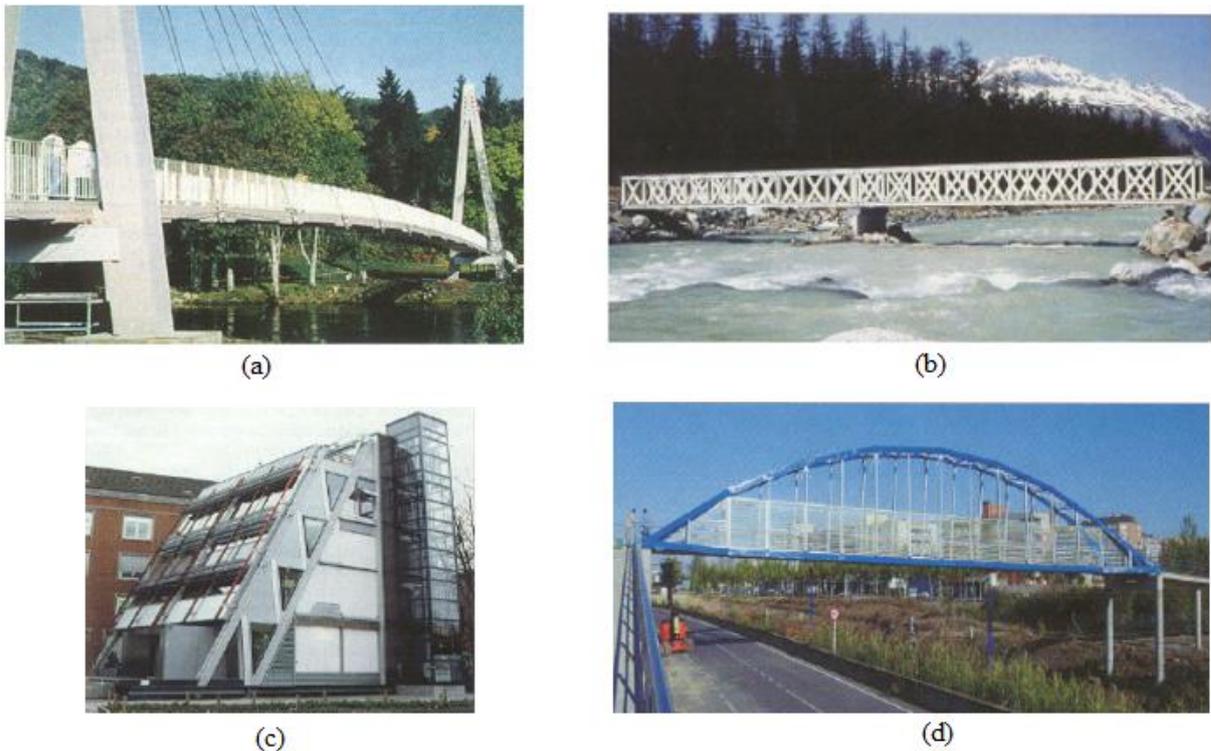


Figura 2.19 – Utilização de perfis de GFRP em estruturas principais: (a) Ponte Aberfeldy (1992) – primeira ponte pedonal 100% compósita; (b) Ponte Pontresina (1997) – utilização de ligações coladas, pela primeira vez; (c) Edifício EyeCatcher (1999) – referência da utilização de perfis de GFRP em edifícios e (d) Ponte de Lérida (2001) – sobrepõe três importantes eixos de transportes. (Correia, 2004);

#### 2.4.4 Poliuretano (PUR) e poliisocianurato (PIR)

Os materiais utilizados no estudo do núcleo do painel sanduíche híbrido são o poliuretano (PUR) e o poliisocianurato (PIR), sendo estes caracterizados por núcleos homogêneos, em que as propriedades mecânicas são iguais em ambas as direções. No geral, quanto maior a densidade dos núcleos, maior é a resistência mecânica e a condutibilidade térmica (Allen, 2013; Thomsen *et al.*, 2006). Hoje em dia, os materiais que fornecem os mais altos valores de isolamento térmico são mais rígidos (Davies, 2001).

O poliuretano (PUR) e o poliisocianurato (PIR), amplamente utilizados em espumas rígidas e flexíveis, são polímeros termoendurecíveis. O PUR e PIR diferem entre si apenas na proporção em que os componentes primários (*polyol* e isocianato) assumem na constituição do material, havendo mais isocianato no PIR do que no PUR. A quantidade de *polyol* é igual em ambos os materiais. Face à panóplia de formas, densidades e características possíveis, as espumas de PUR e PIR fazem parte dos materiais homogêneos mais utilizados na constituição do núcleo de

painéis sanduíche. A densidade normalmente utilizada nestes materiais para a construção está na ordem dos  $35 \pm 50 \text{ kg/m}^3$  (Davies, 2001).

As principais vantagens do PUR e PIR são essencialmente o seu baixo peso específico, o bom isolamento térmico e acústico, um rácio entre resistência à compressão e peso específico elevado e a memória elástica. No entanto, são sensíveis à temperatura e humidade relativa, sobretudo para carregamentos permanentes devido à fluência. 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.

Ao nível do desempenho ao fogo, enquanto que o PUR se decompõe gradualmente quando exposto a temperaturas superiores a  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , o PIR geralmente sustenta temperaturas acima de  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  antes da decomposição do material começar, este também forma uma camada carbonosa protetora estável que melhora significativamente a resistência ao fogo. Em suma, as espumas de PIR apresentam normalmente propriedades térmicas superiores e desempenho ao fogo, mas apresentam alta fragilidade (Davies, 2001).

Concluindo, as características mecânicas e a condutibilidade térmica variam consoante a formulação da espuma e o seu processo de fabrico, sendo que aumentam com a densidade. A Figura 2.20 apresenta uma gama indicativa de valores para as resistências à compressão, tração, corte, módulo de elasticidade correspondente 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.

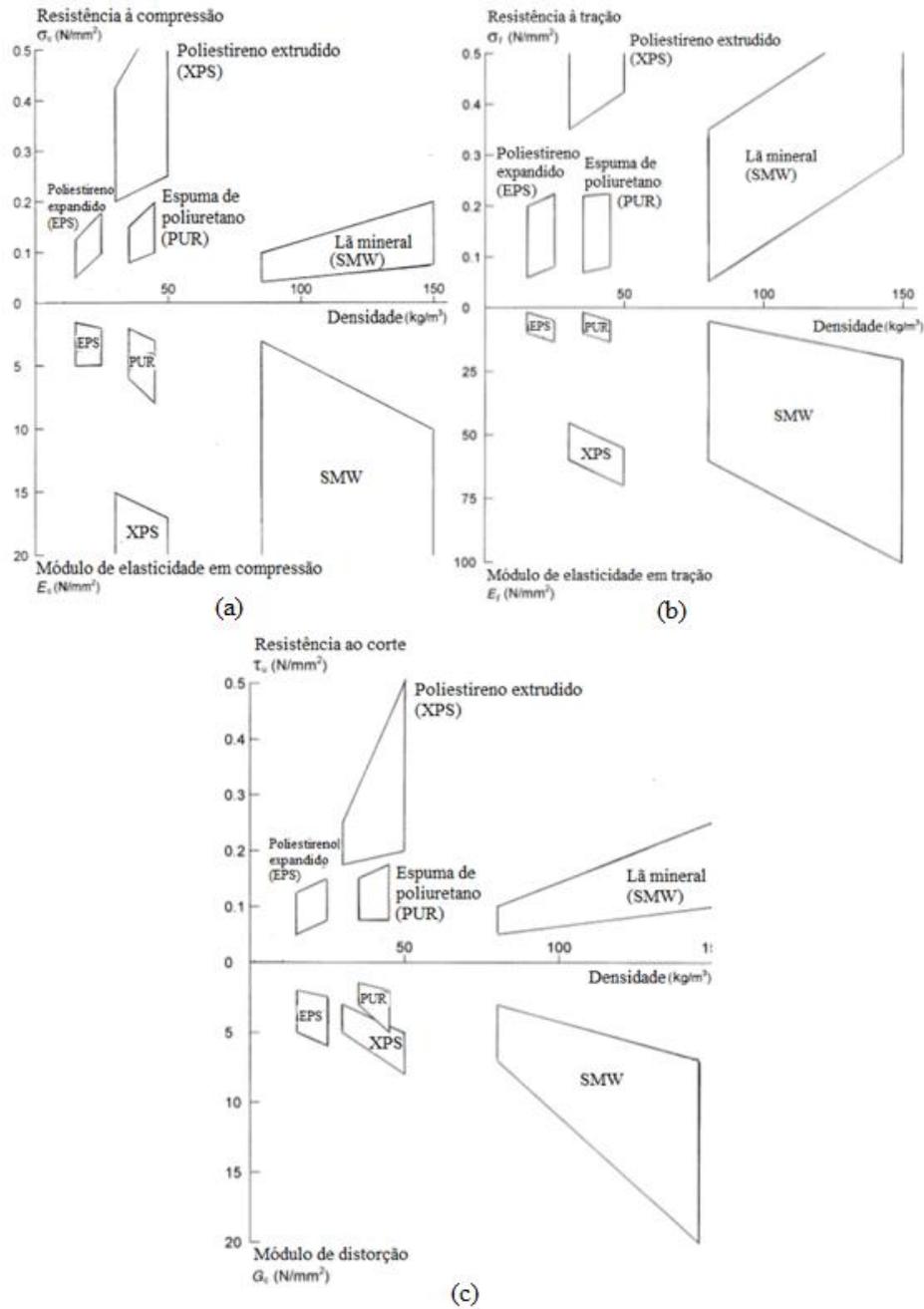


Figura 2.20 – Propriedades mecânicas dos materiais mais utilizados no núcleo de painéis sanduíche: (a) compressão; (b) tração e (c) corte (adaptado de (Davies, 2001)).

## 2.5 Sistemas de ligação do betão a GFRP

No âmbito do projeto onde se enquadra a presente dissertação, pretende-se desenvolver um painel híbrido onde se pretende promover a transferência de esforços entre o perfil em GFRP e a laje de betão, garantindo o funcionamento misto do conjunto. Deste modo, é importante estudar a ligação entre o SCSFRMC a lâminas de GFRP.

No que se segue, apresentam-se alguns estudos encontrados na literatura onde se procurou estudar/desenvolver a ligação entre materiais de origem cimentícia e FRP.

No estudo levado a cabo por Deskovic *et al.* (1995) (Figura 2.21), apresentam-se vigas híbridas constituídas por GFRP, uma camada de compressão em betão e um laminado de CFRP na zona de tração. A forma de produzir elementos estruturais, suportada por uma técnica de fabrico automatizada, foi a pultrusão. Na face inferior da viga foi aplicado um laminado de CFRP garantindo maior rigidez à flexão e maior resistência. A solução desenvolvida englobava uma camada superior em betão, confinada lateralmente por GFRP, sendo esta espessura dimensionada de modo a resistir aos esforços gerados pela betonagem e, posteriormente, resistir às tensões de corte geradas entre estes dois materiais. O perfil de GFRP apresenta uma secção tubular, permitindo assim beneficiar de um bom comportamento à instabilidade lateral. Nestes estudos, verificou-se que a rotura ocorria devido à separação prematura do betão na interface betão-GFRP. Com intenção de melhorar as ligações desta interface reforçou-se a viga com recurso a conectores, resultando assim, num mecanismo de rotura das vigas à flexão que se iniciava com a rotura do CFRP (pseudo-dúctil).

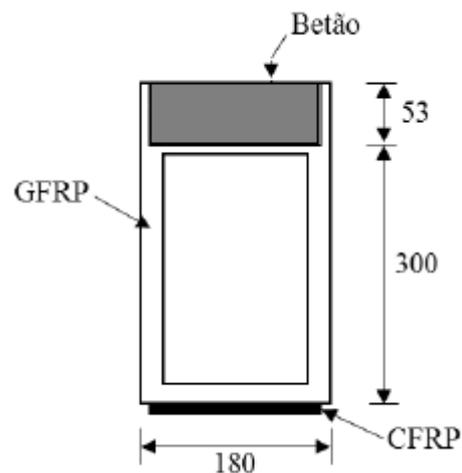


Figura 2.21 – Viga híbrida desenvolvida, (Deskovic *et al.*, 1995). Nota: dimensões em [mm].

Com o intuito de investigar o comportamento misto betão-FRP, Canning *et al.* (1999) e Hullat *et al.* (2000) (Figura 2.22) desenvolveram estudos em vigas tendo propostos dois tipos de secção transversal, (i) retangular e (ii) em forma de “T”, respetivamente.

No caso da secção transversal retangular, esta era constituída por um perfil de GFRP retangular, com paredes construídas por painéis sanduíche preenchidos com espuma. O betão colocado na camada de compressão encontrava-se circunscrito ao GFRP, com exceção da face superior da respetiva camada. Na parte inferior da viga, o reforço era assegurado com um composto

unidirecional de CFRP combinado com um compósito de GFRP. Investigou-se o desempenho de seis soluções diferentes que procuraram avaliar a resistência a esforços de corte. Essa capacidade resistente era garantida por conexões de geometria indentada, por parafusos ou por adesivos. Determinou-se que a melhor técnica seria usar o método de ligação adesiva húmida entre o betão fresco e o GFRP.

A secção transversal em “T” era constituída por um perfil de GFRP com reforços transversais. O betão colocado na camada de compressão encontrava-se circunscrito ao GFRP, com exceção da face superior da respetiva camada. Na parte inferior da viga, o reforço era assegurado com um compósito unidirecional de CFRP combinado com um compósito de GFRP. A secção foi projetada para sofrer rotura por corte nas paredes de GFRP ou destacamento da camada de betão na interface betão-GFRP. A partir de ensaios experimentais observou-se uma rotura frágil, sendo que esta ocorreu por corte nas paredes de GFRP.

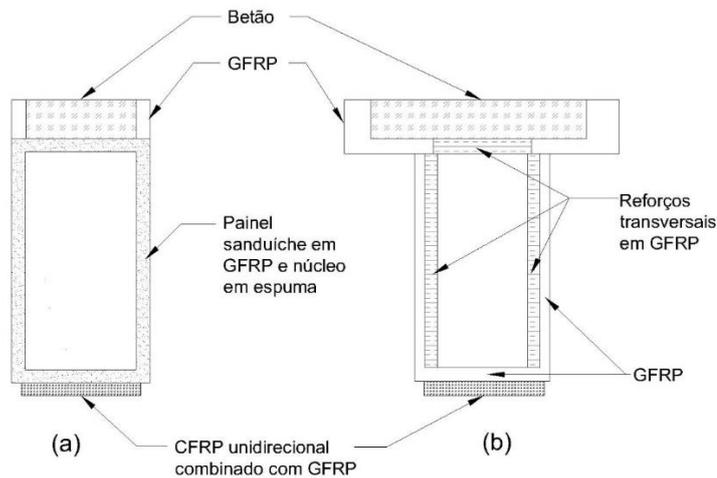


Figura 2.22 – Vigas desenvolvidas: a) (Canning *et al.*, 1999) e b) (Hullat *et al.*, 2000).

De modo semelhante às soluções apresentadas anteriormente, Nordin H. e Taljsten B. (2004) (Figura 2.23) propuseram e testaram à flexão perfis de GFRP com secção transversal em “I”. Nesse estudo foram ensaiadas três tipologias de vigas à flexão em 4 pontos de carga.

- i. A primeira tipologia estudada era apenas constituída pelo perfil de FRP (Viga A);
- ii. A segunda tipologia consistia numa viga mista composta por betão colocado na zona de compressão, ligado ao perfil de FRP através de conetores (Viga B);
- iii. A última tipologia adotada pelos autores do estudo era semelhante à anterior, alterando-se apenas o meio de conexão entre os diferentes materiais, substituindo os conetores por um adesivo epoxídico (Viga C).

Conforme previsto, os modos de rotura foram diferentes para as três vigas estudadas. Concluiu-se que as vigas híbridas compostas por FRP e betão, para além de suportarem uma força superior na rotura, também apresentavam elevada rigidez.

Os sistemas de ligação analisados foram eficientes, no entanto a ligação com adesivo epoxídico conferiu à estrutura maior rigidez e um ligeiro aumento da resistência comparativamente com a ligação que recorria a conetores.

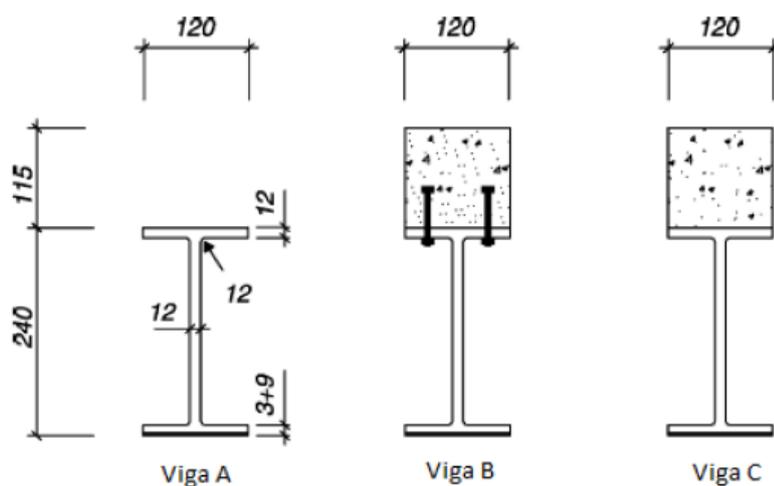


Figura 2.23 – Seções das vigas apresentadas por Nordin e Tajsten (2004). Nota: dimensões em [mm].

Sistemas híbridos para aplicação em elementos estruturais de tabuleiros de pontes foram desenvolvidos por Seible F. *et al.* (2004), sendo concebidos diferentes tipos de conexão de corte, nomeadamente:

- i. *Carbon Shell System*, sistema composto por tubos em CFRP preenchidos por betão leve, com nervuras interiores, permitindo melhorar a aderência entre estes materiais. Um exemplo de aplicação deste sistema apresenta-se na superestrutura dos Kings Stormwater Channel Bridge (Figura 2.24 b)), tornando a construção da ponte mais fácil por reduzir o peso da estrutura. O tabuleiro foi constituído por painéis pré-fabricados de FRP, ligados a vigas, encaixando-os aos conectores no sistema em casca e de seguida procede-se ao enchimento do sistema com betão leve. Perfazendo assim a estrutura apresentada na Figura 2.24.

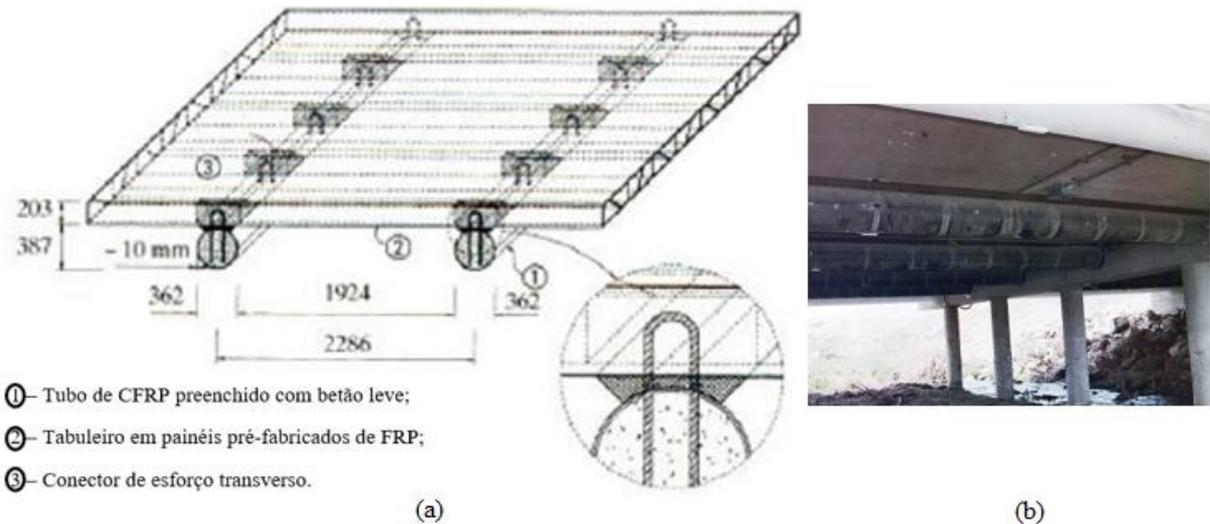


Figura 2.24 – *Carbon Shell System* (Seible *et al.*, 2004): (a) sistema proposto e (b) Kings Stormwater Channel Bridge. Nota: dimensões em [mm].

- ii. *Hybrid Tube System*, sistema composto por tabuleiro construído em GFRP, encaixado no banzo superior de vigas ocas de FRP permitindo assim, a distribuição de tensões entre as vigas e o tabuleiro. Os conectores adotados neste sistema são em GFRP encaixados no banzo superior das vigas (Figura 2.25).

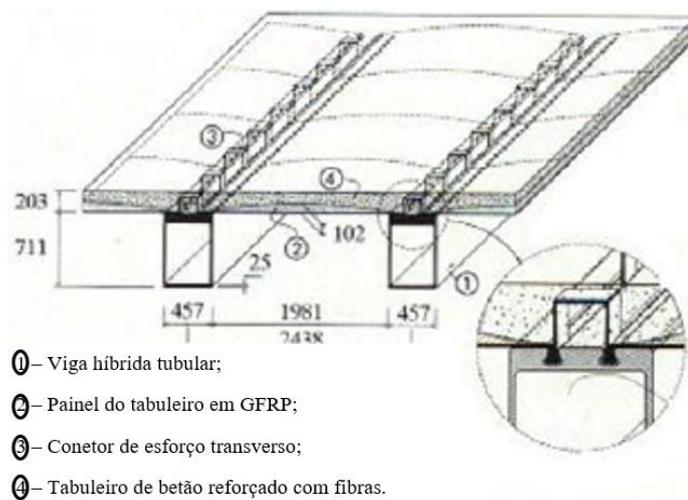


Figura 2.25 – *Hybrid Tube System* (Seible *et al.*, 2004). Nota: dimensões em [mm].

De uma forma geral, nestes sistemas estruturais híbridos, as vantagens potenciais da ligação de elementos de GFRP a lajes/vigas comprimidas de betão advém do aumento da rigidez de flexão com a correspondente diminuição da deformabilidade e, do aumento da capacidade resistente, garantindo em simultâneo um bom aproveitamento das propriedades dos elementos de GFRP, pelo travamento que o betão lhes confere.



# INFLUÊNCIA DO TIPO DE PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE NA LIGAÇÃO MECÂNICA ENTRE BETÃO E LÂMINAS DE GFRP – Investigação experimental

---

### 3.1 Introdução

O presente capítulo detalha os estudos experimentais desenvolvidos com o objetivo de caracterizar a ligação mecânica entre um SCSFRMC (*self-compacting steel fiber reinforced micro-concrete*) e lâminas de GFRP, em função do tipo de preparação da junta entre estes materiais. De acordo com o levantamento realizado, verificou-se que a bibliografia existente não esclarece formas de promover a ligação entre o betão (aplicado de forma fresca) e materiais do tipo GFRP, pelo que se considerou necessária a realização do presente estudo, já que este trabalho se insere num estudo mais global onde se procura estudar uma solução para pavimentos que utiliza uma combinação de componentes estruturais em GFRP e SCSFRMC.

No âmbito do presente trabalho, verificou-se que o comportamento da ligação entre GFRP e betão podia ser melhorado com a utilização de materiais adesivos na interface entre os dois materiais e considerou-se que os adesivos à base de resina epoxídica poderiam ser os mais indicados para a ligação em estudo. Procuraram-se então adesivos existentes no mercado com as seguintes características: temperatura de transição vítrea elevada e adequada aderência entre betão fresco e betão endurecido.

De modo a caracterizar o comportamento da ligação entre o GFRP e a superfície de SCSFRMC, foi realizado um programa experimental constituído por 60 ensaios de “*pull-off*” recorrendo a 15 provetes. A geometria dos provetes, a configuração de ensaio bem como toda a sua instrumentação, serão detalhadamente apresentados nos diferentes subcapítulos do presente capítulo da dissertação. O estudo teve como principal objetivo avaliar o desempenho da ligação entre o GFRP e o SCSFRMC quando diferentes técnicas de tratamento de superfície de GFRP são aplicadas, previamente à colagem do adesivo. Assim, foram utilizadas três técnicas de

preparação de superfícies diferentes: (i) tratamento com lixa 24; (ii) tratamento com lixa 80 e (iii) sem aplicação de tratamento. De modo a avaliar a eficiência de cada um dos processos de tratamento e estabelecer uma relação com o desempenho da ligação entre GFRP e SCSFRMC, foi medido o nível de rugosidade de todas as superfícies de GFRP, onde viria a ser aplicado o adesivo de ligação, através da utilização de um sensor laser que permitiu retirar informações qualitativas e quantitativas da rugosidade das diferentes superfícies. Outra vertente do programa experimental foi a caracterização do SCSFRMC, de modo a ser avaliada a sua influência na resistência da ligação GFRP/SCSFRMC.

As amassaduras executadas no âmbito do presente projeto foram realizadas na empresa CiviTest – Pesquisa de novos materiais para Engenharia Civil, Lda, especializada no desenvolvimento e produção de betões com fibras.

As cofragens utilizadas foram concebidas especificamente para o presente trabalho, de modo a rentabilizar o tempo de betonagem e conseguir as geometrias pretendidas.

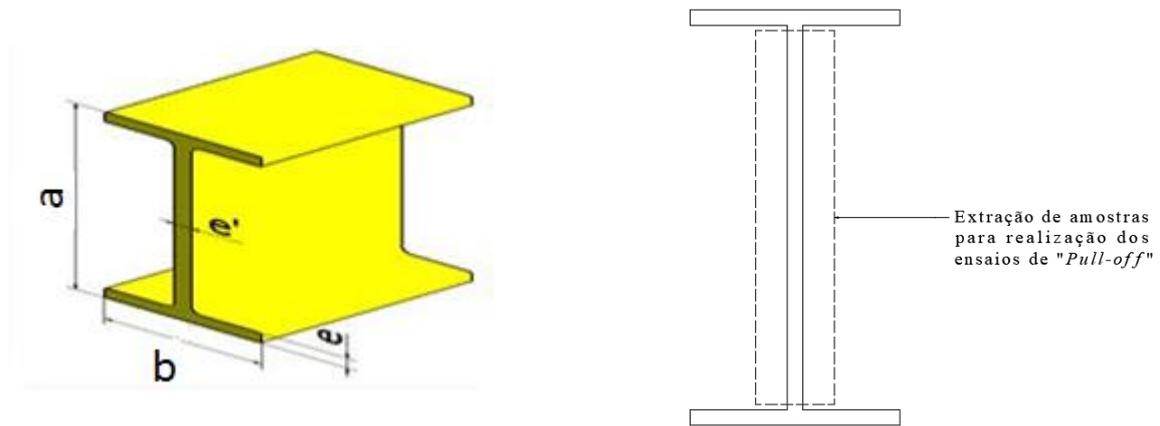
A campanha experimental foi desenvolvida no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST-UM).

## **3.2 Características dos materiais utilizados**

### **3.2.1 GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer)**

No presente trabalho foram usadas chapas de GFRP extraídas da alma de um perfil I400, fabricado pela empresa ALTO, Perfis Pultrudidos, Lda. Esta opção foi seguida em virtude da tipologia do GFRP (arquitetura de fibras e tecidos) a usar no âmbito do projeto “EasyFloor” ser similar à que compõe a alma do perfil I400.

A Tabela 3.1 apresenta dados geométricos do perfil I400, enquanto que a Figura 3.1.a) apresenta sua representação esquemática. Por sua vez, a Figura 3.1.b) representa o local do perfil I400 de onde foram retiradas amostras de GFRP para obter os provetes utilizados no presente programa experimental (ensaio de *“pull-off”*).



- a) Representação do Perfil I400 (ALTO, Perfis Pultrudidos, Lda.).  
 b) Local de extração de amostras para realização dos ensaios de “pull-off”.

Figura 3.1 – Perfil I400 para extração de amostras.

Tabela 3.1 – Dimensões do Perfil I400 (ALTO, Perfis Pultrudidos, Lda.).

	Largura – a	Largura – b	Espessura – e	Espessura – e'
Perfil I400	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	400	200	15	15

As propriedades da chapa de GFRP usada foram obtidas a partir das fichas técnicas fornecidas pelo fabricante e através de artigos científicos onde existe informação relevante quanto à sua caracterização (Gonilha *et al.*, 2014).

Os perfis de GFRP utilizados são constituídos por *rovings* de fibra de vidro e tecidos incorporados numa matriz de resina de poliéster isoftálico com um volume de fibras de 60%. Na Figura 3.2 apresenta-se a arquitetura de fibras usada na produção dos perfis.

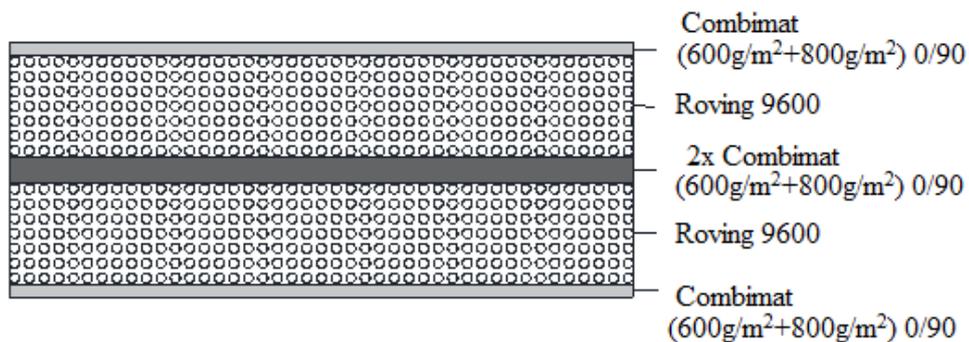


Figura 3.2 – Constituição do GFRP utilizado (ALTO, Perfis Pultrudidos, Lda.).

As principais propriedades mecânicas dos perfis de GFRP foram obtidas através de ensaios monotónicos até à rotura em provetes extraídos da alma, nomeadamente: (i) ensaio de tração (EN ISO 527); (ii) ensaios de compressão (ASTM D 695); e (iii) ensaios de corte (Gonilha *et al.*, 2014). Esses ensaios permitiram a determinação do módulo de elasticidade longitudinal em tração ( $E_{L,t}$ ), do módulo de elasticidade transversal em compressão ( $E_{T,c}$ ), do módulo de corte ( $G_{LT}$ ), da resistência longitudinal à tração ( $f_{tu,L}$ ) e da tensão de corte ( $\tau_{\mu,LT}$ ) dos laminados de GFRP. A Tabela 3.2 resume as principais propriedades do material GFRP.

Tabela 3.2 – Principais propriedades mecânicas do material GFRP utilizado, (José A. Gonilha *et al.*, 2014).

<b>GFRP</b>	<b><math>E_{L,t}</math></b> <b>[GPa]</b>	<b><math>E_{T,c}</math></b> <b>[GPa]</b>	<b><math>G_{LT}</math></b> <b>[GPa]</b>	<b><math>f_{tu,L}</math></b> <b>[MPa]</b>	<b><math>\tau_{\mu,LT}</math></b> <b>[MPa]</b>
<b>Alma</b>	$23.98 \pm 1.61$	$4.55 \pm 0.52$	$3.49 \pm 0.43$	$278.90 \pm 23.78$	$20.42 \pm 1.15$

### 3.2.2 Adesivos

De acordo com a pesquisa efetuada, não foi possível encontrar adesivos especificamente desenvolvidos para promover a ligação entre betão fresco e chapas (ou lâminas) de GFRP. Assim, a pesquisa incidiu em adesivos que promovem a ligação entre betão fresco e betão endurecido. A seleção dos adesivos teve como base uma pesquisa efetuada aos produtos existentes no mercado, o contacto com as empresas que produzem ou comercializam estes produtos e a consulta de bibliografia. Com base nestes dados, foi possível selecionar os adesivos mais adequados, suportada nos seguintes critérios: (i) elevada resistência ao corte; (ii) diferentes níveis de ductilidade; (iii) perda mínima de resistência após a exposição a diferentes temperaturas; (iv) fácil manuseamento e, (v) tempo de cura rápido.

A Figura 3.3 apresenta as embalagens dos adesivos selecionados, nomeadamente: (i) SikaTop® Armatec®-110 EpoCem® da Sika, à base de cimento e resina epoxídica modificada, tri-componente (A + B + C); (ii) Sikadur®-32 EF da Sika, à base de resina epoxídica, bi-componente (resina + endurecedor)); (iii) Eporip da MAPEI, à base de resina epoxídica, bi-componente (resina + endurecedor) e (iv) Kerabuild® Eco Epoprimer da Kerakoll Portugal, S.A, à base de resina epoxídica, bi-componente (resina + endurecedor). As fichas técnicas destes adesivos encontram-se no ANEXO I.

A Tabela 3.3 apresenta os principais campos de aplicação e características técnicas destes adesivos.



Figura 3.3 – Adesivos estudados: (a) SikaTop Armatec-110 EpoCem; (b) Sikadur – 32 EF; (c) Eporip e (d) Kerabuild Eco Epoprimer.

Tabela 3.3 – Campos de aplicação e características técnicas dos adesivos selecionados (extraída das fichas técnicas).

	Campos de aplicação	Características técnicas
<b>Kerabuild Eco poprimer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Juntas de betonagem no extradorso de estruturas horizontais entre betão endurecido e fresco;</li> <li>- Selagem de fissuras em betonilhas cimentícias, ancoragens de varões de aço a betão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excelente fluidez;</li> <li>- Resistente às agressões químicas ambientais (EN 206).</li> </ul>
<b>Eporip</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ligação entre juntas de betonagem de betão fresco e betão antigo;</li> <li>- Colagem de elementos prefabricados em betão;</li> <li>- Colagem mista de betão e aço;</li> <li>- Enchimento de fissuras no betão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adesivo epoxídico isento de solventes;</li> <li>- Consistência de uma pasta ligeiramente tixotrópica que pode ser aplicada com pincel, quer em superfícies horizontais quer verticais;</li> <li>- Polimeriza sem retração, sendo impermeável à água após o endurecimento total; possui excelentes propriedades dielétricas e características mecânicas elevadas, para além de aderir ao betão e ao aço.</li> </ul>

<b>Sikadur-32 EF</b>	<p>Como cola estrutural para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elementos de betão (incluindo a união entre betão fresco e endurecido);</li> <li>- Pedra natural;</li> <li>- Cerâmica, fibrocimento;</li> <li>- Argamassa, alvenaria de tijolo;</li> <li>- Aço, ferro, alumínio;</li> <li>- Madeira;</li> <li>- Poliéster/materiais de fibra de vidro e resina epóxi;</li> <li>- Cristal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil de misturar e aplicar;</li> <li>- Muito boa aderência à maioria dos materiais de construção;</li> <li>- Adesivo de alta resistência;</li> <li>- Endurece sem retração;</li> <li>- Componentes de cores distintas (para controlo da mistura);</li> <li>- Não necessita de primário;</li> <li>- Elevadas resistências mecânicas iniciais e finais;</li> <li>- Impermeável aos líquidos e ao vapor de água;</li> <li>- Boa resistência química;</li> <li>- Tolerante à humidade.</li> </ul>
<b>SikaTop Armatec - 110 EpoCem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adequado para o controlo de proteção anódica (Princípio 11, método 11.1 da NP EN 1504-9).</li> <li>- Adequado para reparações de betão armado, como revestimento de proteção anticorrosiva das armaduras;</li> <li>- Adequado para aplicar como agente de aderência em betão ou argamassa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contém tecnologia EpoCem® – agente de aderência melhorado;</li> <li>- Elevado “tempo aberto” para argamassas de reparação;</li> <li>- Compatível com a maioria dos sistemas de reparação com argamassas prontas Sika® Monotop®;</li> <li>- Excelente aderência ao aço e a betão;</li> <li>- Contém inibidores de corrosão;</li> <li>- Aprovado para aplicação sob cargas dinâmicas;</li> <li>- Boa resistência à penetração da água e cloretos;</li> <li>- Elevada resistência a esforços de corte;</li> <li>- Elevado tempo de vida útil (<i>potlife</i>);</li> <li>- Fácil de misturar;</li> <li>- Pode ser aplicado à trincha ou à pistola.</li> </ul>

A Tabela 3.4 e a Tabela 3.5 apresentam os dados técnicos fornecidos pelos fabricantes de cada adesivo selecionado.

Tabela 3.4 – Características técnicas dos adesivos selecionados (informação recolhida das fichas técnicas): Parte 1.

	<b>Tipo de resina</b>	<b>Cor</b>	<b>Resistência à tração</b> [MPa]	<b>Resistência ao corte</b> [MPa]	<b>Resistência à compressão</b> [MPa]	<b>Resistência à flexão</b> [MPa]
<b>Kerabuild Eco poprimer</b>	Epóxi	Verde e Bege		>6 (EN 12636)	>30 (EN 12190)	
<b>Eporip</b> (endurecimento completo aos 7 dias)	Epóxi	Cinzento			50 (ASTM C 579)	35 (ISO 178)
<b>Sikadur-32 EF</b> (considerando endurecimento aos 7 dias, mas está completo aos 14 dias)	Epóxi	Cinzento	→ a +10°C: 34 → a +23°C: 36 → a +30°C: 30 (ISO 527)		→ a +10°C: 45 → a +23°C: 48 → a +30°C: 57 (ASTM D 695-95) → a +10°C: 41 → a +23°C: 40 → a +30°C: 39 (DIN EN 53452)	
<b>SikaTop Armatec -110 EpoCem</b>	cimento e resina de epóxi modificada	Cinzento escuro		16 (Após 2 horas)		

Tabela 3.5 – Características técnicas dos adesivos selecionados (informação recolhida nas fichas técnicas): Parte 2.

	<b>Módulo de Elasticidade</b>	<b>Temperatura de transição vítrea (Tg)</b>	<b>Trabalhabilidade</b>	<b>Coefficiente de Dilatação térmica</b>	<b>Tempo para aplicar/ vida útil da mistura</b>
	<b>[GPa]</b>	<b>[°C]</b>	<b>[min]</b>	<b>[K<sup>-1</sup>]</b>	<b>[min.]</b>
<b>Kerabuild Eco poprimer</b>	>2,0 (compressão) (EN 13412)	>40 (EN 12614)		<100x10 <sup>-6</sup> (EN 1770)	→ a +5°C: 100 → a +23°C: 45 → a +30°C: 30
<b>Eporip (endurecimento completo aos 7 dias)</b>	3,5 (compressão) (ASTM C 579) 2,5 (flexão) (ISSO 178)		→ a +10°C: 90 → a +23°C: 60 → a +30°C: 40		60 (a +23 °C)
<b>Sikadur-32 EF (endurecimento completo aos 14 dias)</b>	3,3 (compressão) (ASTM D 695-95) 3,7 (flexão) (DIN EN 53452) 3,8 (tração) (ISO 527)	47 (aos 7 dias e +23°C) (ASTM D 648)			60 (a +20 °C)
<b>SikaTop Armatec - 110 EpoCem</b>	16,4E-3 (estático)			18x10 <sup>-6</sup> (EN 1770)	180 (a +20 °C)

**Nota:** Ensaios efetuados a +20°C em condições de laboratório.

### 3.2.3 SCSFRMC (Self-Compacting Steel Fiber Reinforced Micro-Concrete)

A camada superior do painel sanduíche híbrido proposto será realizada com SCSFRMC com características específicas entre as quais se destacam a elevada ductilidade e ser auto-compactável. Por esse motivo, é habitualmente designado na literatura inglesa como *self-compacting steel fiber reinforced micro-concrete* (SCSFRMC).

Os materiais utilizados para a composição do SCSFRMC foram cimento CEM I 42.5R, cinzas volantes, super-plastificante MasterGlenium SKY 617, fibras de polipropileno, água, diferentes tipos de agregados, como areia fina de rio, areia de rio grossa, brita e fibras de aço (Fibre wirand FS7 – EN 14889-1). Este tipo de fibra de aço tem comprimento ( $l_f$ ) de 33 mm, diâmetro ( $d_f$ ) de 0.55 mm, relação de aspeto ( $l_f/d_f$ ) de 60 e limite de elasticidade igual a 1300 MPa. Agregados não tratados, disponíveis na Região Norte de Portugal (Minho), foram utilizados na composição de SCSFRMC.

Tabela 3.6 – Composição para 1 m<sup>3</sup> de SCSFRMC.

Composição (1m <sup>3</sup> )	SCSFRMC
Cimento 42,5R [kg]	375
Cinzas volantes [kg]	200
Brita [kg]	625
Areia grossa [kg]	780
Areia fina [kg]	160
Super-plastificante [kg]	9.775
Fibras de aço [kg]	60
Fibras de polipropileno [kg]	2
Água [L]	200

### 3.3 Programa de ensaios

#### 3.3.1 Ensaios de “pull-off”

O ensaio de arrancamento por tração, ou ensaio de tipo “pull-off”, é usado para determinar a resistência superficial do betão à tração e a aderência de ligação entre materiais, através do arrancamento de um disco metálico que é colado à superfície de um deles, neste caso, o GFRP. A força de tração é transmitida axialmente a uma peça metálica que é colada ao provete. Este é um ensaio de aderência por tração direta e consiste na aplicação gradual e lenta de uma força de tração exercida manualmente com o equipamento E142 da Matest, que se destina especificamente a este tipo de ensaio.

O sistema de ensaio cumpre um conjunto de normas internacionais, tais como a NP EN 1542 (1999), a ASTM C1583, a ASTM D4541, ISO 4624:2002, entre outras.

As principais vantagens na utilização do ensaio de arrancamento por tração são: (i) ensaio simples, rápido e pouco dispendioso; (ii) tensão de tração é medida diretamente e (iii) aplicação “in situ”. Normalmente, as desvantagens na utilização deste tipo de ensaio são: (i) existe uma dificuldade em conseguir que não haja uma flexão residual e o ensaio deixe de ser por tração pura; (ii) tempo de presa do adesivo e (iii) os valores obtidos dependem do tipo e dimensão do agregado, do material do disco e da sua espessura. Os principais fatores que podem influenciar os resultados dos ensaios de “pull-off” são: (i) composição e propriedades do betão; (ii) variação na superfície de rotura; (iii) orientação e posição do agregado sob o disco; (iv) diâmetro e espessura do disco e (v) sistema de contrapressão e velocidade de aplicação da carga.

A Tabela 3.7 apresenta a designação genérica dos provetes utilizados nos ensaios de “pull-off”, sendo P\_TT\_AN.X, em que: P se refere ao tipo de ensaio, neste caso “pull-off”; TT indica o tipo de tratamento da superfície de GFRP, isto é, NT representa sem aplicação de tratamento da superfície, SP80 representa aplicação de lixa 80 e SP24 representa aplicação de lixa 24; AN indica o tipo de adesivo aplicado na superfície de GFRP, isto é, A1 representa o SikaTop Armatec - 110 EpoCem, A2 representa o Sikadur-32 EF, A3 representa a não aplicação de adesivo na interfase de ligação GFRP/SCSFRMC, A4 representa o Eporip e o A5 representa o Kerabuild Eco poprimer e X representa o número do ensaio.

Tabela 3.7 – Nomenclatura utilizada para os ensaios de tipo “pull-off”.

Tratamento da superfície	SikaTop	Sikadur-32 EF	Sem adesivo	Eporip	Kerabuild Eco
	Armatec - 110 EpoCem (A1)	(A2)	(A3)	(A4)	poprimer (A5)
NT	P_NT_A1.1	P_NT_A2.2	P_NT_A3.3	P_NT_A4.4	P_NT_A5.5
SP80	P_SP80_A1.1	P_SP80_A2.2	P_SP80_A3.3	P_SP80_A4.4	P_SP80_A5.5
SP24	P_SP24_A1.1	P_SP24_A2.2	P_SP24_A3.3	P_SP24_A4.4	P_SP24_A5.5

### 3.3.1.1 Geometria e configuração de ensaio

Para a realização do ensaio de “pull-off” foram ensaiados 15 provetes de 350 mm × 350 mm, com 15 mm de espessura de GFRP e 30 mm de espessura de SCSFRMC. Em cada provete foram efetuados 4 ensaios, perfazendo um total de 60 ensaios de tipo “pull-off”. A Figura 3.4 apresenta o provete tipo de ensaio e a Figura 3.5 mostra a configuração utilizada para o ensaio.

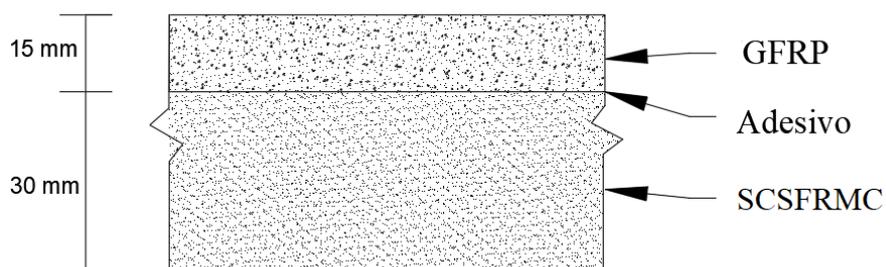
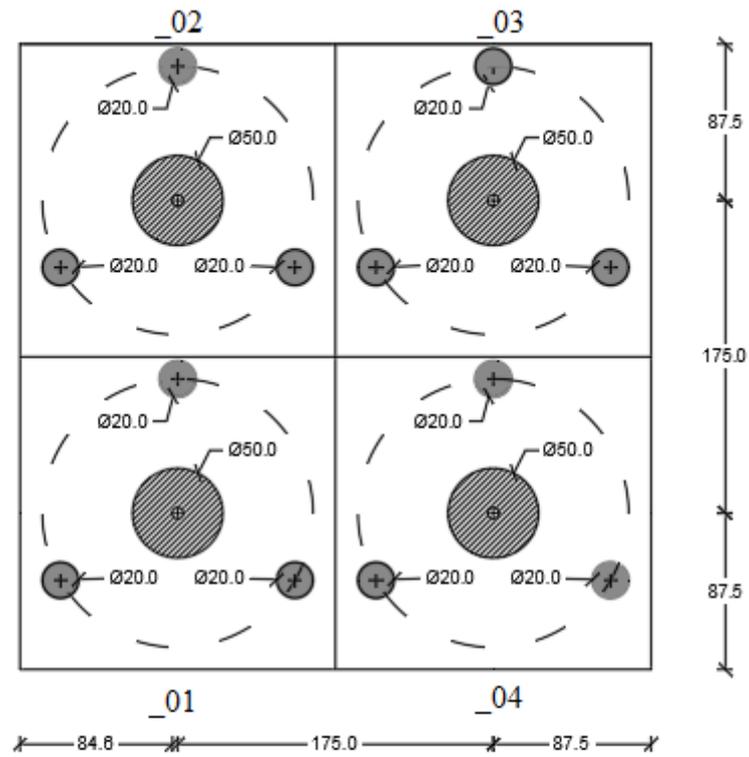


Figura 3.4 – Provede tipo para ensaio de “pull-off” (vista em corte).



LEGENDA:

-  Disco / Bolacha
-  Pernos do equipamento
-  Circunferência de ensaio

Figura 3.5 – *Setup* do ensaio de “*pull-off*” (vista em planta). Nota: (i) *\_0N* indica a posição do ensaio na placa de GFRP e (ii) Cotas em [mm].

### 3.3.1.2 Equipamento de ensaio

Os ensaios de arrancamento foram realizados através de um equipamento, da Matest modelo E142, tal como apresentado na Figura 3.6.



Figura 3.6 – Equipamento E142 da Matest, utilizado nos ensaios de tipo “pull-off”.

O equipamento utilizado incorpora um sistema digital, uma vez que, a medida é feita por um módulo eletrónico, equipado com visor digital, instalado numa estrutura de suporte em alumínio. O mecanismo de arrancamento, incluindo o disco de ensaio, é totalmente de aço C50 galvanizado. Este equipamento tem uma capacidade máxima de 16 kN e uma precisão de 2%.

### 3.3.1.3 Instrumentação do Ensaio de “pull-off”

De acordo com a norma ASTM D4541, o ensaio é realizado através da fixação com adesivo epoxídico de um dispositivo de carga (disco) na direção normal à superfície de GFRP. Após o endurecimento do adesivo, alinha-se o equipamento de ensaio, de modo a aplicar uma força de tração que seja normal à superfície a ser testada. Para o arrancamento, enrosca-se um parafuso no disco permitindo que o equipamento exerça sobre o conjunto (disco, adesivo e provete) uma força de tração. A força aplicada ao dispositivo de carga é então gradualmente aumentada da forma mais suave e contínua possível, utilizando uma taxa de carga pré-definida. O equipamento fornece o valor da tensão de tração exercida no momento do arrancamento. A rotura ocorre ao longo do plano mais fraco, dentro do sistema composto pelo dispositivo de

ensaio. Neste caso, pode ocorrer pelo SCSFRMC (Figura 3.8a), na superfície de ligação entre o GFRP e o SCSFRMC (Figura 3.8b), no GFRP (Figura 3.8c) e também no adesivo (Figura 3.8d).

Deve garantir-se que a força de tração se distribui de forma uniforme e perpendicular à peça metálica. Se tal não acontecer, os valores de “*pull-off*” serão menores do que os obtidos em boas condições de ensaio. Para garantir as melhores condições de ensaio possíveis, o ensaio foi executado num plano nivelado e os parafusos foram roscados sempre com o mesmo número de voltas, de forma, a obter perpendicularidade entre o alinhamento da força de tração e a pastilha metálica colada no GFRP. As assimetrias na força de tração podem, também, ser causadas na aplicação do adesivo.

Finalmente, a excentricidade de carga é outro fator que afeta os resultados do ensaio. De acordo, com Austin *et al.* (1995), a excentricidade da carga depende basicamente da ortogonalidade da perfuração do núcleo (relativamente à do SCSFRMC) e da precisão no posicionamento do disco no topo do núcleo parcial. Desta forma, se a ortogonalidade da perfuração do núcleo não é garantida, a excentricidade do carregamento aumentará com a profundidade do núcleo de perfuração.

No presente trabalho, a ortogonalidade foi garantida com recurso a equipamentos de nivelamento. Neste estudo, foram perfurados núcleos com diâmetro de 50 mm e uma profundidade aproximada até atingir 15 mm, conforme a norma ASTM C1583, no SCSFRMC, por meio de uma broca de corte de núcleo rotativo com diamante. Para garantir a profundidade de 15mm, um cuidado especial foi dedicado a garantir uma pressão uniforme quando o núcleo está a ser perfurado.

O valor da tensão obtida através do ensaio de “*pull-off*” resulta da força de arrancamento dividida pela área da peça metálica.

O “*pull-off*” é um ensaio muito suscetível a erros, sendo aconselhável realizar um número suficiente de ensaios que permita o seu despiste. A metodologia usada deve, também, ser particularmente controlada. É necessário respeitar o tempo necessário para a cura do adesivo. Este tempo depende do tipo de adesivo utilizado e das condições de temperatura e humidade verificadas no local. Assim, o tempo que decorre desde a aplicação do adesivo até ao arrancamento da pastilha e a obtenção do valor do ensaio de “*pull-off*” pode variar, sendo geralmente maior ou igual a 48 horas (tempo de cura).

A Figura 3.7 representa esquematicamente o ensaio de “pull-off”, conforme a norma ASTM C 1583 – 04.

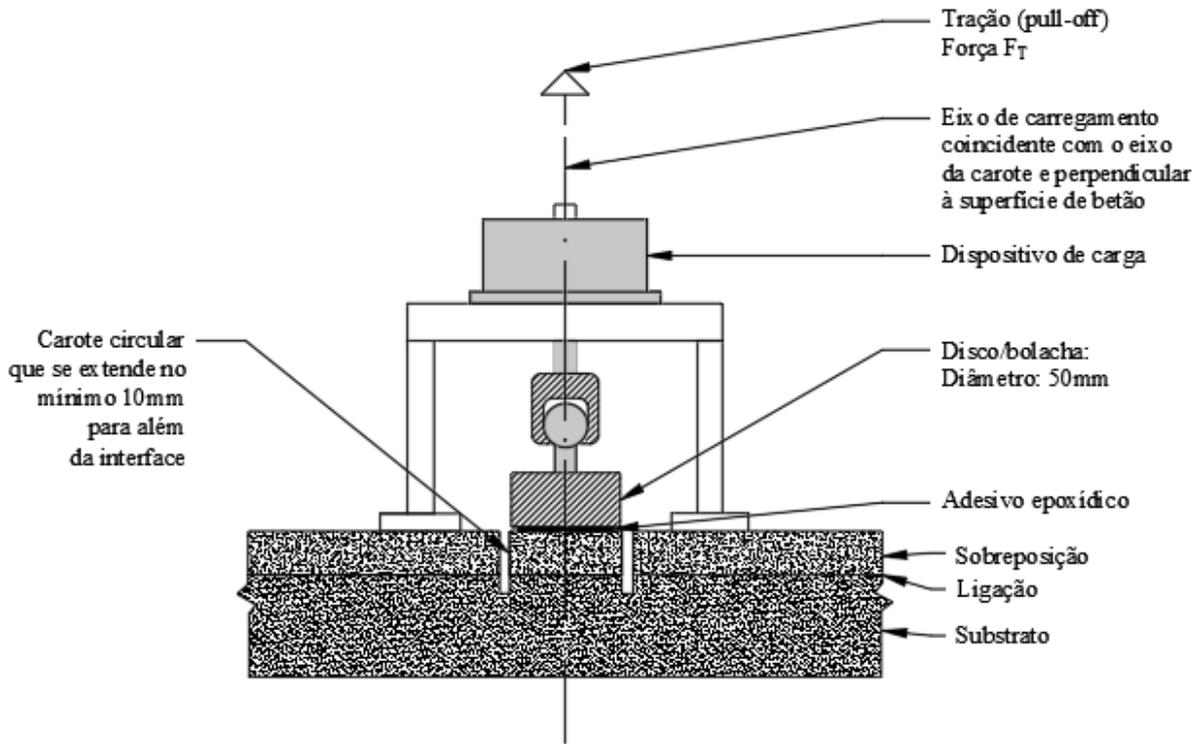


Figura 3.7 – Representação do ensaio de “pull-off” (Adaptado de ASTM C 1583 – 04).

A Figura 3.8 apresenta os modos de rotura possíveis, no ensaio de “pull-off” do presente estudo.

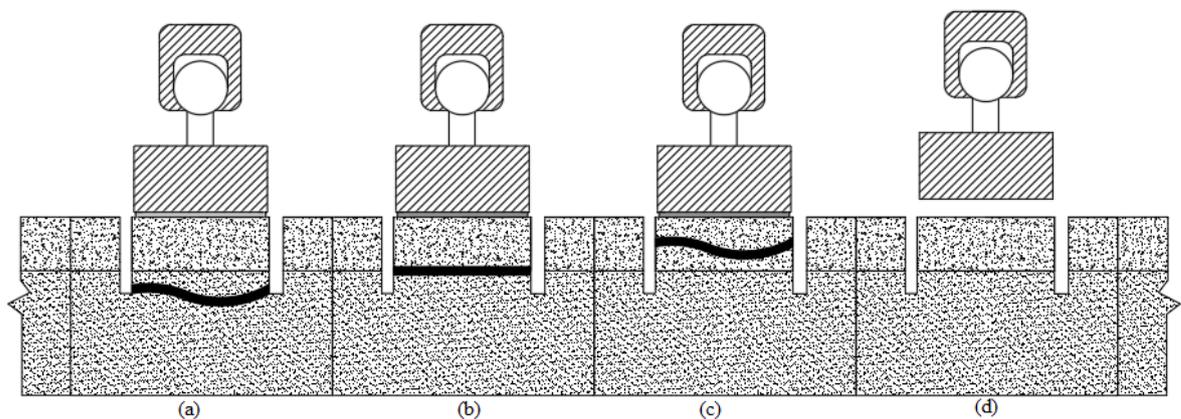


Figura 3.8 – Modos esquemáticos de rotura: (a) Rotura no SCSFRMC; (b) Rotura de ligação na interface SCSFRMC/GFRP; (c) Rotura no material de GFRP; (d) Rotura de ligação na interface disco/GFRP, (Adaptado de ASTM C 1583 – 04).

### 3.3.2 Ensaios de caracterização da superfície do GFRP

O efeito do tipo de tratamento de superfície do GFRP, previamente à aplicação do adesivo, foi um dos parâmetros avaliados no programa experimental do presente trabalho.

Considerando os três diferentes tratamentos de superfície e com o objetivo de identificar a sua influência nos resultados obtidos com os ensaios de “*pull-off*”, foi medido o nível de rugosidade de todas as superfícies onde seria posteriormente aplicado o adesivo. Com esta estratégia, é possível relacionar a técnica de tratamento com o nível de rugosidade que esta permite que a superfície adquira, e posteriormente avaliar a sua influência no desempenho em termos de resistência da ligação entre o GFRP e superfície de SCSFRMC.

O sistema de medição da rugosidade da superfície foi baseado na utilização de um sensor laser que permitiu retirar informações qualitativas e quantitativas da rugosidade das diferentes superfícies de GFRP. Foram analisados dois alinhamentos, um na direção XX e outro na direção YY, na zona central de cada placa, considerando-se estas zonas representativas da superfície total da placa em cada uma das 15 superfícies de GFRP. O trajeto indicado na Figura 3.9 ilustra o percurso percorrido pelo sensor laser na leitura da rugosidade. As principais características do sensor laser utilizado encontram-se detalhadas na Tabela 3.8.

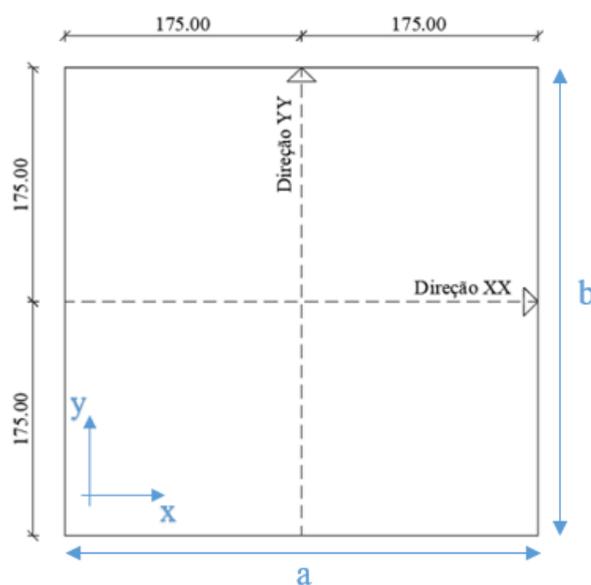


Figura 3.9 – Trajeto percorrido pelo laser na aquisição da rugosidade em 2 direções da superfície de GFRP. Nota: dimensões em [mm].

Tabela 3.8 – Propriedades do sensor laser SICK OD2 – P50W10A0.

Parâmetros	Valor
Gama de medição	40 mm a 60 mm
Resolução	5 $\mu\text{m}$
Repetibilidade	15 $\mu\text{m}$
Frequência de medição	2 kHz
Tamanho do ponto de luz (distância)	0.5 mm $\times$ 1 mm (50 mm)

A Figura 3.10 ilustra o sistema de ensaio e o equipamento utilizado.

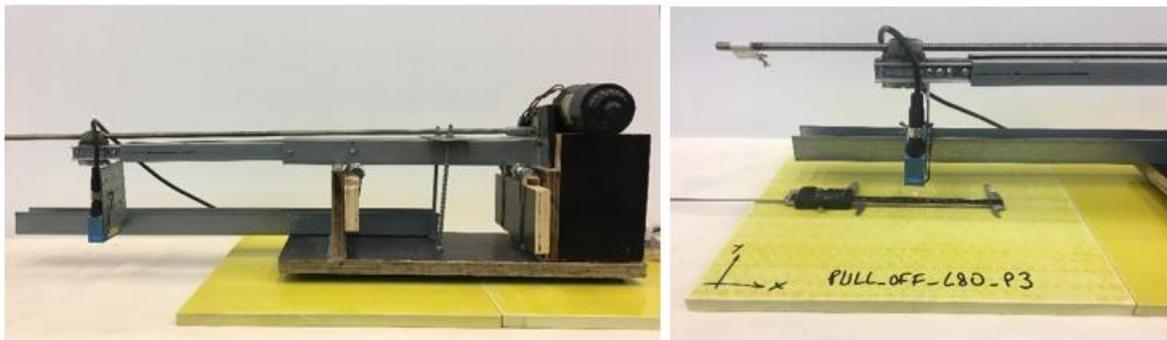


Figura 3.10 – Configuração do sistema de medição da rugosidade de superfície das placas de GFRP.

Posteriormente, foram retiradas fotografias microscópicas das placas de GFRP. Estas medições foram executadas em 3 fases, com diferentes ampliações (0 $\times$ ; 20 $\times$  e 400 $\times$ ) para cada uma das 15 placas. Para avaliar a constituição da placa, a este nível, foram verificadas as aplicações de tratamento de superfície por parte do operador e comparados os efeitos de cada tipo de tratamento de superfície. A Figura 3.11 apresenta o sistema adotado e o respectivo equipamento utilizado.

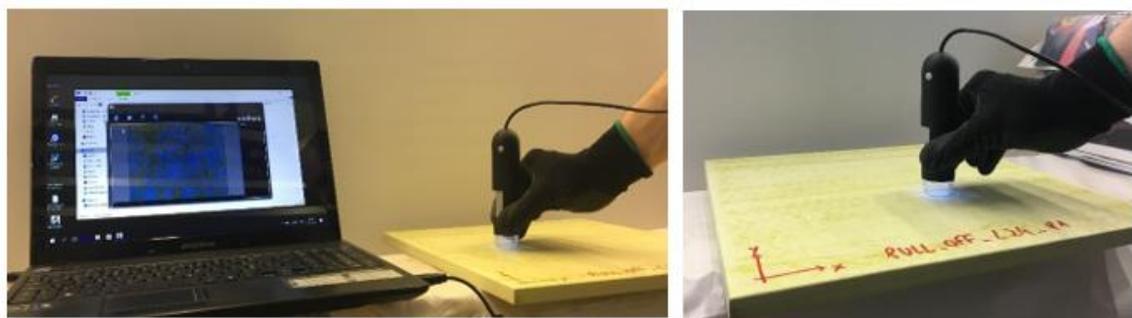


Figura 3.11 – Fotografias do sistema de ensaio de análise microscópica das placas de GFRP e do equipamento microscópico utilizado.

A Figura 3.12 apresenta os três diferentes tratamentos aplicados à superfície tipo, sendo estes, tratamento com lixa 24, com lixa 80 e sem tratamento. Em cada um dos 5 provetes foi aplicado o mesmo tipo de tratamento de superfície.

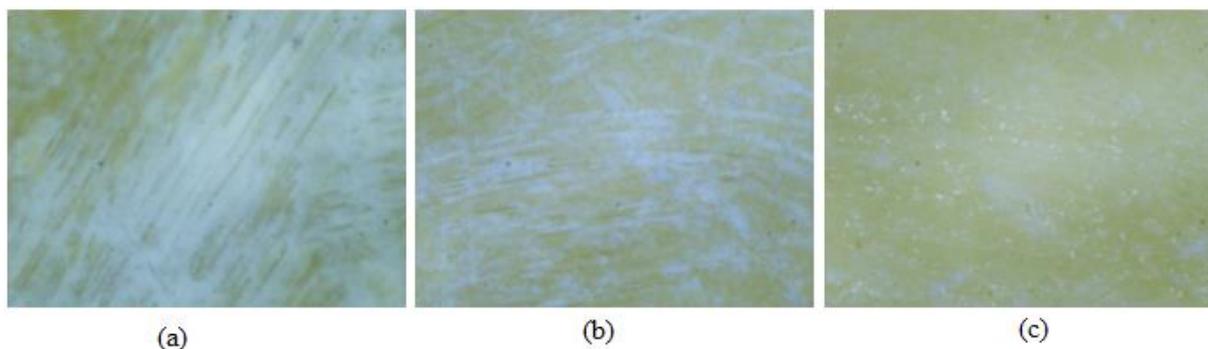


Figura 3.12 – Fotografias microscópicas efetuadas nas placas de GFRP: (a) tratamento com lixa 24; (b) tratamento com lixa 80 e (c) sem tratamento de superfície.

### **Preparação dos provetes**

Com objetivo de caracterizar a influência do tipo de preparação da superfície na ligação mecânica do betão fresco a lâminas de GFRP, a utilizar nos painéis sanduíche híbridos, foram executados ensaios de “*pull-off*”, de acordo com as recomendações da ASTM C1583. Para estes ensaios foram fornecidas 15 placas de GFRP de 350 mm × 350 mm e 15 mm de espessura pela empresa ALTO Perfis Pultrudidos, Lda.

### **Preparação da superfície**

Com o objetivo de se avaliar o efeito da rugosidade da superfície da placa de GFRP na aderência ao SCSFRMC de origem cimentícia, foram estudados três diferentes tipos de tratamento de superfície, sendo estes: (i) sem tratamento, (ii) tratamento com lixa 80 e com (iii) tratamento com lixa 24.

A não realização de tratamento justificou-se como meio de comparação com os restantes tipos de tratamentos, de forma a avaliar melhor a adequabilidade da aplicação do tratamento da superfície.

No tratamento com lixa 80, a superfície do GFRP foi levemente lixada, somente até perda do brilho do revestimento e no tratamento com lixa 24, a superfície do GFRP foi lixada até perder o brilho do revestimento sem, no entanto, perder secção útil da placa de GFRP. Foram observadas a “olho nu” e fotografadas todas as placas para análises posteriores. A Figura 3.13 apresenta o equipamento utilizado nos tratamentos do GFRP com lixa.



Figura 3.13 – Aplicação do tratamento com lixa.

Mediram-se as placas de GFRP com um paquímetro e pesaram-se com uma balança digital, com uma precisão de 0.01 mm e 0.01 g, respetivamente. Calculou-se a densidade do material e constatou-se que variava entre os 1729,2 kg/m<sup>3</sup> e os 1915,8 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 3.9 – Levantamento geométrico das placas de GFRP.

<b>Provete</b>	<b>Largura – a</b>	<b>Largura – b</b>	<b>Espessura – t</b>	<b>Peso</b>	<b>Densidade</b>
	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[g]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
P_SP24_1	348.67	348.33	14.54	3371.14	1908.61
P_SP24_2	348.00	348.00	14.51	3365.63	1915.77
P_SP24_3	348.67	347.00	14.58	3367.83	1909.73
P_SP24_4	348.00	348.00	14.63	3369.87	1901.59
P_SP24_5	348.33	349.00	14.59	3332.97	1879.81
<b>Média</b>	<b>348.33</b>	<b>348.07</b>	<b>14.57</b>	<b>3361.49</b>	<b>1903.10</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.30</b>	<b>0.65</b>	<b>0.04</b>	<b>14.38</b>	<b>12.48</b>
<b>CoV [%]</b>	<b>0.09</b>	<b>0.19</b>	<b>0.29</b>	<b>0.43</b>	<b>0.66</b>
P_SP80_1	348.00	348.00	15.45	3234.70	1729.19
P_SP80_2	348.33	348.67	14.48	3286.40	1868.74
P_SP80_3	348.00	348.67	14.48	3286.40	1870.53
P_SP80_4	348.33	347.67	14.50	3250.03	1851.26
P_SP80_5	347.67	349.00	14.47	3268.20	1861.03
<b>Média</b>	<b>348.07</b>	<b>348.40</b>	<b>14.68</b>	<b>3265.15</b>	<b>1836.15</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.25</b>	<b>0.49</b>	<b>0.39</b>	<b>20.34</b>	<b>53.91</b>
<b>CoV [%]</b>	<b>0.07</b>	<b>0.14</b>	<b>2.63</b>	<b>0.62</b>	<b>2.94</b>

P_NT_1	347.67	348.67	14.51	3268.00	1858.43
P_NT_2	350.00	349.00	14.49	3290.77	1859.25
P_NT_3	348.67	347.67	14.54	3312.77	1879.19
P_NT_4	348.00	348.00	14.54	3263.17	1852.78
P_NT_5	348.00	349.00	14.52	3276.63	1857.66
<b>Média</b>	<b>348.47</b>	<b>348.47</b>	<b>14.52</b>	<b>3282.27</b>	<b>1861.46</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.83</b>	<b>0.54</b>	<b>0.02</b>	<b>17.90</b>	<b>9.14</b>
<b>CoV [%]</b>	<b>0.24</b>	<b>0.16</b>	<b>0.14</b>	<b>0.55</b>	<b>0.49</b>

### Conceção dos moldes

As cofragens necessárias para execução de provetes foram elaboradas em madeira de “contraplacado marítimo”, tendo como principal função a impermeabilização dos moldes, garantindo deste modo que estes não absorvem água de amassadura durante o processo de betonagem e que podem ser reutilizados. Este é um sistema de cofragem simples de executar, composto por tábuas e ranhuras estrategicamente colocadas.

A produção do SCSFRMC e a moldagem e desmoldagem dos provetes foi realizada na empresa CiviTest – Pesquisa de novos materiais para Engenharia Civil, Lda.



Figura 3.14 – Preparação das cofragens e colocação do GFRP para aplicação dos diferentes adesivos e posterior betonagem do SCSFRMC.

### Aplicação dos adesivos

Após a caracterização geométrica e preparação dos moldes, as placas de GFRP foram solidarizadas ao SCSFRMC com recurso a 5 tipos de ligações diferentes: quatro destas com recurso a adesivos de elevada aderência e resistência (Kerabuild Eco Epoprimer; Eporip; Sikadur – 32 EF e SikaTop Armatec-110 EpoCem) e uma sem adesivos.

Os adesivos foram aplicados sobre o GFRP seco e limpo, isto é, isento de contaminantes superficiais tais como pó, leite, óleo ou graxa, seguindo as especificações. Para o efeito, (i)

limparam-se as placas de GFRP, (ii) preparou-se a mistura de acordo com a ficha técnica do produto e (iii) procedeu-se à aplicação do adesivo.

A Figura 3.15, a Figura 3.16, a Figura 3.17 e a Figura 3.18 apresentam a preparação dos adesivos selecionados, de acordo com as fichas técnicas dos fabricantes.



Figura 3.15 – Preparação do SikaTop Armatex – 110 EpoCem – Sika.



Figura 3.16 – Preparação do Sikadur – 32 EF – Sika.



Figura 3.17 – Preparação do Eporip – Mapei.



Figura 3.18 – Preparação do Kerabuild Eco Epoprimer – Kerakoll.

A Figura 3.19 apresenta a limpeza com acetona da superfície de GFRP para posteriormente aplicar-se o adesivo.



Figura 3.19 – Preparação da superfície de GFRP para receber o adesivo.

A Figura 3.20 apresenta a aplicação dos adesivos recorrendo a pincelamento/espalhamento com uma espátula ou uma trincha.

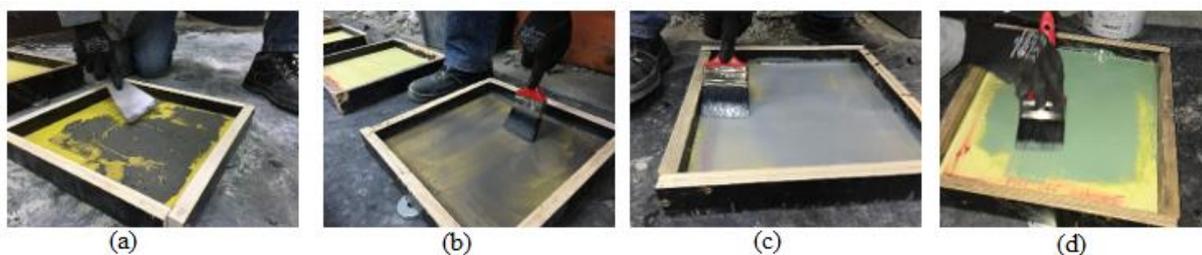


Figura 3.20 – Aplicação dos adesivos: (a) SikaTop Armatec-110 EpoCem; (b) Sikadur – 32 EF; (c) Eporip e (d) Kerabuild Eco Epoprimer.

### Aplicação do SCSFRMC

Os provetes de “*pull-off*” foram executados com SCSFRMC, na empresa CiviTest, especialista no desenvolvimento deste tipo de materiais. Para a produção de todos os provetes “*pull-off*” planeados foi necessário apenas um dia de betonagem. Nesse dia, foram também betonados 5 cilindros e 2 cubos para ensaios de compressão e, 7 prismas para ensaios de tração em flexão. A superfície superior do provete foi regularizada após o preenchimento do compartimento do molde para garantir a uniformização da sua espessura (todos os provetes de tipo “*pull-off*” apresentavam uma altura de 30 mm). A regularização e os excessos de SCSFRMC existentes nos moldes são retirados com o auxílio de uma colher. Esta regularização é algo dificultada pelas fibras de aço que existem na amassadura.

A desmoldagem dos provetes foi executada após 4 dias quando o SCSFRMC já tinha suficiente resistência para ser possível manusear os provetes e não haver risco de incluir dano nos provetes. De seguida, estes foram acomodados em paletes de madeira, em primeira estância na CIVITEST, com condições climatéricas controladas. Os provetes foram desmoldados e depois transportados para o Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, LEST-UM, para

aguardar o tempo de cura e se proceder aos respetivos ensaios de “*pull-off*” e de caracterização do material. Neste processo colocaram-se os provetes a curar numa câmara climática com condições controladas (HR=55% e T=20°C). A Figura 3.21 apresenta imagens captadas no dia da betonagem dos provetes.

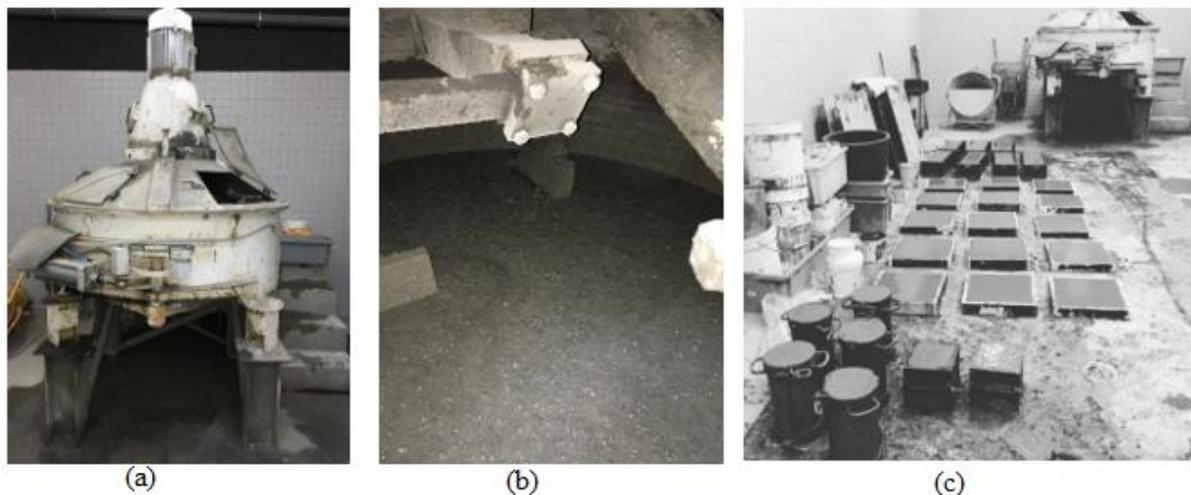


Figura 3.21 – Betonagem dos provetes: (a) betoneira utilizada para fabricação do SCSFRMC; (b) amassadura em execução de SCSFRMC e (c) provetes no final da betonagem.

Neste estudo foram perfurados núcleos de 50 mm de diâmetro e com uma profundidade aproximada de 15 mm, conforme a norma ASTM C1583, no SCSFRMC por meio de uma broca de corte de núcleo rotativo com brocas de diamante. Para evitar danos no SCSFRMC, foi colocado um cuidado especial em garantir uma pressão uniforme quando o núcleo está a ser perfurado. A Figura 3.22 apresenta o equipamento utilizado para executar a perfuração dos provetes.



Figura 3.22 – Caroteador utilizado para perfuração dos provetes.

No presente trabalho, antes de se proceder à colagem da peça metálica (“discos metálicos”) ao provete, as superfícies devem ser cuidadosamente preparadas de forma a garantir uma boa aderência. As recomendações sugerem que as superfícies devem ser lisas e sem rugosidades de modo a que a força que é aplicada nestas superfícies seja uniforme em toda a área de colagem. Antes de colar os discos lixou-se o GFRP.

Os discos foram colados diretamente sobre o GFRP utilizando o adesivo Sikadur-32 EF. Foram fixados 4 discos por placa. A Figura 3.23 apresenta a fase da colagem dos discos nos provetes de ensaio de tipo “pull-off”.



Figura 3.23 – Aplicação de adesivo para colagem dos discos

O ensaio foi realizado com recurso ao equipamento Matest modelo E142. Este equipamento tem uma capacidade de carga máxima de 16 kN, sendo que a célula de carga tem uma precisão de 2%. Os ensaios de “pull-off” realizaram-se aos 28 dias de idade do SCSFRMC.

A Figura 3.24 apresenta as etapas da realização dos ensaios de “pull-off”.

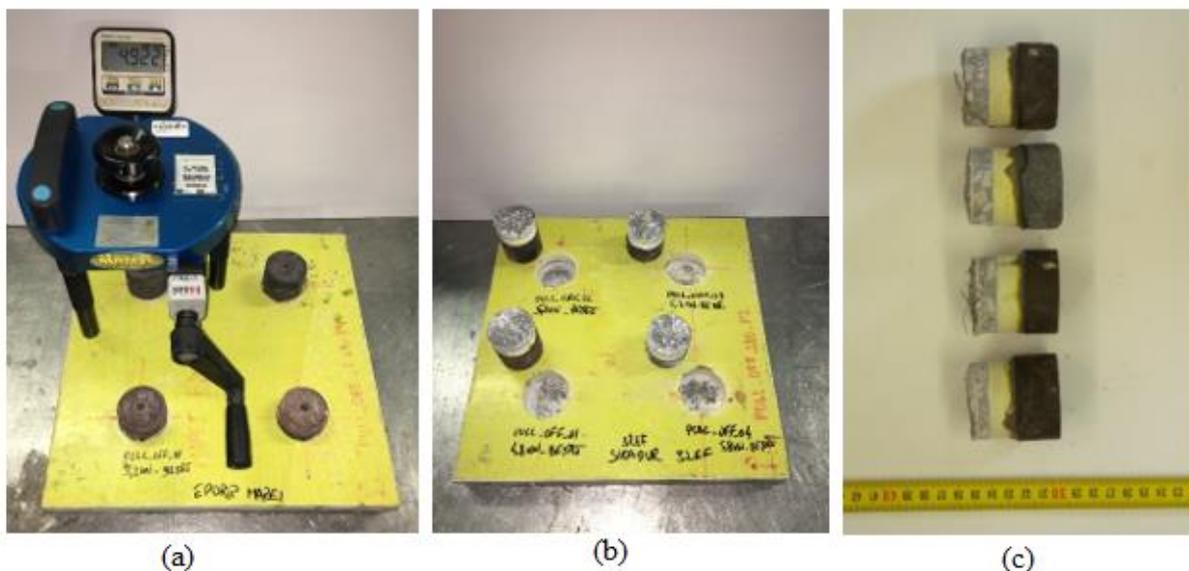


Figura 3.24 – Ensaio de arrancamento (“pull-off”): (a) Posicionamento da máquina e aplicação de carga (início); (b) Fase final do ensaio; (c) Modos de rotura identificados.

Segundo a norma ASTM C1583, a tensão de tração pode ser calculada de acordo com a equação (3.1),

$$f_{max} = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.1)$$

em que,

$f_{max}$  – tensão máxima no provete [MPa];

$P_{max}$  – força aplicada, fornecida pelo ensaio de “pull-off” [N];

$A$  – área de contato [mm<sup>2</sup>];

Em relação à nomenclatura genérica utilizada para os ensaios de “pull-off” apresentada na Tabela 3.7, nesta fase de ensaio acrescentou-se um sufixo, ficando P\_TT\_AN.X\_ON, em que 0N indica a posição do ensaio na placa de GFRP, de acordo com a Figura 3.5. A Figura 3.25 apresenta o final do ensaio tipo de “pull-off” e a nomenclatura utilizada nas Tabela 3.22, Tabela 3.23 e Tabela 3.24. A Figura 3.26 apresenta os modos de rotura tipo obtidos nos ensaios de “pull-off”. Antes de iniciar o ensaio de “pull-off”, em algumas placas, ocorreu não aderência entre o GFRP e o SCSFRMC, este modo de rotura é apresentado na Figura 3.27.

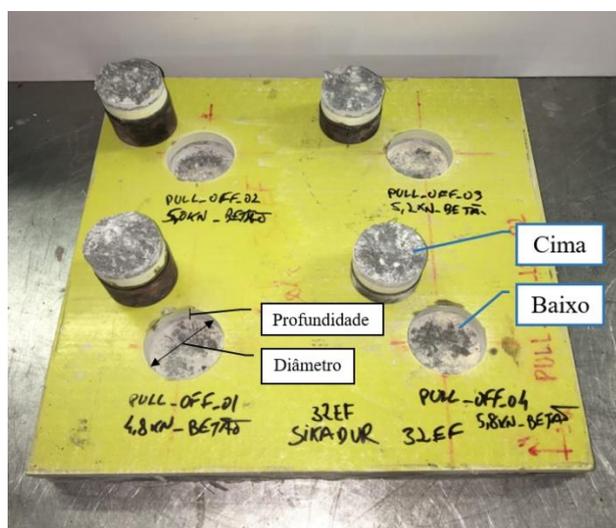


Figura 3.25 – Final do ensaio tipo de “pull-off”.

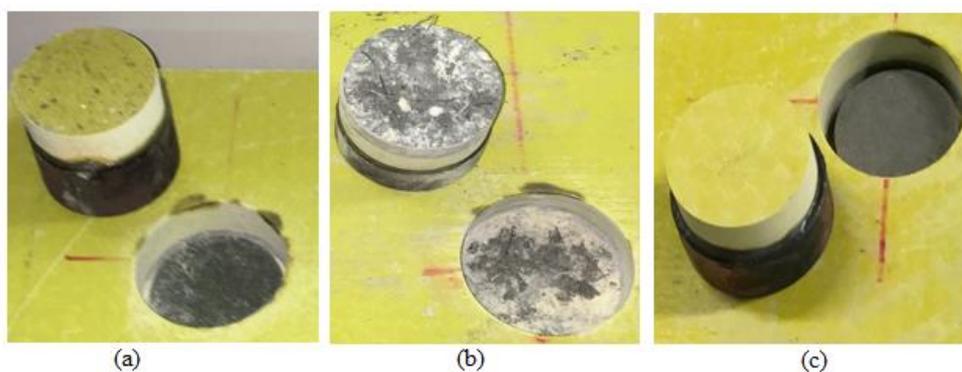


Figura 3.26 – Modos de rotura obtidos nos ensaios de “pull-off”: (a) rotura pelo adesivo; (b) rotura pelo SCSFRMC e (c) ligação descolou quando se iniciou o ensaio (descolado).



Figura 3.27 – Modo de rotura identificado antes do início do ensaio: não aderência entre GFRP/SCSFRMC (ligação descolada).

### 3.3.3 Ensaios de caracterização mecânica do SCSFRMC

Nesta fase, descrevem-se os ensaios relativos à caracterização do SCSFRMC utilizado no painel sanduíche híbrido.

A avaliação de desempenho do SCSFRMC projetado baseou-se na avaliação do comportamento à compressão e à flexão do SCSFRMC endurecido. Foram analisados cinco provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, dois provetes cúbicos de 150 mm de aresta e sete provetes prismáticos de  $600 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ . Estes provetes foram moldados sem qualquer aplicação externa de energia de compactação, em virtude das suas características de auto-compatibilidade.

Foram realizados ensaios de compressão em 5 provetes cilíndricos, a partir dos quais foram obtidos os valores médios do módulo de elasticidade ( $E_{cm}$ ) e de resistência à compressão ( $f_{cm}$ ), de acordo com as recomendações NP EN 12390-13:2014 e NP EN 12390-3:2011, respetivamente. Foram realizados, também, ensaios de compressão em 2 provetes cúbicos, a partir dos quais foram obtidos os valores médios de resistências à compressão ( $f_{cm}$ ), de acordo com as recomendações da NP EN 12390-3:2011.

Os ensaios em provetes de SCSFRMC foram realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST-UM).

Previamente aos ensaios de caracterização, procedeu-se cuidadosamente à retificação das faces onde viria a ser aplicada a força de compressão dos provetes cilíndricos e cúbicos, de modo a tornar a superfície completamente plana, sem que subsistisse qualquer descontinuidade resultante da fase de betonagem.

Na Tabela 3.10 e na Tabela 3.11 registam-se os dados geométricos dos provetes, assim como as suas designações. A designação genérica é BAC01\_CN\_DDd, em que BAC01 se refere ao material, CN representa o número do ensaio e DDd indica a idade do material no dia do ensaio. Inicialmente, mediram-se os provetes com um paquímetro e pesaram-se com uma balança digital, com precisões de 0.01 mm e 0.01 g, respetivamente (Tabela 3.10 e Tabela 3.11).

A densidade ou massa volúmica aparente do betão é calculada com base na relação entre o peso e o volume aparente dos provetes, (3.2).

$$\text{Densidade} = \frac{\text{Peso}}{\text{Área da base} \times \text{altura}} \quad (3.2)$$

Constatou-se que a densidade do material variava entre os 2280,9 kg/m<sup>3</sup> e os 2374,4 kg/m<sup>3</sup> para os cilindros e variava entre os 2298,4 kg/m<sup>3</sup> e os 2314,3 kg/m<sup>3</sup> para os cubos. A densidade foi calculada, para todos os provetes, após a respetiva pesagem, resultando num valor médio de 2343,71 kg/m<sup>3</sup> para os provetes cilíndricos e 2306,35 kg/m<sup>3</sup> para os provetes cúbicos.

Tabela 3.10 – Caraterização geométrica e designação dos provetes cilíndricos.

<b>Provete</b>	<b>Diâmetro [mm]</b>	<b>Altura [mm]</b>	<b>Peso [kg]</b>	<b>Densidade [kg/m<sup>3</sup>]</b>
BAC01_C1_28d	149.00	296.00	12.05	2334.71
BAC01_C2_28d	148.00	298.00	12.15	2369.99
BAC01_C3_31d	148.00	295.00	12.05	2374.39
BAC01_C4_31d	149.00	293.00	12.05	2358.61
BAC01_C5_31d	150.00	294.00	11.85	2280.86
<b>Média</b>	<b>148.80</b>	<b>295.20</b>	<b>12.03</b>	<b>2343.71</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.75</b>	<b>1.72</b>	<b>0.10</b>	<b>34.31</b>
<b>CoV [%]</b>	<b>0.50</b>	<b>0.58</b>	<b>0.83</b>	<b>1.46</b>

Tabela 3.11 – Caracterização geométrica e designação dos provetes cúbicos.

<b>Provete</b>	<b>Largura – b<sub>1</sub></b>	<b>Largura – b<sub>2</sub></b>	<b>Espessura – t</b>	<b>Peso</b>	<b>Densidade</b>
BAC01_C6_28d	149.00	150.00	146.00	7.50	2298.43
BAC01_C7_28d	149.00	149.00	145.00	7.45	2314.28
<b>Média</b>	<b>149.00</b>	<b>149.50</b>	<b>145.50</b>	<b>7.48</b>	<b>2306.35</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.00</b>	<b>0.50</b>	<b>0.50</b>	<b>0.02</b>	<b>7.93</b>
<b>CoV [%]</b>	<b>0.00</b>	<b>0.33</b>	<b>0.34</b>	<b>0.27</b>	<b>0.34</b>

### 3.3.3.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

O ensaio de resistência à compressão consiste na aplicação de uma força de compressão progressivamente crescente sobre as superfícies do cilindro ou do cubo até à respetiva rotura.

Inicialmente, foram ensaiados dois provetes cilíndricos e dois provetes cúbicos até à rotura por compressão. Após ser conhecida a resistência média à compressão do betão, foram ensaiados os restantes três provetes cilíndricos para a obtenção do módulo de elasticidade. Os provetes utilizados na determinação do módulo de elasticidade foram posteriormente ensaiados até à rotura em compressão.

O procedimento adotado para a avaliação da relação tensão-deformação axial dos provetes cilíndricos e cúbicos de SCSFRMC seguiu as recomendações da NP EN 12390-13:2014 e NP EN 12390-3:2011. Cada ensaio foi realizado numa máquina de ensaio “servo-controlada” com capacidade de carga de 3000 kN. O procedimento de controlo de ensaio foi definido usando o deslocamento axial como variável de controle, medido pelo transdutor de deslocamento interno instalado no atuador. A taxa de deslocamento axial imposta foi de 5 µm/s. Os resultados foram obtidos a partir de três transdutores de deslocamento externos espaçados radialmente de 120° em torno do provete, registando o deslocamento entre os dois pratos de carga de aço opostos. O deslocamento axial médio foi calculado a partir desses resultados.

O registo dos dados (força e deslocamento entre pratos) foi efetuado num computador através de uma unidade de aquisição de dados modular 600 da RDP. A Figura 3.28a e a Figura 3.29a apresentam o sistema de ensaio e o equipamento utilizado. A Figura 3.28b ilustra um dos provetes cilíndricos ensaiado (modo de rotura).

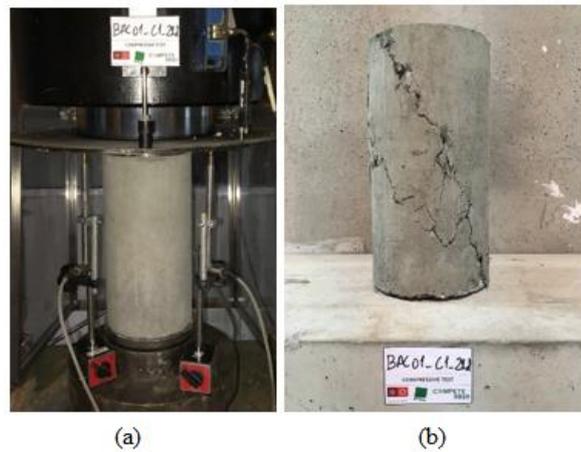


Figura 3.28 – (a) Realização do ensaio à compressão; (b) modo de rotura típico observado nos provetes cilíndricos.

A Figura 3.29b ilustra um dos provetes cúbicos ensaiado (modo de rotura).

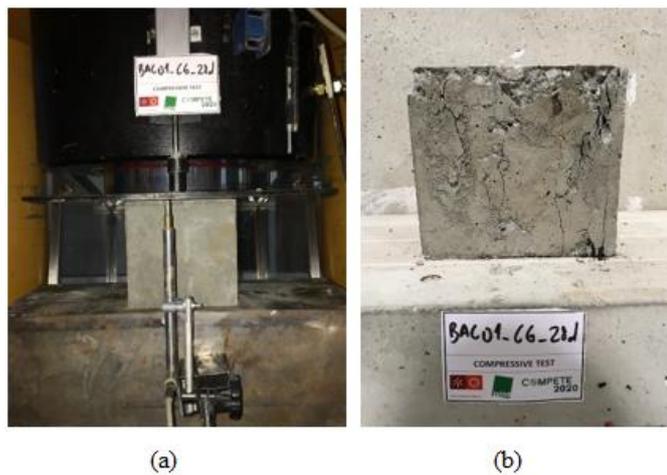


Figura 3.29 – (a) Realização do ensaio à compressão; (b) modo de rotura típico observado nos provetes cúbicos.

### 3.3.3.2 Caracterização do comportamento à flexão

Com objetivo de caracterizar o comportamento à flexão do SCSFRMC, a utilizar nos painéis sanduíche híbridos, foram ensaiados sete provetes prismáticos de  $600 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ . Foram executados ensaios em condições de carregamento de três pontos, de acordo com as recomendações do RILEM TC 162-TDF (2002).

### Sistema de ensaio proposto pelo RILEM TC 162-TDF (2002)

A Figura 3.30 representa o esquema de suporte e de aplicação de carga sugerido pela RILEM TC 162-TDF (2002). Aplica-se um LVDT junto ao entalhe executado no SCSFRMC, de forma a estimar a abertura de fenda e assegurar, com maior estabilidade, o controlo do ensaio.

A Figura 3.31 ilustra o sistema de ensaio de flexão, utilizado no presente trabalho, de acordo com as recomendações do RILEM anteriormente referidas.

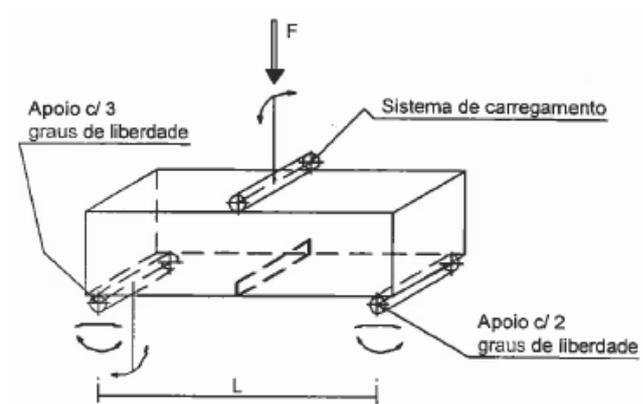


Figura 3.30 – Esquema de suporte e de aplicação da carga no ensaio de flexão, (Barros *et al.*, 2011).

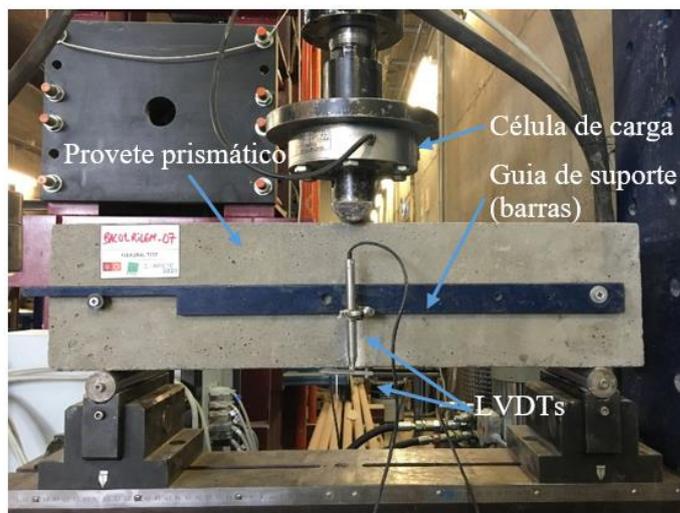


Figura 3.31 – Sistema de ensaio utilizado (de acordo com a recomendação do RILEM).

O equipamento utilizado nos ensaios deve ter os seguintes requisitos (Barros *et al.*, 2011):

- A deformação deve ser medida em ambas as faces do provete;
- O transdutor de força deve ser capaz de ler forças de 0.1 kN;
- Os transdutores de deslocamento devem ser capazes de medir deslocamentos de 10  $\mu\text{m}$ ;
- A rigidez do sistema de reação deve ser suficientemente elevada de forma a assegurar a estabilidade do ensaio. Ensaio em que ocorram instabilidades devem ser rejeitados;

- Deve possibilitar a realização do ensaio sob controlo de deslocamentos de forma a ser possível obter a resposta para além do pico de carga, pelo que são geralmente equipamentos servo-controlados (ou em malha fechada), (Freitas *et al.* 1988, Barros e Sena 2001);
- As barras nas quais se fixam os transdutores de deslocamento (LVDTs) devem ficar ligadas a dois pontos do provete que não se deslocam, de forma a não serem registados deslocamentos parasitas nos referidos transdutores. A barra deve poder rodar em torno de um desses pontos e deslizar sobre o outro ponto de apoio;
- A estrutura de reação deve ser suficientemente rígida de forma a evitar a ocorrência de ensaios instáveis. A instabilidade está associada a uma perda de carga acentuada e brusca no início da fase de amolecimento do material, isto é, no ramo em que a força decresce e a deformação aumenta. A utilização de elementos deformáveis entre o sistema de aplicação de carga/reação e o provete contribui geralmente para a ocorrência de ensaios instáveis;
- Se a fenda não se iniciar na boca do entalhe, o ensaio deve ser rejeitado.

A Figura 3.32 representa o equipamento e sistema de reação utilizado no presente trabalho de acordo com o proposto pelo RILEM.



Figura 3.32 – Equipamento e sistema de reação utilizado nos ensaios de flexão.

### Execução de entalhes no SCSFRMC

Nos ensaios foram utilizados provetes com um comprimento de 600 mm e uma secção transversal de  $150 \times 150 \text{ mm}^2$ , conforme já referido. As vigas foram entalhadas a meio vão, numa das faces perpendiculares à superfície de betonagem, conforme sugerido na norma. A profundidade e espessura do entalhe foram 25 mm e 5.50 mm, respetivamente.

O processo de abertura dos entalhes nos provetes prismáticos realizou-se na empresa Artecanter – Indústria Criativa Lda. Na Figura 3.33 é apresentado este processo que, recorre a uma máquina de corte de elevada precisão para que seja obtida a largura e a profundidade desejada. Com a finalidade de remover poeiras e resíduos provenientes do processo de corte procedeu-se à limpeza com jato de água de todas as ranhuras executadas.



Figura 3.33 – Abertura de entalhes em provetes prismáticos.

As dimensões dos entalhes foram analisadas de modo a avaliar a precisão da sua execução. Mediram-se os provetes com um paquímetro e pesaram-se numa balança digital com uma precisão de 0.01 mm e 0.01 g, respetivamente. Foram medidos valores de base e largura dos provetes em 6 secções distintas e valores de comprimento do provete e altura do entalhe em 3 secções distintas. Apresentam-se na Tabela 3.12 os valores médios das medições efetuadas em cada provete.

A designação genérica é BAC01\_RILEM\_NN, em que BAC01 refere-se ao material, RILEM representa a norma que rege o ensaio e NN indica a numeração do ensaio.

Tabela 3.12 – Caracterização geométrica e designação dos provetes dos ensaios de flexão.

<b>Provetes</b>	<b>Base [mm]</b>	<b>Altura [mm]</b>	<b>Comprimento [mm]</b>	<b>Altura do entalhe [mm]</b>	<b>Densidade [kg/m<sup>3</sup>]</b>
BAC01_RILEM_01	151.50	151.33	599.50	24.75	2328.16
BAC01_RILEM_02	150.17	149.00	600.83	25.12	2346.11
BAC01_RILEM_03	150.17	150.33	600.50	24.36	2328.07
BAC01_RILEM_04	151.67	150.00	602.17	24.78	2334.43
BAC01_RILEM_05	150.17	151.00	597.83	24.92	2307.47
BAC01_RILEM_06	151.83	152.33	594.83	24.74	2365.16
BAC01_RILEM_07	149.67	150.00	600.17	26.54	2354.21
<b>Média</b>	<b>150.74</b>	<b>150.57</b>	<b>599.40</b>	<b>25.03</b>	<b>2337.66</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.82</b>	<b>1.00</b>	<b>2.23</b>	<b>0.65</b>	<b>17.75</b>
<b>CoV [%]</b>	<b>0.55</b>	<b>0.67</b>	<b>0.37</b>	<b>2.60</b>	<b>0.76</b>

Tal como referido anteriormente, os ensaios monotónicos de flexão em 3 pontos permitiram caracterizar o comportamento em flexão dos provetes prismáticos, tendo-se seguido as recomendações do RILEM TC 162-TDF (2002). Na generalidade, a totalidade dos requisitos sugeridos pela referida norma para a preparação dos provetes foram cumpridos. Contudo, o procedimento de betonagem dos moldes sugerido na mesma não é aplicável ao presente caso, visto que a elevada fluidez do betão auto-compactável utilizado não o permitiu.

Os provetes foram colocados sobre apoios de roletes perfazendo um vão livre de 500 mm, conforme apresentado na Figura 3.34.

Os ensaios foram efetuados num equipamento hidráulico servo-controlado com capacidade para 200 kN. Utilizou-se uma célula de carga de 100 kN com uma precisão de 0.1 kN. Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, impondo-se um incremento de deslocamento constante de 0.2 mm/min a meio vão do provete prismático. Instalaram-se dois transdutores de deslocamento, com uma gama de medida de 10 mm para a medição do deslocamento a meio vão e do “Crack Mouth Opening Displacement” (CMOD), respetivamente. A Figura 3.34 apresenta a configuração adotada nos ensaios realizados.

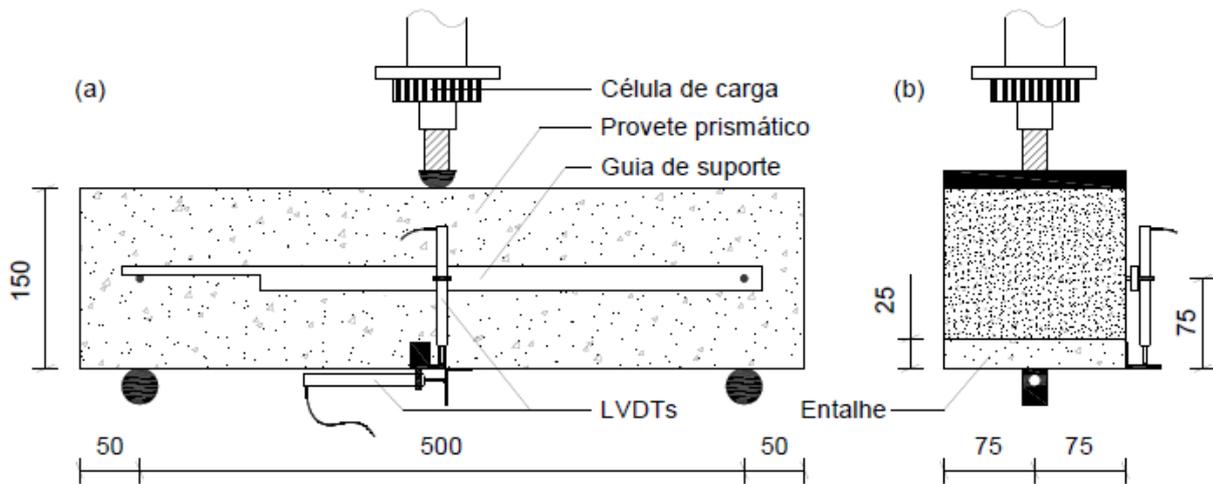


Figura 3.34 – Esquema do ensaio à flexão em 3 pontos incluindo dimensões do provete e disposição dos transdutores: (a) Vista de perfil; (b) Vista em corte. Nota: cotas em [mm] (Escusa *et al.*, 2015).

### 3.4 Resultados e análise

#### 3.4.1 Materiais intervenientes: GFRP

Considerando as três diferentes metodologias de preparação da superfície de GFRP (SP24, SP80 e NT) aplicadas nas placas de GFRP da presente investigação e, de modo a identificar a sua influência nos resultados obtidos nos ensaios de “*pull-off*”, foi medida a rugosidade da superfície, conforme descrito em 3.3.2.

A Figura 3.35 apresentada os níveis de rugosidade representativos das diferentes superfícies, quando utilizadas as diferentes técnicas de tratamento (SP24, SP80 e NT).

A partir desta análise, verificou-se que o tratamento com lixa 24 permitiu que a superfície apresentasse maior remoção do acabamento final fornecido pelo fabricante do que a superfície onde o tratamento com lixa 80 foi aplicado, tal como seria expectável. Conforme previsto, as superfícies que não sofreram tratamento apresentam uma superfície mais lisa do que as superfícies onde foram aplicados os dois tratamentos superficiais anteriormente referidos.

Nesta fase do projeto, a nomenclatura utilizada foi P\_TT\_ND em que P se refere ao tipo de ensaio, neste caso “*pull-off*”; TT indica o tipo de tratamento da superfície de GFRP, isto é, NT representa sem aplicação de tratamento da superfície, SP80 representa aplicação de lixa 80 e SP24 representa aplicação de lixa 24; N representa o número do ensaio e D a direção da medição da rugosidade.

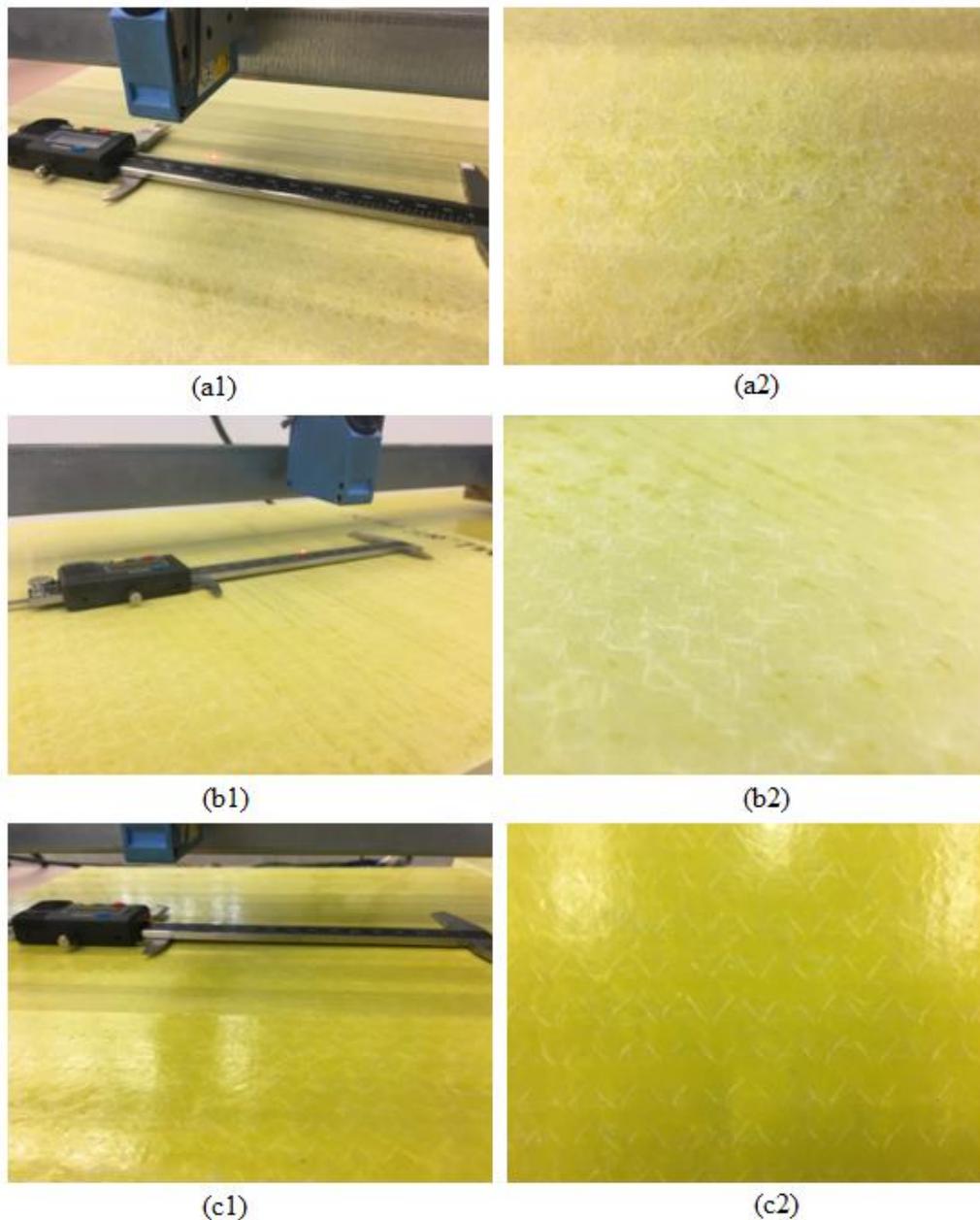


Figura 3.35 – Diferentes níveis de rugosidade das superfícies de GFRP: (a) tratamento com lixa 24; (b) tratamento com lixa 80 e (c) sem tratamento de superfície.

A Figura 3.36 apresenta três perfis representativos das diferentes superfícies (SP24, SP80 e NT) ao longo de um comprimento de 150 mm, quando utilizadas as diferentes técnicas de tratamento. Apesar da precisão do laser permitir a obtenção de rugosidade nas placas de GFRP, esta não foi encontrada de acordo com os resultados previstos, sendo o nível de rugosidade observado nas placas sem tratamento de superfície elevado, comparativamente com os dois tratamentos de superfície aplicados (SP24 e SP80).

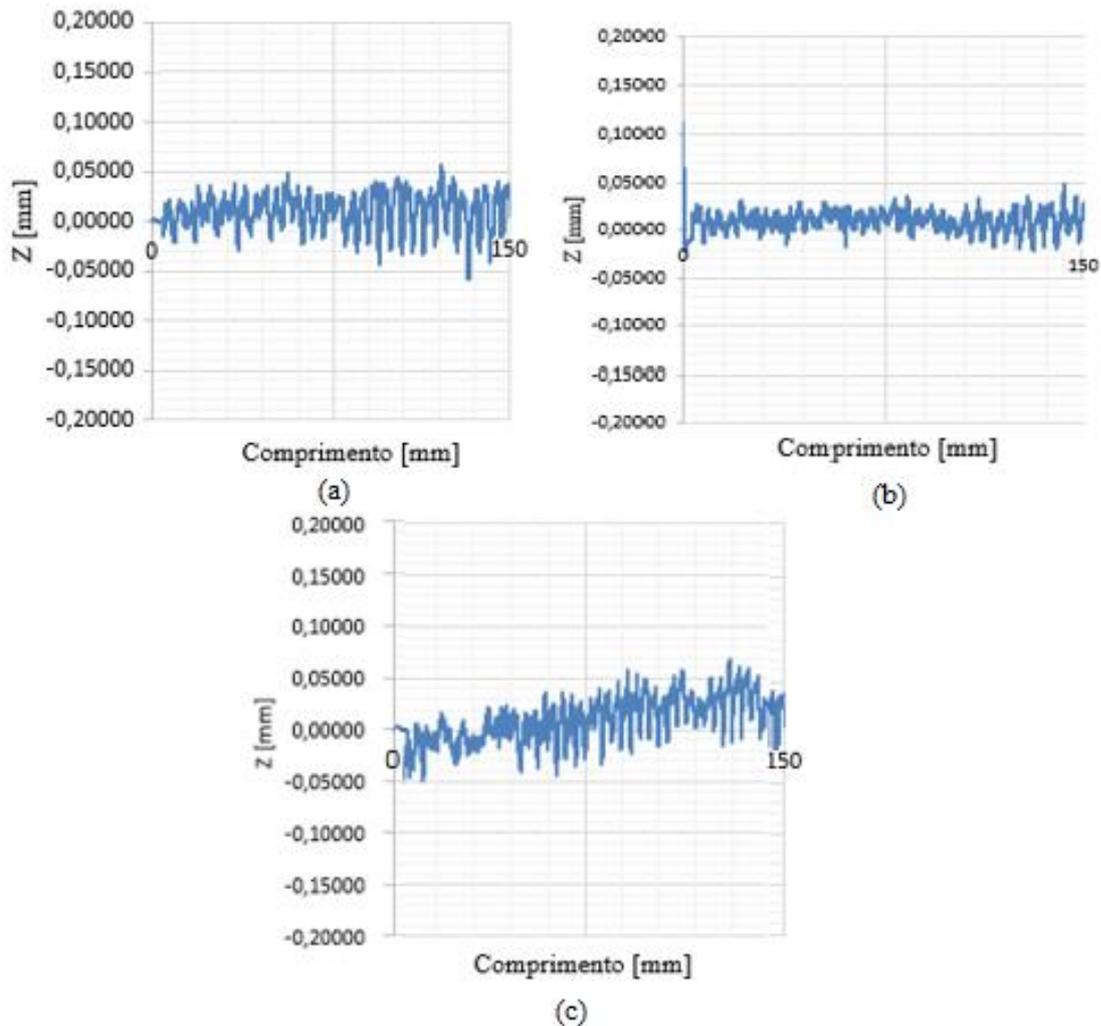


Figura 3.36 – Perfil de rugosidade obtido pelo laser: (a) tratamento com lixa 24; (b) tratamento com lixa 80 e (c) sem tratamento de superfície.

De modo a caracterizar quantitativamente o nível de rugosidade apresentado por cada uma das superfícies após a aplicação do tratamento, foram aplicados vários indicadores estatísticos aos resultados das medições da rugosidade ao longo dos perfis longitudinais centrais monitorizados pelo sensor laser. Os indicadores utilizados foram os seguintes: a rugosidade média ( $R_m$ ), o valor quadrático médio da rugosidade ( $R_q$ ), a profundidade máxima do perfil ( $R_v$ ), a altura máxima do perfil ( $R_p$ ) e a diferença entre altura máxima e a profundidade máxima do perfil ( $R_t$ ). A rugosidade média do perfil ( $R_m$ ), foi calculada de acordo com as recomendações do Model Code (2010), por aplicação das equações (3.3) e (3.4). Relativamente ao valor quadrático médio da rugosidade ( $R_q$ ), este foi calculado de acordo com a equação (3.5). Nas supracitadas equações, os parâmetros  $l$ ,  $z(x)$  e  $n$  representam o comprimento de avaliação da rugosidade, a altura do perfil na posição  $x$  e o número de leituras efetuadas pelo sistema de medição,

respetivamente. Estes e os restantes parâmetros utilizados na caracterização da rugosidade têm vindo a ser utilizados por outros investigadores, (Correia *et al.*, 2015).

$$R_m = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x) - \bar{z}| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i - \bar{z}| \quad (3.3)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{l} \int_0^l z(x) dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x) \quad (3.4)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (3.5)$$

A Tabela 3.13 e a Tabela 3.14 apresentam os resultados da caracterização da rugosidade da superfície das placas de GFRP que compõem o presente programa experimental, após terem sido aplicados os indicadores estatísticos mencionados.

Observando os resultados obtidos é possível concluir que a aplicação de tratamento com lixa 24 permite uniformizar a superfície de GFRP, diminuindo assim, a sua rugosidade.

Analisando a Tabela 3.13, observa-se que o tratamento com lixa 80 permitiu um aumento médio de 300% em termos de rugosidade média ( $R_m$ ) e um aumento médio de 291% em termos de valor quadrático médio ( $R_q$ ), em relação à preparação da superfície com lixa 24. Quanto aos valores de profundidade máxima ( $R_v$ ) e altura máxima do perfil ( $R_p$ ) obtidos em provetes com tratamento de lixa 80 também se obtiveram valores de maior ordem de grandeza, o que fez com que a diferença entre a altura máxima e a profundidade máxima do perfil ( $R_t$ ) fosse 127% superior à que foi obtida em provetes com tratamento de superfície com lixa 24.

Tabela 3.13 – Resultados da caracterização da rugosidade da superfície, perfil obtido na direção XX.

Provetes	Parâmetros de caracterização da rugosidade [mm]				
	$R_q$	$R_v$	$R_p$	$R_t$	$R_m$
SP24_XX	0.022	-0.080	0.090	0.170	0.018
	(11.24%)	(9.13%)	(42.03%)	(21.02%)	(12.33%)
SP80_XX	0.086	-0.202	0.184	0.386	0.072
	(119.67%)	(92.33%)	(83.24%)	(87.86%)	(123,61%)
NT_XX	0.067	-0.164	0.150	0.314	0.056
	(33.91%)	(12.96%)	(43.62%)	(22.72%)	(33.48%)

Notas: os resultados entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV %).

Analisando a Tabela 3.14, verifica-se que a não aplicação de tratamento de superfície em termos de rugosidade média ( $R_m$ ) e de valor quadrático médio ( $R_q$ ), permitiu um aumento médio de 56% e 24,17%, respetivamente, em relação à preparação da superfície com lixa 24. Quanto à diferença entre a altura máxima e a profundidade máxima do perfil ( $R_t$ ) obtida para o tratamento com lixa 24 foi 5% superior à que foi obtida em provetes sem aplicação de tratamento de superfície.

Tabela 3.14 – Resultados da caracterização da rugosidade da superfície, perfil obtido na direção YY.

Provetes	Parâmetros de caracterização da rugosidade [mm]				
	$R_q$	$R_v$	$R_p$	$R_t$	$R_m$
SP24_YY	0.211	-0.302	0.674	0.977	0.144
	(12.13%)	(18.59%)	(7.26%)	(5.97%)	(22.95%)
SP80_YY	0.212	-0.349	0.544	0.893	0.159
	(48.93%)	(45.52%)	(45.29%)	(40.99%)	(53.52%)
NT_YY	0.262	-0.504	0.428	0.933	0.225
	(6.25%)	(11.56%)	(14.42%)	(4.72%)	(7.19%)

Notas: os resultados entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV %).

Um aspeto importante a realçar, é o facto de os valores de coeficiente de variação (CoV) obtidos serem significativos, o que reflete a dificuldade em obter uma rugosidade superficial uniforme. Esta está muito dependente da habilidade e da experiência humana na execução da técnica de tratamento superficial, o que se torna um aspeto crítico quando se produzem provetes nas mesmas condições de ensaio, onde, desejavelmente, se procura obter os mesmos níveis de rugosidade.

### 3.4.2 Materiais intervenientes: SCSFRMC

#### Resistência à compressão

A resistência à compressão é calculada através da expressão (3.6):

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

$f_c$  – resistência à compressão [MPa];

F – carga máxima à rotura [N];

$A_c$  – área da secção transversal do provete [mm<sup>2</sup>].

(3.6)

Assim, conhecidas a área e a força máxima registada, calculou-se a resistência à compressão para os diversos provetes. Posteriormente, calculou-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada conjunto de provetes. Na Tabela 3.15 apresentam-se os respetivos valores. No âmbito do presente projeto, o SCSFRMC tinha como requisitos a obtenção de uma resistência à compressão  $f_{cm}$  igual ou superior a 30 MPa e um módulo de elasticidade,  $E_{cm}$ , entre os 23 e os 25 GPa. Portanto, o SCSFRMC desenvolvido cumpriu os requisitos perseguidos, conforme se comprova nas Tabela 3.15 e Tabela 3.16, respetivamente.

Tabela 3.15 – Resistência à compressão em provetes cilíndricos e cúbicos.

<b>Grupo</b>	<b>Provete</b>	<b><math>f_{cm}</math> [MPa]</b>
<b>Provetes Cilíndricos</b>	BAC01_C1_28d	44.37
	BAC01_C2_28d	30.15
	BAC01_C3_31d	38.25
	BAC01_C4_31d	47.26
	BAC01_C5_31d	46.89
	<b>Média</b>	<b>41.38</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>6.48</b>
	<b>CoV [%]</b>	<b>15.66</b>
<b>Provetes Cúbicos</b>	BAC01_C6_28d	44.54
	BAC01_C7_28d	45.57
	<b>Média</b>	<b>45.05</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.51</b>
	<b>CoV [%]</b>	<b>1.13</b>

Nos ensaios de compressão do SCSFRMC, os modos de rotura observados foram considerados válidos de acordo com a norma de ensaio utilizada. A Figura 3.37 ilustra os provetes tipo após o ensaio, assim como os seus modos de rotura.

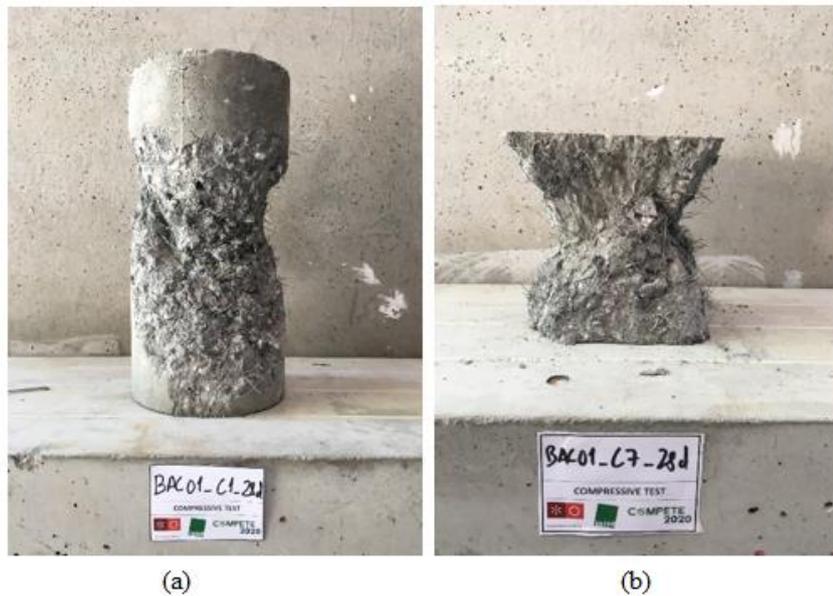


Figura 3.37 – Final do ensaio: (a) modo de rotura por compressão dos provetes cilíndricos e (b) modo de rotura por compressão dos provetes cúbicos.

### Módulo de elasticidade em compressão

Segundo a especificação da NP EN 12390-13:2014 foram obtidos os valores médios do módulo de elasticidade ( $E_{cm}$ ). A Tabela 3.16 apresenta os resultados do módulo de elasticidade obtidos.

Tabela 3.16 – Módulo de elasticidade em compressão do SCSFRMC.

<b>Módulo de Elasticidade</b>	<b><math>E_{cm}</math></b>
	<b>[GPa]</b>
Módulo 1	23.86
Módulo 2	21.43
Módulo 3	23.73
<b>Média</b>	<b>23.01</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1.12</b>
<b>CoV [%]</b>	<b>4.87</b>

### Comportamento de Flexão

Na Figura 3.38 ilustram-se as respostas de tensão em flexão versus CMOD obtidas para os provetes analisados. Estes provetes foram ensaiados aos 28 dias de idade do SCSFRMC.

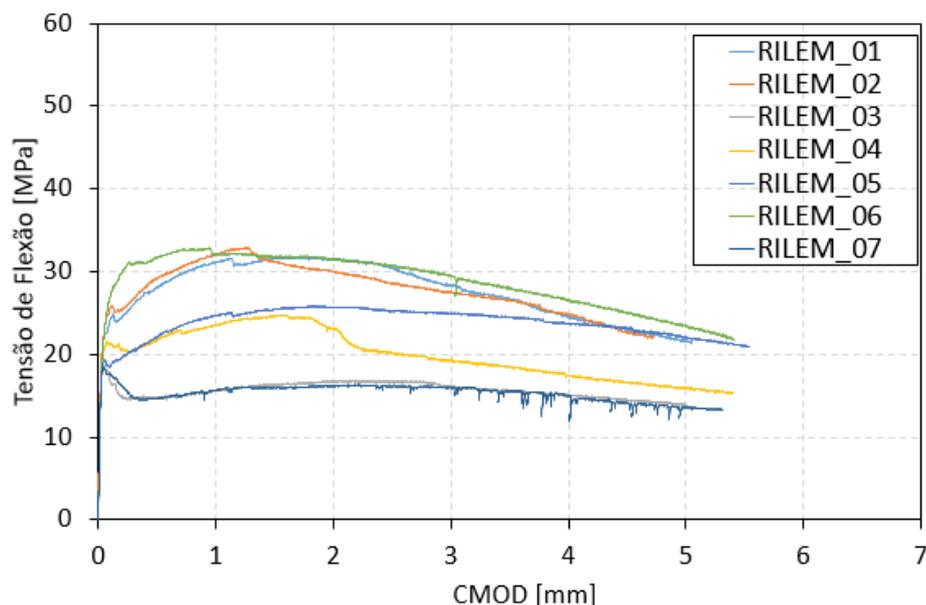


Figura 3.38 – Provetes ensaiados aos 28 dias de idade: respostas tensão em flexão vs. CMOD.

As curvas tensão em flexão versus CMOD apresentam dispersão de resultados e a tensão máxima em flexão obtida apresenta variações importantes de provete para provete. Na Figura 3.38 pode observar-se que o SCSFRMC apresenta um comportamento em flexão característico de uma matriz moderadamente reforçada, identificando-se as seguintes regiões: (i) ramo linear-elástico aproximadamente até aos 17.5 MPa; (ii) endurecimento em flexão após a localização da macro-fissura até sensivelmente 25 MPa; (iii) fase de amolecimento gradual. Relativamente ao comportamento do pré-pico, após a força correspondente ao limite de proporcionalidade ser atingida, é de salientar que foi observada uma ténue diminuição da força imediatamente seguida de um endurecimento em flexão, até uma deformação aproximada de 1 mm, devido à mobilização dos mecanismos de reforço das fibras. Após a força máxima ser atingida, de uma forma geral, observa-se um patamar até uma deformação de 1.5 mm.

Relativamente aos provetes 3 e 7, a diminuição acentuada da força pode ser justificada com uma menor quantidade de fibras nesses provetes.

### Contagem de fibras de aço na superfície de fratura

O SCSFRMC utilizado é classificado como um micro-betão auto-compactável reforçado com fibras de aço. As suas propriedades reológicas no estado fresco proporcionam uma distribuição de fibras mais uniforme, e uma orientação mais efetiva das mesmas segundo a direção do escoamento da betonagem num provete ou elemento estrutural (V.M.C.F. Cunha *et al.*, 2008). A generalidade dos provetes revelou um número semelhante de fibras na superfície de fratura, com a exceção dos provetes 1 e 7 que apresentaram, respetivamente, o maior e o menor número de fibras comparativamente com os restantes provetes. Na Tabela 3.17 apresenta-se o número de fibras identificadas em cada uma das superfícies de fratura dos provetes ensaiados.

Tabela 3.17 – Número médio de fibras na superfície de fratura

Provetes	Nº médio de fibras		Nº total de fibras
	Face esquerda	Face direita	
BAC01_RILEM_01	189	217	406
BAC01_RILEM_02	154	159	313
BAC01_RILEM_03	134	143	277
BAC01_RILEM_04	160	145	305
BAC01_RILEM_05	139	169	308
BAC01_RILEM_06	142	151	293
BAC01_RILEM_07	128	114	242

A Figura 3.39 apresenta o provete prismático tipo, após o ensaio de flexão.

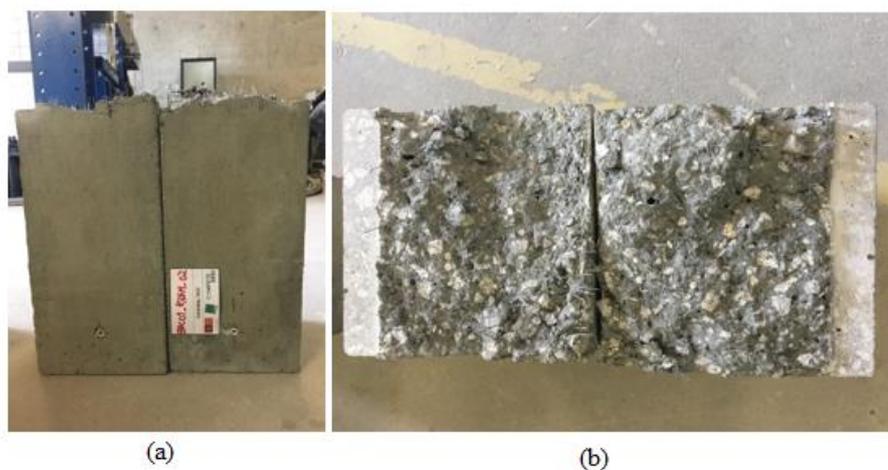


Figura 3.39 – Provede tipo após o ensaio de flexão: (a) vista lateral e (b) superfície de fratura

**Tensões residuais e equivalentes à tração em flexão**

Na Tabela 3.18, apresentam-se os valores médios das tensões obtidas para cada série, sendo que  $f_{ct,L}$  representa a tensão limite de proporcionalidade;  $\delta_L$  representa o deslocamento a meio vão correspondente ao limite de proporcionalidade;  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$  traduzem a tensão de tração equivalente em flexão 2 e 3, respetivamente;  $f_{R,j}$  indica a resistência residual em flexão correspondente ao  $CMOD_j$ . As tensões de tração residuais e equivalentes em flexão foram determinadas a partir das recomendações dispostas na norma RILEM TC 162-TDF (2002).

Tabela 3.18 – Resultados das tensões residuais e equivalentes à tração em flexão.

<b>Provetes</b>	$f_{ct,L}$ [MPa]	$\delta_L$ [mm]	$f_{eq,2}$ [MPa]	$f_{eq,3}$ [MPa]	$f_{R,1}$ [MPa]	$f_{R,2}$ [MPa]	$f_{R,3}$ [MPa]	$f_{R,4}$ [MPa]
BAC01_RILEM_01	6.52	0.05	8.91	9.29	8.66	9.76	9.38	8.25
BAC01_RILEM_02	6.68	0.05	9.86	9.67	9.48	10.16	9.30	8.64
BAC01_RILEM_03	5.70	0.05	4.53	5.01	4.67	5.14	5.24	4.93
BAC01_RILEM_04	6.50	0.05	6.92	6.85	6.85	7.78	6.38	5.79
BAC01_RILEM_05	5.56	0.05	7.13	7.74	6.95	8.00	7.92	7.67
BAC01_RILEM_06	6.19	0.05	10.23	9.57	9.63	9.67	9.32	8.51
BAC01_RILEM_07	6.03	0.05	4.72	5.14	4.83	5.26	5.29	5.13
<b>Média</b>	<b>6.17</b>	<b>0.05</b>	<b>7.47</b>	<b>7.61</b>	<b>7.30</b>	<b>7.97</b>	<b>7.55</b>	<b>6.99</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.40</b>	<b>0.00</b>	<b>2.14</b>	<b>1.87</b>	<b>1.91</b>	<b>1.94</b>	<b>1.75</b>	<b>1.52</b>
<b>CoV [%]</b>	<b>6.46</b>	<b>0.98</b>	<b>28.62</b>	<b>24.54</b>	<b>26.11</b>	<b>24.32</b>	<b>23.19</b>	<b>21.80</b>

Relativamente ao limite de proporcionalidade,  $f_{ct,L}$ , o qual corresponde ao fim da fase linear elástica, isto é, ao início da fendilhação, foi observado pouca dispersão entre os resultados.

As resistências equivalentes e residuais, as resistências  $f_{eq,2}$  e  $f_{R,1}$ , as quais estão associadas aos estados limites de utilização e para as resistências  $f_{eq,3}$  e  $f_{R,4}$ , correspondendo aos estados limites últimos, constatou-se que os valores obtidos variam significativamente. Isto deve-se certamente com a quantidade de fibras de aço embebidas no SCSFRMC, não sendo esta controlável ao nível da quantidade de fibras para cada provete.

### 3.4.3 Ensaio de “pull-off”

Nesta secção, são apresentados os resultados obtidos no programa de ensaios de tipo “pull-off” em estudo, assim como, as principais conclusões retiradas.

A Tabela 3.19, a Tabela 3.20 e a Tabela 3.21 apresentam os resultados obtidos nos vários parâmetros que caracterizam o comportamento da ligação entre o GFRP e o SCSFRMC. Os valores apresentados em cada tabela correspondem aos provetes ensaiados nas mesmas condições, mais concretamente, onde a superfície de GFRP foi sujeita ao mesmo processo de tratamento de superfície. Nas referidas tabelas,  $P_{max}$  traduz a força de arranque máxima registada (fornecida pelo ensaio de “pull-off”); Voltas traduz o número de voltas aplicadas no equipamento de ensaio para conseguir separar um dos elementos constituintes do provete e o modo de rotura indica qual foi o elemento do provete que rompeu, sendo este verificado após ensaio. Por sua vez,  $f_{max}$  traduz a tensão máxima no provete, sendo esta determinada pela razão entre  $P_{max}$  e a área de contacto de superfície, conforme se apresenta na equação (3.1). Por fim, analisando um provete onde foram executados quatro ensaios de “pull-off” e tendo em conta apenas o modo de rotura mais observado, as tabelas apresentam a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação correspondentes. As tabelas apresentam, também, a comparação dos valores obtidos da tensão máxima em percentagem entre a análise tendo em conta o modo de rotura mais observado no provete, com todos os valores da tensão máxima, independentemente dos modos de rotura observados.

Analisando o mesmo modo de rotura entre quatro ensaios em cada provete, para cada material de ligação e, o correspondente tratamento de superfície de GFRP apresentados, verifica-se que o valor do CoV varia de 4,63% a 46,80%. Existem, portanto, valores do coeficiente de variação elevados que sugerem uma elevada variabilidade nos resultados obtidos. No entanto, os coeficientes de variação são aceitáveis para os provetes onde foram aplicados tratamento de superfície (SP24 e SP80) e adesivos. Nos provetes sem tratamento de superfícies e sem aplicação de adesivos nas placas de GFRP a dispersão de resultados é significativa.

Tabela 3.19 – Resultados dos ensaios de “pull-off”, com tratamento lixa 24 aplicado sobre as superfícies das placas de GFRP.

Provete	$P_{max}$	Voltas	Modo de rotura	$f_{max}$	Média	Desvio Padrão	CoV
	[kN]			[MPa]			
P_SP24_A1.1_01	4.4	43	Betão	2.80	<b>2.99</b>	<b>0.33</b>	<b>11.05</b>
P_SP24_A1.1_02	5.6	51	Betão	3.55			
P_SP24_A1.1_03	4.3	39	Betão	2.73	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>
P_SP24_A1.1_04	4.5	37	Betão	2.87			
P_SP24_A2.2_01	5.3	43	Betão	3.35	<b>3.23</b>	<b>0.15</b>	<b>4.63</b>
P_SP24_A2.2_02	5.3	43	Betão	3.36			
P_SP24_A2.2_03	5.1	44	Betão	3.22	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>
P_SP24_A2.2_04	4.7	41	Betão	2.99			
P_SP24_A3.3_01			Ligação descolada				
P_SP24_A3.3_02	1.4	40	Descolado	0.74			
P_SP24_A3.3_03			Ligação descolada				
P_SP24_A3.3_04			Ligação descolada				
P_SP24_A4.4_01	5.2	44	Betão	3.30	<b>3.11</b>	<b>0.15</b>	<b>4.97</b>
P_SP24_A4.4_02	4.9	49	Betão	3.12			
P_SP24_A4.4_03	4.4	45	Adesivo	2.80	<b>-2%</b>	<b>23%</b>	<b>26%</b>
P_SP24_A4.4_04	4.6	46	Betão	2.92			
P_SP24_A5.5_01	5.6	42	Adesivo	2.97	<b>2.99</b>	<b>0.24</b>	<b>8.04</b>
P_SP24_A5.5_02	4.8	40	Adesivo	2.58			
P_SP24_A5.5_03	6.1	45	Betão	3.23	<b>-4%</b>	<b>2%</b>	<b>6%</b>
P_SP24_A5.5_04	5.2	42	Betão	2.75			

Tabela 3.20 – Resultados dos ensaios de “pull-off”, com tratamento lixa 80 aplicado sobre as superfícies das placas de GFRP.

Provete	$P_{max}$	Voltas	Modo de rotura	$f_{max}$	Média	Desvio Padrão	CoV
	[kN]			[MPa]			
P_SP80_A1.1_01	6.3	40	Betão	3.33	<b>3.27</b>	<b>0.38</b>	<b>11.60</b>
P_SP80_A1.1_02	5	39	Betão	2.68			
P_SP80_A1.1_03	6.3	43	Betão	3.35			
P_SP80_A1.1_04	7	60	Betão	3.73			
P_SP80_A2.2_01	4.8	43	Betão	2.62	<b>2.85</b>	<b>0.20</b>	<b>7.02</b>
P_SP80_A2.2_02	5	36	Betão	2.76			
P_SP80_A2.2_03	5.2	37	Betão	2.86			
P_SP80_A2.2_04	5.8	37	Betão	3.16			
P_SP80_A3.3_01	0.3	26	Descolado	0.19	<b>0.17</b>	<b>0.08</b>	<b>46.80</b>
P_SP80_A3.3_02	0.4	24	Descolado	0.25			
P_SP80_A3.3_03	0.1	17	Descolado	0.06			
P_SP80_A3.3_04			Ligação descolada				
P_SP80_A4.4_01	4.7	50	Betão	3.00	<b>3.31</b>	<b>0.23</b>	<b>6.97</b>
P_SP80_A4.4_02	5.6	57	Betão	3.55			
P_SP80_A4.4_03	5.3	50	Betão	3.39			
P_SP80_A4.4_04	5.5	58	Adesivo	3.52			
P_SP80_A5.5_01	4.4	45	Betão	2.80	<b>2.88</b>	<b>0.31</b>	<b>10.78</b>
P_SP80_A5.5_02	2.2	44	Adesivo	1.40			
P_SP80_A5.5_03	5.1	47	Betão	3.29			
P_SP80_A5.5_04	4	42	Betão	2.55			
					<b>-13%</b>	<b>123%</b>	<b>156%</b>

Tabela 3.21 – Resultados dos ensaios de “pull-off”, sem tratamento de superfícies nas placas de GFRP.

Provete	$P_{max}$	Voltas	Modo de rotura	$f_{max}$	Média	Desvio Padrão	CoV
	[kN]			[MPa]			
P_NT_A1.1_01	4.4	41	Betão	2.81	<b>1.57</b>	<b>0.42</b>	<b>26.65</b>
P_NT_A1.1_02	3.2	40	Adesivo	2.04			
P_NT_A1.1_03	1.6	34	Adesivo	1.02			
P_NT_A1.1_04	2.6	33	Adesivo	1.65			
P_NT_A2.2_01	6	37	Betão	3.28	<b>3.27</b>	<b>0.17</b>	<b>5.28</b>
P_NT_A2.2_02	5.6	40	Betão	3.06			
P_NT_A2.2_03	6.5	38	Betão	3.54			
P_NT_A2.2_04	5.9	40	Betão	3.22			
P_NT_A3.3_01			Descolado				
P_NT_A3.3_02			Ligação descolada				
P_NT_A3.3_03			Ligação descolada				
P_NT_A3.3_04			Descolado				
P_NT_A4.4_01	7.1	46	Betão	3.82	<b>3.37</b>	<b>0.37</b>	<b>10.86</b>
P_NT_A4.4_02	6.8	46	Betão	3.62			
P_NT_A4.4_03	5.7	45	Betão	3.04			
P_NT_A4.4_04	5.6	54	Betão	2.98			
P_NT_A5.5_01	4.6	42	Adesivo	2.48	<b>1.81</b>	<b>0.62</b>	<b>34.52</b>
P_NT_A5.5_02	1.8	34	Adesivo	0.98			
P_NT_A5.5_03	3.6	46	Adesivo	1.96			
P_NT_A5.5_04	5.7	43	Betão	3.04			

Numa primeira análise dos resultados obtidos nos ensaios, é verificada uma significativa influência do processo de tratamento da superfície do GFRP no comportamento de aderência dos provetes. As utilizações de tratamentos com lixa 24 e 80 demonstraram serem mais eficientes do que a não aplicação de tratamento de superfície, permitindo obter um valor médio de tensão máxima superior cerca de 18,7% do que o obtido nas placas sem tratamento de superfície. Portanto a aplicação de tratamento de superfície aumenta a resistência da ligação GFRP/SCSFRMC, proporcionada pela maior aderência que a superfície de GFRP apresentava.

A Tabela 3.22, a Tabela 3.23 e a Tabela 3.24 apresentam o diâmetro e a profundidade da zona de rotura, o número de fibras identificadas, quando a rotura ocorreu pelo SCSFRMC, em cada uma das superfícies de rotura dos provetes ensaiados (em que “cima” indica a parte que é retirada no ensaio e “baixo” indica a parte que fica na placa de GFRP), conforme apresentado na Figura 3.25 e especifica qual foi o modo de rotura correspondente a cada ensaio.

Tabela 3.22 – Resultados após ensaio de “pull-off” das placas de GFRP, com tratamento de lixa 24.

Provete		Diâmetro [mm]	Profundidade [mm]	Contagem		Modo de rotura
				das fibras		
				Cima	Baixo	
P_SP24_A1.1	P_SP24_A1.1_01	44.71	29.45	1	3	Betão
	P_SP24_A1.1_02	44.80	29.09	7	3	Betão
	P_SP24_A1.1_03	44.82	28.69	3	3	Betão
	P_SP24_A1.1_04	44.67	30.19	3	2	Betão
P_SP24_A2.2	P_SP24_A2.2_01	44.88	25.30	2	5	Betão
	P_SP24_A2.2_02	44.80	27.48	7	8	Betão
	P_SP24_A2.2_03	44.89	27.78	2	6	Betão
	P_SP24_A2.2_04	44.74	28.16	4	7	Betão
P_SP24_A3.3	P_SP24_A3.3_01	48.97	27.27			Descolado
	P_SP24_A3.3_02	48.97	22.78			Adesivo
	P_SP24_A3.3_03					Ligação descolada
	P_SP24_A3.3_04					Ligação descolada
P_SP24_A4.4	P_SP24_A4.4_01	44.80	28.85	5	6	Betão
	P_SP24_A4.4_02	44.75	28.65	9	5	Betão
	P_SP24_A4.4_03	44.71	25.46			Adesivo
	P_SP24_A4.4_04	44.78	27.71	2	9	Betão
P_SP24_A5.5	P_SP24_A5.5_01	49.01	24.49			Adesivo
	P_SP24_A5.5_02	48.69	24.41			Adesivo
	P_SP24_A5.5_03	49.02	25.56	2	6	Betão
	P_SP24_A5.5_04	49.06	25.13	4	5	Betão

Tabela 3.23 – Resultados após ensaio de “pull-off” das placas de GFRP, com tratamento de lixa 80.

Provete		Diâmetro [mm]	Profundidade [mm]	Contagem		Modo de rotura
				das fibras		
				Cima	Baixo	
P_SP80_A1.1	P_SP80_A1.1_01	49.05	25.63	2	9	Betão
	P_SP80_A1.1_02	48.77	25.06	0	0	Betão
	P_SP80_A1.1_03	48.92	25.51	3	13	Betão
	P_SP80_A1.1_04	48.86	27.09	2	9	Betão
P_SP80_A2.2	P_SP80_A2.2_01	48.34	25.52	4	6	Betão
	P_SP80_A2.2_02	48.05	25.25	1	3	Betão
	P_SP80_A2.2_03	48.11	26.68	5	1	Betão
	P_SP80_A2.2_04	48.34	26.78	9	5	Betão
P_SP80_A3.3	P_SP80_A3.3_01	44.74	27.07			Adesivo
	P_SP80_A3.3_02	44.70	27.88			Adesivo
	P_SP80_A3.3_03	44.72	26.03			Adesivo
	P_SP80_A3.3_04					Ligação descolada
P_SP80_A4.4	P_SP80_A4.4_01	44.68	29.50	2	2	Betão
	P_SP80_A4.4_02	44.84	29.05	2	3	Betão
	P_SP80_A4.4_03	44.60	28.19	4	11	Betão
	P_SP80_A4.4_04	44.63	26.96			Adesivo
P_SP80_A5.5	P_SP80_A5.5_01	44.75	28.31	4	3	Betão
	P_SP80_A5.5_02	44.66	22.72			Adesivo
	P_SP80_A5.5_03	44.40	25.17	2	5	Betão
	P_SP80_A5.5_04	44.72	29.64	2	10	Betão

Tabela 3.24 – Resultados após ensaio de “pull-off” das placas de GFRP, sem tratamento de superfície.

Provete		Diâmetro [mm]	Profundidade [mm]	Contagem		Modo de rotura
				das fibras		
				Cima	Baixo	
P_NT_A1.1	P_NT_A1.1_01	44.67	27.73	3	10	Betão
	P_NT_A1.1_02	44.72	28.31			Adesivo
	P_NT_A1.1_03	44.65	28.85			Adesivo
	P_NT_A1.1_04	44.73	28.99			Adesivo
P_NT_A2.2	P_NT_A2.2_01	48.28	25.80	0	2	Betão
	P_NT_A2.2_02	48.30	23.54	7	9	Betão
	P_NT_A2.2_03	48.38	23.77	6	4	Betão
	P_NT_A2.2_04	48.30	24.43	3	5	Betão
P_NT_A3.3	P_NT_A3.3_01	44.63	28.16			Descolado
	P_NT_A3.3_02					Ligação descolada
	P_NT_A3.3_03					Ligação descolada
	P_NT_A3.3_04	44.69	28.64			Descolado
P_NT_A4.4	P_NT_A4.4_01	48.62	24.81	3	5	Betão
	P_NT_A4.4_02	48.88	26.35	5	3	Betão
	P_NT_A4.4_03	48.86	25.24	9	11	Betão
	P_NT_A4.4_04	48.95	25.55	6	6	Betão
P_NT_A5.5	P_NT_A5.5_01	48.57	24.92			Adesivo
	P_NT_A5.5_02	48.40	23.86			Adesivo
	P_NT_A5.5_03	48.40	23.14			Adesivo
	P_NT_A5.5_04	48.88	25.00	6	7	Betão

### **Modos de rotura**

Existem essencialmente quatro modos diferentes de rotura para ensaios de “*pull-off*”. Podem ocorrer roturas no SCSFRMC, no adesivo epóxi de ligação GFRP/SCSFRMC, no GFRP e no epóxi utilizado para ligar o disco ao elemento de GFRP. Uma combinação dessas roturas também pode ocorrer. Estes diferentes modos de rotura fornecem informações valiosas sobre o comportamento do sistema. A magnitude e a localização da superfície de rotura fornecem algumas informações sobre o seu desempenho.

Quando a rotura só mobiliza a resistência do adesivo de ligação GFRP/SCSFRMC, o resultado obtido fornece uma verdadeira indicação da capacidade resistente de ligação. Nesse caso, a carga final é uma medida direta da aderência entre o GFRP e o SCSFRMC. Roturas noutros locais indicam que a força de ligação é maior do que a resistência à tração do GFRP e do SCSFRMC.

Quando ocorre uma rotura entre a disco e a superfície de GFRP existe uma rotura adesiva. Neste caso, se o resultado é menor do que a média dos outros resultados, este tipo de rotura deve ser descartada, caso contrário, pode ser tida em conta. Uma rotura do epóxi deve ser uma ocorrência rara. No presente trabalho, essa rotura de epóxi não ocorreu em nenhum dos ensaios.

Se a rotura ocorre no material de GFRP, este material é a parte mais fraca do sistema. Nesse caso, a resistência de ligação excede a tensão final aplicada, o que é referido como uma rotura coesiva do GFRP.

Finalmente, se a superfície de rotura ocorrer no SCSFRMC, o GFRP e a camada adesiva são mais “fortes” do que o SCSFRMC. Neste caso, a tensão de “*pull-off*” é a resistência à tração do SCSFRMC. Em alguns casos, a rotura ocorre parcialmente ao longo da superfície de ligação e parcialmente no SCSFRMC, o que corresponde a uma combinação de dois ou mais dos modos de roturas mencionados anteriormente.

O tipo de rotura observada neste trabalho ocorreu predominantemente no SCSFRMC.

Nos ensaios de “*pull-off*”, os modos de rotura observados foram considerados válidos de acordo com a norma de ensaio utilizada e são ilustrados na Figura 3.40.

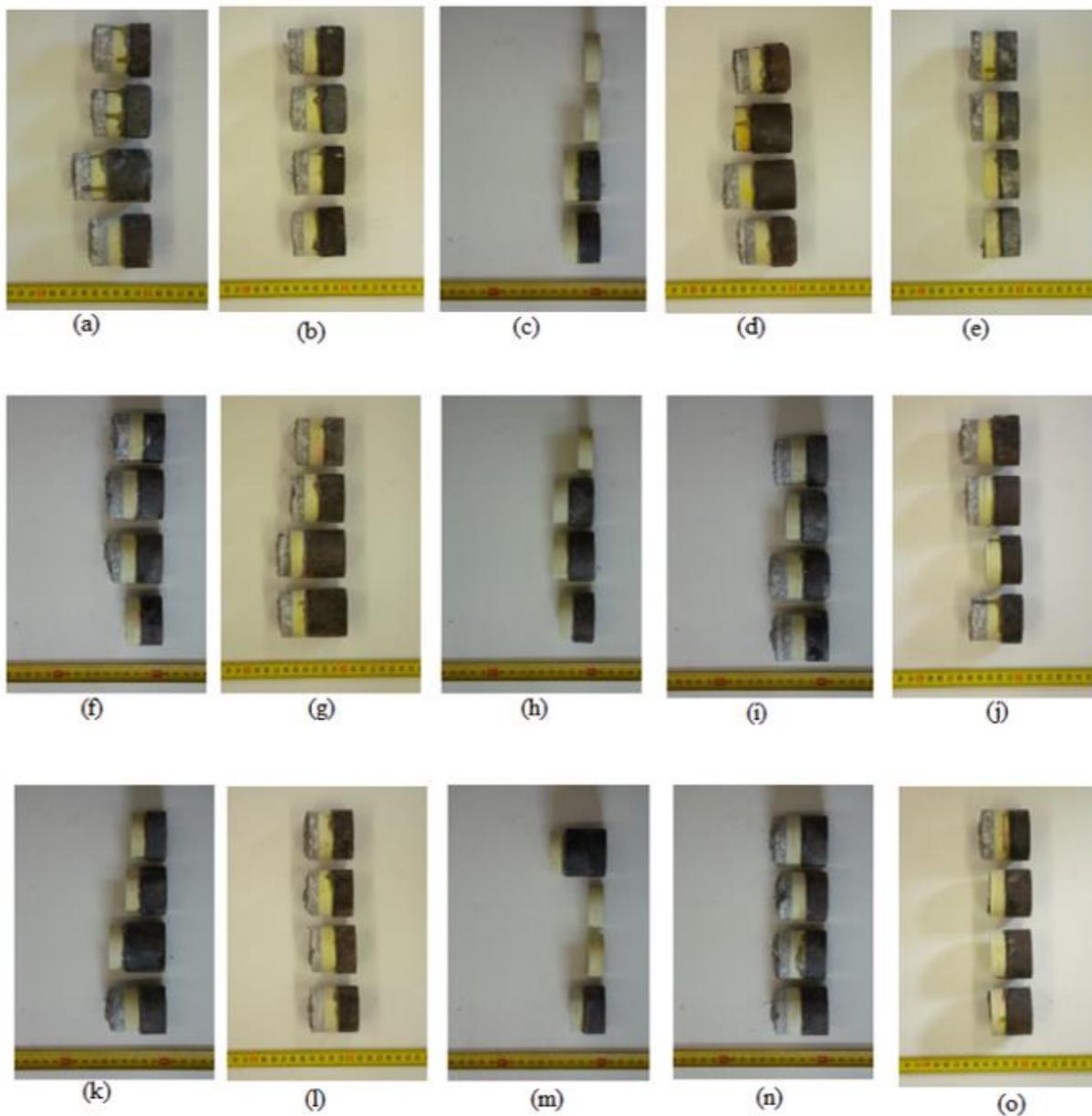


Figura 3.40 – Modos de rotura observados nos ensaios de tipo “*pull-off*”: (a) P\_SP24\_A1.1 ; (b) P\_SP24\_A2.2; (c) P\_SP24\_A3.3; (d) P\_SP24\_A4.4; (e) P\_SP24\_A5.5; (f) P\_SP80\_A1.1; (g) P\_SP80\_A2.2; (h) P\_SP80\_A3.3; (i) P\_SP80\_A4.4; (j) P\_SP80\_A5.5; (k) P\_NT\_A1.1; (l) P\_NT\_A2.2; (m) P\_NT\_A3.3; (n) P\_NT\_A4.4 e (o) P\_NT\_A5.5.

As características do mecanismo de rotura ocorrido explicam as razões pelas quais as propriedades do adesivo, a compatibilidade entre este e a superfície de GFRP e a preparação da superfície antes da sua aplicação, são aspetos muito importantes para aumentar a resistência à ligação de GFRP/SCSFRMC. Assim, analisando os mecanismos de rotura que ocorreram nos ensaios de “*pull-off*” realizados, podem ser retiradas conclusões quanto à influência da técnica

de tratamento da superfície utilizada, tendo em conta o adesivo epoxídico utilizado. De um ponto de vista qualitativo, a eficácia dos diferentes tratamentos de superfície e dos diferentes adesivos utilizados pode ser avaliada através da análise visual das superfícies de fratura.

Quando à superfície de GFRP foram aplicados os tratamentos de superfície, uma camada mais espessa de SCSFRMC surgiu colada ao GFRP após a rotura por destacamento do provete. Pelo contrário, quando se recorreu ao não tratamento da superfície de GFRP, uma porção mais fina de SCSFRMC surgiu colada ao GFRP, sendo que, em algumas zonas pontuais, se verificou a sua inexistência.

A análise realizada às superfícies de fratura, após os ensaios de “*pull-off*”, veio confirmar os resultados obtidos e já apresentados neste documento. De facto, quando foram utilizados tratamentos da superfície de GFRP, mediram-se incrementos significativos de força de arranque máxima ( $P_{max}$ ), relativamente aos provetes cuja superfície não sofreu tratamento. No primeiro caso, devido à maior rugosidade e/ou aderência proporcionada pelo diferente tipo de tratamento de superfície, os diferentes adesivos epoxídicos conseguiram penetrar melhor na camada de GFRP, enquanto que, no segundo caso, devido ao menor nível de rugosidade e/ou aderência apresentado, a descontinuidade na interface ficou mais pronunciada.

### 3.5 Análise comparativa

A Figura 3.41 apresenta os resultados dos ensaios de “*pull-off*” realizados em termos da relação entre tipo de tratamento da superfície e adesivo utilizado para ligação GFRP/SCSFRMC *versus* tensões de arrancamento. Na análise aos quatro ensaios efetuados em cada provete, é apresentada na Figura 3.41 entre parêntesis a comparação em percentagem da tensão máxima obtida entre a análise tendo em conta o modo de rotura mais observado no provete e a análise considerando todos os valores da tensão máxima, independentemente dos modos de rotura observados.

Na Tabela 3.25 constam os valores relativos às tensões de arrancamento, com correspondente coeficiente de variação. Este parâmetro foi calculado segundo a equação (3.1).

Analisando os resultados obtidos nos ensaios, sem aplicação de tratamento de superfície e utilizando o adesivo Eporip da Mapei verifica-se que este adesivo permitiu um aumento médio de 3% na tensão de arrancamento, em relação à utilização do adesivo Sikadur-32 EF da Sika.

Nos provetes onde foi utilizado o adesivo Sikadur-32 EF, com tratamento de lixa 24, obtiveram-se os valores de maior ordem de grandeza de tensão de arrancamento, sendo estes cerca de 4% superiores aos que foram obtidos com a utilização do Eporip.

Utilizando a lixa 80 como tratamento de superfície, e o adesivo SikaTop Armatec-110 EpoCem da Sika foi possível obter um aumento de 14% na tensão de arrancamento, por comparação com a utilização de Kerabuild Eco Epoprimer da Kerakoll.

A Tabela 3.25 mostra os resultados médios de tensão de arrancamento obtidos no ensaio de arrancamento para todas as séries e respetivo coeficiente de variação (COV). A partir da análise do COV constata-se que este é um ensaio de tração onde se encontra sempre uma dispersão significativa nos resultados. O autor acredita que os maiores valores do COV não resultam apenas da falta de precisão no método de ensaio, mas advêm também, da intrínseca heterogeneidade de materiais granulares como o SCSFRMC. A dificuldade em garantir procedimentos de ensaio sempre iguais também contribui para a dispersão nos resultados.

O tipo de rotura observado neste trabalho ocorreu predominantemente no SCSFRMC, conforme foi citado a cima, no entanto, a grande dispersão nos resultados das tensões de arrancamento deve-se predominantemente à heterogeneidade no SCSFRMC, incluindo a aglomeração e a não orientação favorável das fibras de aço.

O fator mais limitador na escolha do adesivo é o tempo de cura, principalmente para aplicações em campo. Geralmente, a preferência é por uma cura rápida que, normalmente está associada a menores forças adesivas nos produtos comerciais, (Siva *et al.*, 2015).

Em fase de aplicação dos adesivos constatou-se que o adesivo SikaTop Armatec – 110 EpoCem se mostrou muito espesso, de aplicação difícil e morosa. Foi necessária a utilização de espátula para aplicação e, também uma boa mistura mecânica. Apresentou uma consistência muito granular. Não sendo então possível controlar bem a espessura do adesivo; o Sikadur – 32EF é muito fluído e de fácil aplicação. Rapidamente foi possível com uma trincha aplicar a resina na superfície. Apresentou alguma dificuldade em cobrir com a trincha a superfície, dependendo muito da rugosidade da mesma. O Eporip apresenta todas as características do Sikadur – 32EF, com a exceção de que se consegue cobrir a superfície com mais facilidade porque apresenta maior fluidez; o Kerabuild Eco poprimer está muito próximo do Sikadur – 32EF, apresentando, no entanto, uma fluidez ligeiramente maior.

Relativamente aos ensaios de arrancamento, uma análise preliminar permitiu concluir que os melhores adesivos para garantir a ligação entre SCSFRMC e GFRP são: (i) o Sikadur-32 EF e (ii) o Eporip.

Quanto ao tratamento da superfície de GFRP, refere-se que são tratamentos de fácil aplicação, mas, no entanto, requerem experiência do operador na obtenção de um acabamento uniforme na superfície. Em relação aos diferentes tipos de tratamento da superfície, verificou-se que tanto

com tratamento ou sem tratamento, ambos os adesivos indicados anteriormente garantiram uma boa ligação entre os diferentes materiais. Contudo, no âmbito do presente projeto, será realizado o tratamento de superfície com lixa de rugosidade de 80 para melhorar o processo de impregnação do adesivo à camada de GFRP do painel sanduíche híbrido.

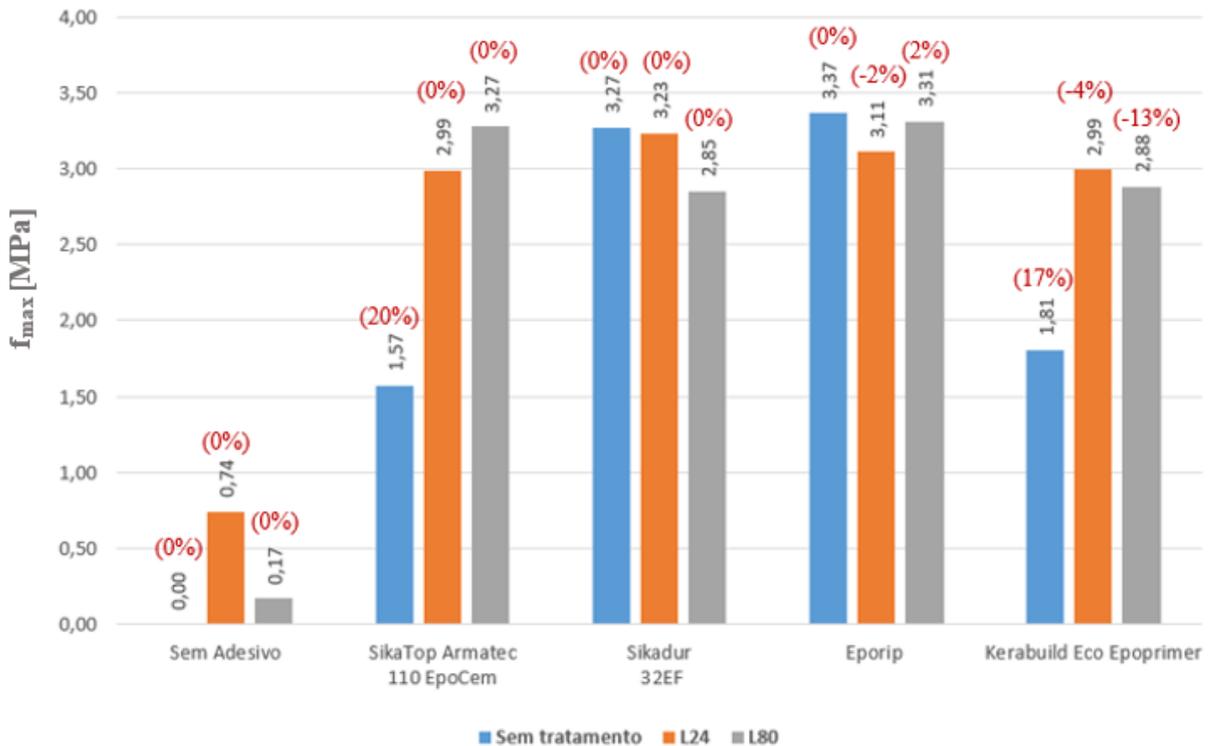


Figura 3.41 – Relação entre o tipo de tratamento de superfície de GFRP, adesivo de ligação e a tensão de arrancamento dos provetes ensaiados.

Tabela 3.25 – Tensões de arrancamento obtidas dos ensaios.

Treatment surface	Sem adesivo	SikaTop Armatec-110 EpoCem	Sikadur-32 EF	Eporip	Kerabuild Eco Epoprimer
NT	0.00 (0%)	1.57 (26.65%)	3.27 (5.28%)	3.37 (10.86%)	1.81 (34.52%)
SP24	0.74 (0%)	2.99 (11.05%)	3.23 (4.63%)	3.11 (4.97%)	2.99 (8.04%)
SP80	0.17 (46.80%)	3.27 (11.60%)	2.85 (7.02%)	3.31 (6.97%)	2.88 (10.78%)

NOTA: Todos os valores para as tensões de arrancamento encontram-se em [MPa], com o correspondente coeficiente de variação (CoV %).

### 3.6 Conclusões

O presente capítulo tem por base um programa experimental baseado em ensaios de tipo “*pull-off*” realizado de modo a ser possível caracterizar a aderência da ligação entre o GFRP e o SCSFRMC, quando são utilizados diferentes tratamentos de superfície para o GFRP e distintos adesivos de ligação. Um dos objetivos foi investigar o efeito da rugosidade da superfície de GFRP na resistência da ligação e, para isso, diferentes metodologias de tratamento foram utilizadas: tratamento com lixa 24, lixa 80 e sem tratamento de superfície. De modo a avaliar a eficiência das três metodologias de tratamento, foi medido o nível de rugosidade de todas as superfícies previamente à aplicação dos diferentes adesivos selecionados, através de um sensor laser. Complementarmente, foi efetuada a caracterização mecânica do SCSFRMC a utilizar nos painéis sanduíche híbridos do presente projeto. A partir dos resultados obtidos dos ensaios de “*pull-off*” realizados, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- O perfil de rugosidade do GFRP e sua limpeza contribuem para o aumento da tensão de arrancamento entre o GFRP e o SCSFRMC;
- Das diferentes metodologias de preparação da superfície, resultaram diferentes valores de resistência da ligação, devido aos diferentes níveis e rugosidade que proporcionam;
- A força adesiva do adesivo influencia a tensão de arrancamento.
- Lixar o GFRP antes de colar os discos mostrou-se eficiente, diminuindo roturas entre o GFRP e o disco. É necessário cuidado para não provocar uma perda significativa de espessura do GFRP.

Devido à importância do ensaio de tipo “*pull-off*” na prática industrial e laboratorial, seria oportuna a abordagem dos procedimentos adotados nesta dissertação nas normas técnicas. Deixa-se aqui a sugestão para que órgãos normativos incluam estes itens nas suas próximas revisões.

# COMPORTAMENTO MECÂNICO DE LÂMINAS DE GFRP – Investigação experimental

### 4.1 Introdução

O painel sanduíche abordado neste estudo é composto por lâminas/faces e nervuras em GFRP, um núcleo em PIR/PUR e uma camada superior de SCSFRMC, que funciona predominantemente à compressão.

A Figura 4.1 representa o painel sanduíche em estudo no âmbito do projeto “EasyFloor”, no qual esta dissertação de mestrado se insere.

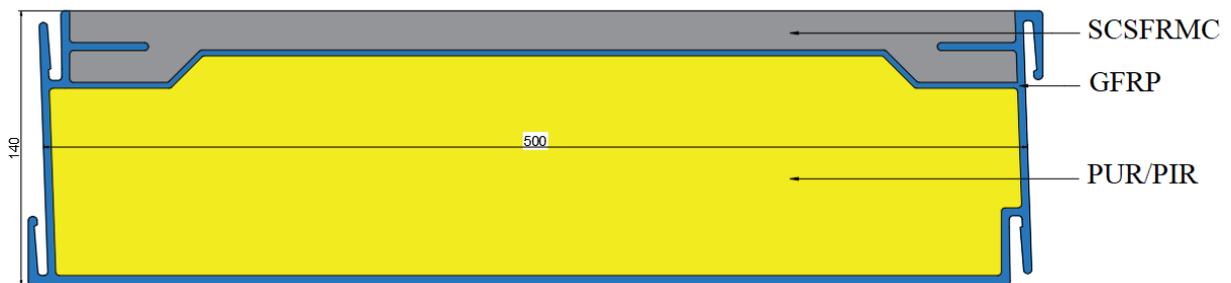


Figura 4.1 – Identificação dos componentes da secção transversal do painel sanduíche híbrido proposto.  
Nota: dimensões em [mm].

Para clarificar o comportamento deste elemento estrutural, é importante caracterizar mecanicamente várias tipologias de laminados de GFRP, de modo a avaliar o seu comportamento e aplicabilidade. Esta caracterização irá influenciar a escolha da configuração final das lâminas/faces e nervuras em GFRP do painel sanduíche proposto.

As propriedades mecânicas dos laminados de GFRP dependem da arquitetura das fibras, do tipo de matriz polimérica utilizada e do processo de produção. É necessário ter em conta o funcionamento estrutural do GFRP, quando aplicado no painel sanduíche: a nervura é solicitada à flexão e ao corte, e as lâminas/faces têm como principal função resistir à flexão. Assim sendo, é essencial caracterizar este tipo de laminado em flexão e em tração direta.

Através da realização de ensaios de flexão em provetes de GFRP, produzidos propositadamente para este trabalho, será possível determinar a resistência em flexão, a extensão de rotura e o módulo de elasticidade em flexão, relativos ao comportamento de tensão *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 roturas por instabilidade, 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 fabricados intencionalmente para este projeto, será possível determinar a resistência à tração, o módulo de elasticidade em tração e a extensão na rotura do compósito extrudido. Admite-se que este comportamento experimental é representativo do comportamento do mesmo material, quando pertencente ao painel sanduíche. Este ensaio tem uma especial importância na avaliação do comportamento das lâminas em GFRP quando os painéis sanduíche se encontram submetidos a flexão, uma vez que as lâminas superiores se encontram tracionadas para momento fletor negativo (zona dos apoios) e as lâminas inferiores se encontram tracionadas para momento positivo (zona de meio vão).

De modo a caracterizar o comportamento mecânico de lâminas de GFRP selecionadas, foi realizado um programa experimental composto por 3 diferentes laminados de GFRP. O programa de ensaios foi constituído por 24 ensaios de flexão, recorrendo a 8 provetes de cada tipo de laminados de GFRP, sendo ensaiados 4 provetes orientados na direção longitudinal ao reforço principal e 4 provetes orientados na direção transversal ao reforço principal. Posteriormente foram realizados ensaios de tração direta em 18 provetes de GFRP recorrendo a 6 provetes de cada tipo de laminados de GFRP, sendo ensaiados 3 provetes orientados na direção longitudinal ao reforço principal e 3 provetes orientados na direção transversal ao reforço principal. Para ambos os ensaios a geometria dos provetes, a configuração de ensaio bem como toda a sua instrumentação, serão detalhadamente apresentados nos diferentes subcapítulos do presente capítulo da dissertação.

A campanha experimental foi desenvolvida no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST-UM). Neste programa experimental foram ensaiados provetes produzidos e fornecidos pela empresa ALTO Perfis Pultrudidos, Lda.

## 4.2 Investigação experimental

### 4.2.1 Materiais intervenientes

Os ensaios de flexão e tração direta foram realizados em provetes de GFRP fabricados propositadamente para este projeto, conforme referido anteriormente. Os laminados são de GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*), incorporam diferentes camadas na sua constituição: 2 camadas exteriores de *unifilo*, 2 camadas de *roving* e uma camada central de *combimat*.

A Figura 4.2 detalha a constituição dos laminados em GFRP utilizados no presente trabalho.

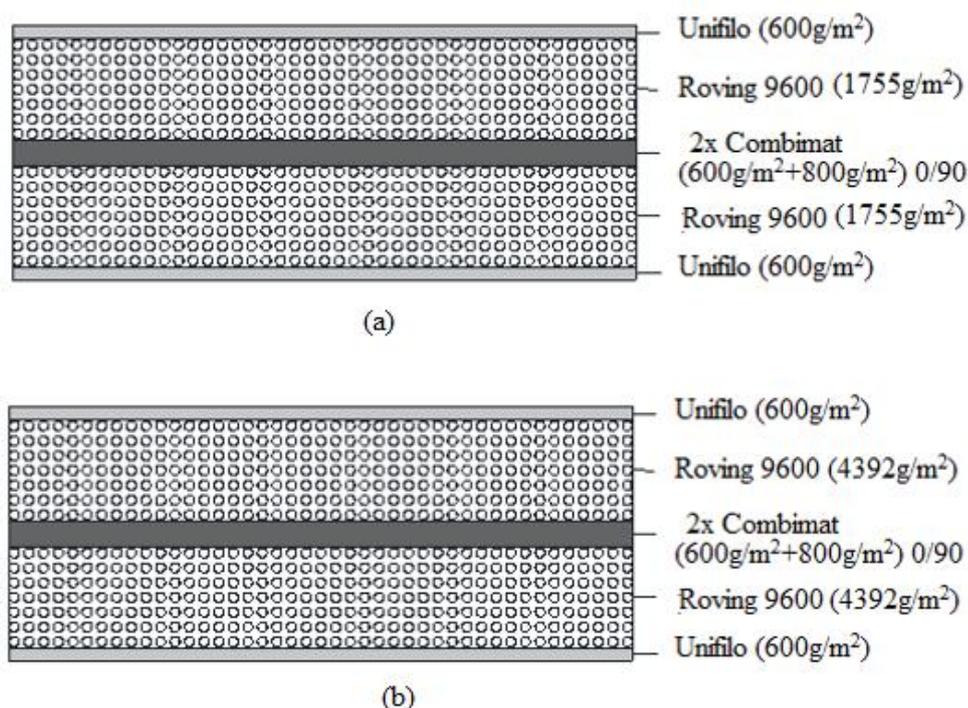


Figura 4.2 – Configuração e constituição dos provetes dos laminados em GFRP: (a) provetes V1 e (b) provetes V2 e V3.

Após a fabricação, nos laminados de GFRP foram analisadas duas direções (Figura 4.4). A primeira direção estudada foi a direção longitudinal, que corresponde à direção de pultrusão e direção principal das fibras. Esta é a direção segundo a qual as faces dos painéis sanduíche são mais solicitadas.

A segunda direção estudada foi a direção transversal, que se desenvolve perpendicularmente à direção de pultrusão. Os painéis sanduíche serão utilizados como lajes que funcionam numa direção principal, e sofrem também esforços na direção perpendicular (direção transversal).

Assim sendo, foram ensaiados três tipos de laminado de GFRP, tanto na direção longitudinal (direção de pultrusão) como na direção transversal (perpendicular à direção de pultrusão). Os provetes testados apresentam espessuras de 4 mm (V1: 250×25×4 mm<sup>3</sup>) e de 5 mm (V2: 250×25×5 mm<sup>3</sup> e V3: 250×25×5 mm<sup>3</sup>). O provete tipo V3 incorpora trióxido de alumínio na sua constituição, e destina-se a ser aplicado em faces superiores/inferiores com resina de poliéster. A inclusão deste produto no laminado de GFRP permite que este adquira propriedades que melhoram a sua resistência ao fogo, no entanto deve-se ter em conta que este material torna a pultrusão mais viscosa, logo as fibras ficam mais frágeis durante o processo de pultrusão devido à dificuldade de impregnação da resina nas fibras. A inclusão deste produto é designada pelo fabricante como ATH.

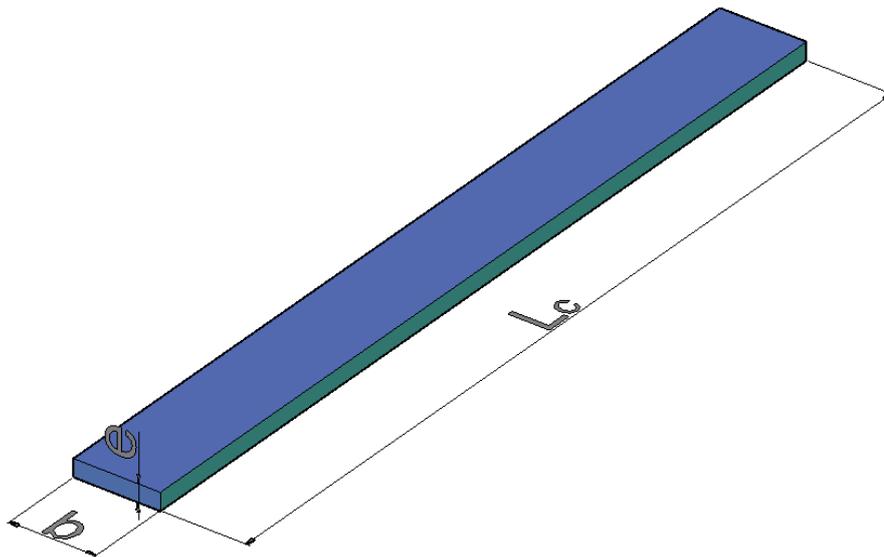


Figura 4.3 – Representação esquemática dos laminados de GFRP ensaiados à flexão e tração direta.

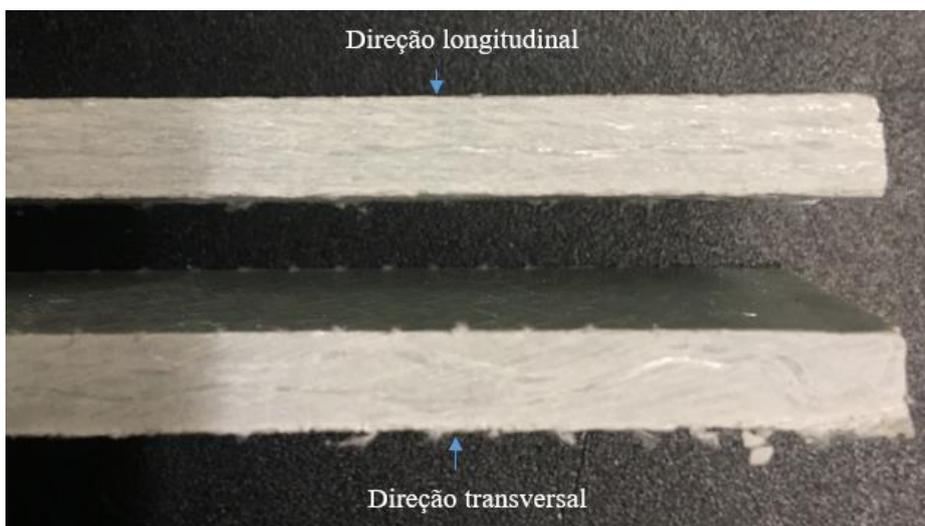


Figura 4.4 – Fotografia dos laminados de GFRP ensaiados à flexão e tração direta.

## 4.2.2 Programa de ensaios

### 4.2.2.1 Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão 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). A Figura 4.5 apresenta o sistema de ensaio adotado, sendo seguido o “*Procedure A*”, que consiste na aplicação de uma carga a meio vão de provetes simplesmente apoiados, até que ocorra a rotura por tração em flexão das fibras mais tracionadas.

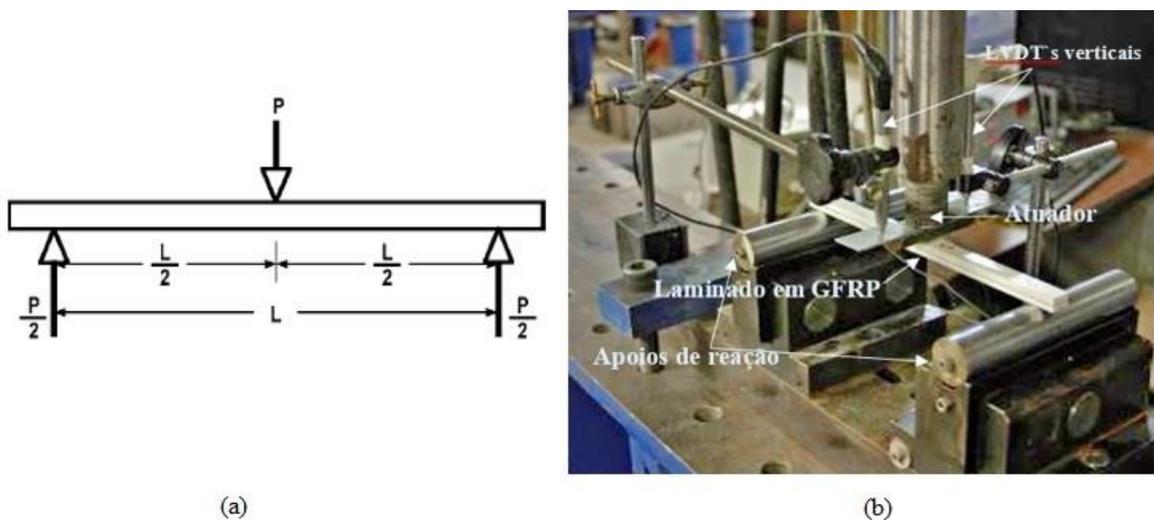


Figura 4.5 – Sistema de ensaio adotado em ensaios de flexão com laminados em GFRP: (a) “*Procedure A*” (ASTM D7264/D7264M – 07); (b) configuração utilizada no ensaio.

A presente norma refere que o vão deve ser o adequado para que a rotura do provete se inicie pela fibra extrema (a mais tracionada), devido apenas a momento fletor. Pretendendo-se caracterizar o comportamento em flexão, importa garantir um vão cuja relação com a altura da secção assegure a minimização do efeito da deformabilidade por corte e a não ocorrência de rotura por corte interlaminar. Nesse sentido utilizou-se um vão de 220 mm em todos os ensaios. A norma indica que devem ser ensaiados pelo menos cinco provetes por condição de ensaio, no entanto devido a limitações relacionadas com o material disponível não foi possível ensaiar o número de laminados indicado pela norma, sendo ensaiados quatro provetes de cada tipo de constituição de GFRP. Em relação aos modos de rotura a norma refere, para que o ensaio seja válido é necessário que a rotura aconteça na superfície externa sem que haja uma rotura interlaminar ou 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. Recorreu-se a um equipamento universal de ensaios hidráulico, modelo CIL-DE-150KN-63-36-200 (versão 443) com 150 kN de capacidade de carga (precisão  $\pm 0.05$  F.S.), existente no LEST\_UM. O registo de dados foi efetuado num computador através de uma unidade de aquisição de dados da marca RDP GROUP e modelo modular 600.

A designação adotada para os laminados em GFRP utilizados, foi VN\_GFRP\_O\_XX em que VN refere o tipo de laminado de GFRP ensaiado, sendo V1: 250×25×4 mm<sup>3</sup>, V2: 250×25×5 mm<sup>3</sup> e V3: 250×25×5 mm<sup>3</sup>; GFRP o tipo de material ensaiado; O a orientação dos provetes, sendo L: direção longitudinal e T: direção transversal e XX o número da ordem do provete.

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 mm e 0.01 g, respetivamente.

A Tabela 4.1 e a Tabela 4.2 apresentam a informação relativa aos provetes dos laminados em GFRP, utilizados nos ensaios de flexão, na direção longitudinal e transversal, respetivamente.

Tabela 4.1 – Características geométricas dos provetes de ensaios de flexão dos laminados em GFRP, na direção longitudinal (*b* – largura; *e* – espessura; *L<sub>c</sub>* – comprimento).

<b>Provete</b>	<b>b</b> [mm]	<b>e</b> [mm]	<b>L<sub>c</sub></b> [mm]	<b>Densidade</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
V1_GFRP_L_01	23.08	4.79	253.00	1924.73
V1_GFRP_L_02	23.43	4.75	255.00	1942.95
V1_GFRP_L_03	23.46	4.60	254.00	1950.74
V1_GFRP_L_04	26.19	4.51	252.00	1901.81
<b>Média</b>	24.04	4.66	253.50	1930.06
<b>Desvio Padrão</b>	1.25	0.11	1.12	18.84
<b>Cov [%]</b>	5.20%	2.43%	0.44%	0.98%
V2_GFRP_L_01	24.32	5.32	250.00	2020.68
V2_GFRP_L_02	24.82	5.24	250.00	2019.37
V2_GFRP_L_03	24.89	5.33	250.00	2049.42
V2_GFRP_L_04	25.08	5.30	250.00	1987.31
<b>Média</b>	24.78	5.30	250.00	2019.19
<b>Desvio Padrão</b>	0.28	0.03	0.00	21.98
<b>Cov [%]</b>	1.13%	0.63%	0.00%	1.09%

V3_GFRP_L_01	24.14	5.59	248.00	1963.85
V3_GFRP_L_02	24.56	5.55	249.00	1976.12
V3_GFRP_L_03	24.18	5.53	249.00	1986.45
V3_GFRP_L_04	23.88	5.56	248.00	1959.10
<b>Média</b>	24.19	5.56	248.50	1971.38
<b>Desvio Padrão</b>	0.24	0.02	0.50	10.69
<b>Cov [%]</b>	1.01%	0.39%	0.20%	0.54%

Tabela 4.2 – Características geométricas dos provetes de ensaios de flexão dos laminados em GFRP, na direção transversal ( $b$  – largura;  $e$  – espessura;  $L_c$  – comprimento).

<b>Proвете</b>	<b>b</b> [mm]	<b>e</b> [mm]	<b>L<sub>c</sub></b> [mm]	<b>Densidade</b> [Kg/m <sup>3</sup> ]
V1_GFRP_T_01	26.85	4.51	298.00	1996.38
V1_GFRP_T_02	26.53	4.52	298.00	2001.20
V1_GFRP_T_03	26.43	4.52	298.00	1991.32
V1_GFRP_T_04	27.17	4.55	298.00	1973.11
<b>Média</b>	26.74	4.52	298.00	1990.50
<b>Desvio Padrão</b>	0.29	0.02	0.00	10.63
<b>Cov [%]</b>	1.09%	0.35%	0.00%	0.53%
V2_GFRP_T_01	25.65	5.19	297.00	2042.92
V2_GFRP_T_02	25.39	5.31	297.00	2037.37
V2_GFRP_T_03	25.06	5.17	297.00	2075.16
V2_GFRP_T_04	24.70	5.23	297.00	2061.41
<b>Média</b>	25.20	5.22	297.00	2054.22
<b>Desvio Padrão</b>	0.35	0.05	0.00	15.01
<b>Cov [%]</b>	1.40%	1.05%	0.00%	0.73%
V3_GFRP_T_01	25.31	5.59	298.00	1910.93
V3_GFRP_T_02	25.31	5.55	298.00	1942.70
V3_GFRP_T_03	26.09	5.44	298.00	1983.23
V3_GFRP_T_04	26.47	5.52	298.00	1953.79
<b>Média</b>	25.79	5.52	298.00	1947.66
<b>Desvio Padrão</b>	0.50	0.06	0.00	25.87
<b>Cov [%]</b>	1.95%	1.01%	0.00%	1.33%

As dimensões dos provetes na direção transversal são: V1: 300×25×4 mm<sup>3</sup>, V2: 300×25×5 mm<sup>3</sup> e V3: 300×25×5 mm<sup>3</sup>.

A Figura 4.6 apresenta a configuração e instrumentação de ensaios utilizada. A força foi registada através de uma célula de carga associada ao atuador e os deslocamentos a meio vão foram medidos com recurso a 2 LVDT's (*linear variable differential transducer*, na literatura

inglesa) dispostos a meio vão, com uma amplitude de  $\pm 10$  mm (com um coeficiente de linearidade de  $\pm 0.24\%$  F.S).

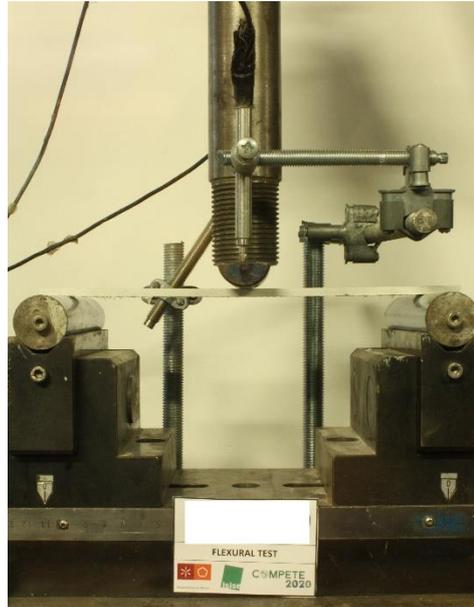


Figura 4.6 – Configuração do ensaio de flexão (3 pontos) em provetes de GFRP.

Segundo a norma ASTM D7264/D7264M – 07, a tensão de flexão  $\sigma_{fmax,x}$ , a extensão  $\epsilon_{fmax,x}$  e o módulo de elasticidade  $E_{f,x}^{chord}$  podem ser respetivamente calculados através das equações (4.1), (4.2) e (4.3),

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

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

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

em que,  $b$  [mm],  $h$  [mm] e  $L$  [mm] são a largura, espessura e vão de ensaio, respetivamente.  $P_{max}$  [N] representa a força máxima aplicada e  $\delta_u$  [mm] diz respeito ao deslocamento correspondente a  $P_{max}$ .  $\Delta\sigma/\Delta\epsilon$  diz respeito ao declive relativo ao ramo linear da curva tensão *versus* extensão.

#### 4.2.2.2 Ensaio de Tração Direta

Os ensaios de tração direta foram realizados de acordo com as recomendações da norma ASTM D 3039/D 3039M-00 (ASTM, 2000b) e ISO 527-5:1997 (ISO, 1997). Foram ensaiados três tipos de laminados de GFRP, cortados na direção longitudinal (direção de pultrusão) e na direção transversal (perpendicular à direção de pultrusão). As dimensões dos provetes tipo V1 são  $250 \times 25 \times 4 \text{ mm}^3$  e as dimensões dos provetes V2 e V3 são  $250 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ . Os provetes do tipo V3 incorporam ATH na sua constituição. As dimensões foram definidas, sempre que possível, de acordo a norma referida. Nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4 encontram-se resumidas as informações relativas aos provetes de GFRP ensaiados. Nestas tabelas,  $b$  é a largura;  $e$  é a espessura e  $L_c$  é o comprimento.

A designação adotada para os laminados em GFRP utilizados, foi VN\_GFRP\_O\_XX em que VN refere o tipo de laminado de GFRP ensaiado; GFRP é o tipo de material a ensaiar; O a orientação dos provetes, sendo L: direção longitudinal e T: direção transversal e XX o número de ordem do provete.

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 precisão de 0.01 mm e 0.01 g, respetivamente.

Tabela 4.3 – Características geométricas dos provetes destinados a ensaios de tração direta, na direção longitudinal.

<b>Provete</b>	<b>b</b> [mm]	<b>e</b> [mm]	<b>L<sub>c</sub></b> [mm]	<b>Densidade</b> [Kg/m <sup>3</sup> ]
V1_GFRP_L_01	23.85	4.61	253.00	1961.41
V1_GFRP_L_02	23.25	4.69	253.00	1901.39
V1_GFRP_L_03	23.35	4.66	254.00	1942.70
<b>Média</b>	23.49	4.66	253.33	1935.17
<b>Desvio Padrão</b>	0.26	0.03	0.47	25.07
<b>Cov [%]</b>	1.11%	0.70%	0.19%	1.30%
V2_GFRP_L_01	25.16	5.26	250.00	2014.72
V2_GFRP_L_02	24.18	5.27	250.00	2050.06
V2_GFRP_L_03	25.45	5.22	251.00	2058.69
<b>Média</b>	24.93	5.25	250.33	2041.15
<b>Desvio Padrão</b>	0.55	0.02	0.47	19.02
<b>Cov [%]</b>	2.19%	0.39%	0.19%	0.93%
V3_GFRP_L_01	24.68	5.44	249.00	1912.34
V3_GFRP_L_02	25.67	5.42	249.00	1958.52
V3_GFRP_L_03	26.75	5.48	250.00	1951.02
<b>Média</b>	25.70	5.44	249.33	1940.63
<b>Desvio Padrão</b>	0.84	0.03	0.47	20.24
<b>Cov [%]</b>	3.28%	0.49%	0.19%	1.04%

Tabela 4.4 – Características geométricas dos provetes destinados a ensaios de tração direta, na direção transversal.

<b>Provete</b>	<b>b</b> [mm]	<b>e</b> [mm]	<b>L<sub>c</sub></b> [mm]	<b>Densidade</b> [Kg/m <sup>3</sup> ]
V1_GFRP_T_01	25.81	4.70	250.00	1872.69
V1_GFRP_T_02	25.64	4.70	249.00	1899.34
V1_GFRP_T_03	25.48	4.68	250.00	1901.70
<b>Média</b>	25.65	4.69	249.67	1891.24
<b>Desvio Padrão</b>	0.13	0.01	0.47	13.15
<b>Cov [%]</b>	0.53%	0.20%	0.19%	0.70%
V2_GFRP_T_01	24.67	5.35	249.00	2011.04
V2_GFRP_T_02	23.70	5.32	250.00	1992.32
V2_GFRP_T_03	23.53	5.36	248.00	1988.62
<b>Média</b>	23.97	5.34	249.00	1997.33
<b>Desvio Padrão</b>	0.50	0.02	0.82	9.81
<b>Cov [%]</b>	2.10%	0.32%	0.33%	0.49%
V3_GFRP_T_01	24.57	5.56	249.00	1953.48
V3_GFRP_T_02	24.00	5.59	250.00	1910.89
V3_GFRP_T_03	22.83	5.52	247.00	1947.73
<b>Média</b>	23.80	5.55	248.67	1937.37
<b>Desvio Padrão</b>	0.72	0.03	1.25	18.87
<b>Cov [%]</b>	3.03%	0.54%	0.50%	0.97%

O ensaio de tração consistiu em submeter o laminado de GFRP a uma força de tração uniaxial no sentido longitudinal da amostra, até se atingir a sua rotura. Os ensaios de tração direta foram realizados com 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, com 200 kN de capacidade de carga, existente no LEST-UM. O registo de dados foi efetuado num computador através de uma unidade de aquisição de dados da marca RDP GROUP.

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 lâminas de alumínio com dimensões de  $50 \times 25 \times 2 \text{ mm}^3$  em ambas as extremidades dos provetes, conforme apresentado na Figura 4.7.

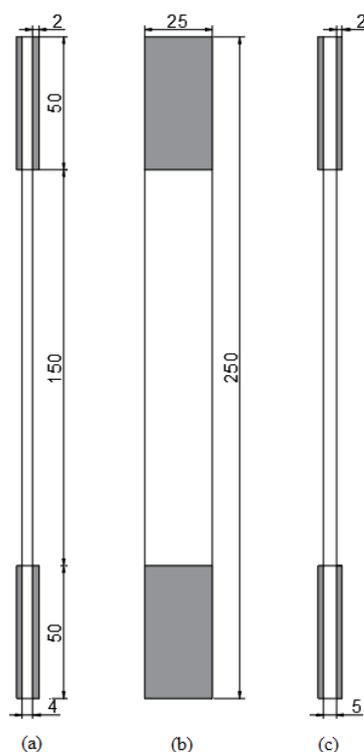


Figura 4.7 – Configuração dos provetes para ensaio de tração direta: (a) provetes V1; (b) vista lateral de todos os provetes ensaiados e (c) provetes V2 e V3. Nota: dimensões em [mm].

Posteriormente efetuou-se o seguinte procedimento (Figura 4.8):

- (i) Limpou-se os provetes com acetona e marcou-se as delimitações para a colocação das placas de alumínio, seguidamente denominadas de “*tabs*”, garantindo-se a distância livre entre amarras de 150 mm (Figura 4.8a);

- (ii) 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 de forma a evitar a rotura nas zonas de amarração dos provetes (Figura 4.8b, c);
- (iii) Colaram-se os “tabs” (Figura 4.8d, e, f).

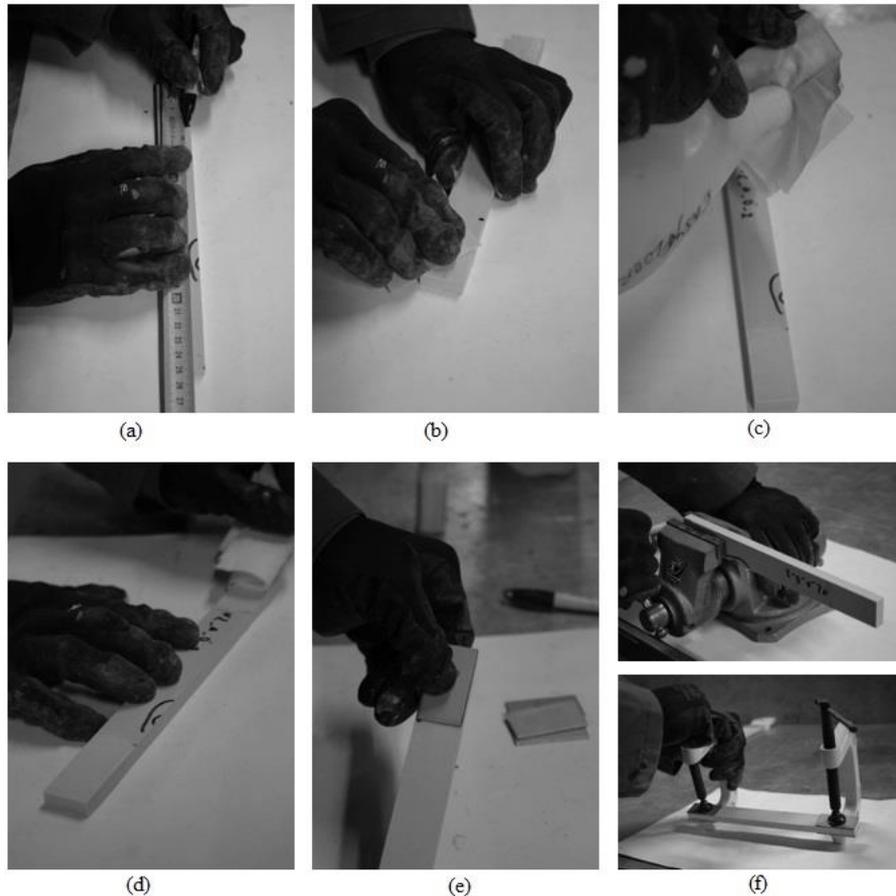


Figura 4.8 – Procedimentos realizados para a preparação dos provetes para os ensaios de tração direta.

A Figura 4.9 apresenta o sistema de ensaio adotado para os ensaios de tração direta, assim como a instrumentação e equipamento de ensaio utilizado.

Para medir a deformação da zona central do provete acoplou-se um LVDT (*linear variable differential transducer*, na literatura inglesa) conforme apresentado na Figura 4.9 (a). De acordo com a norma ASTM D 3039/D 3039M-00 (ASTM, 2000b), o sistema de ensaio deve estar alinhado para evitar esforços de flexão no provete de ensaio.

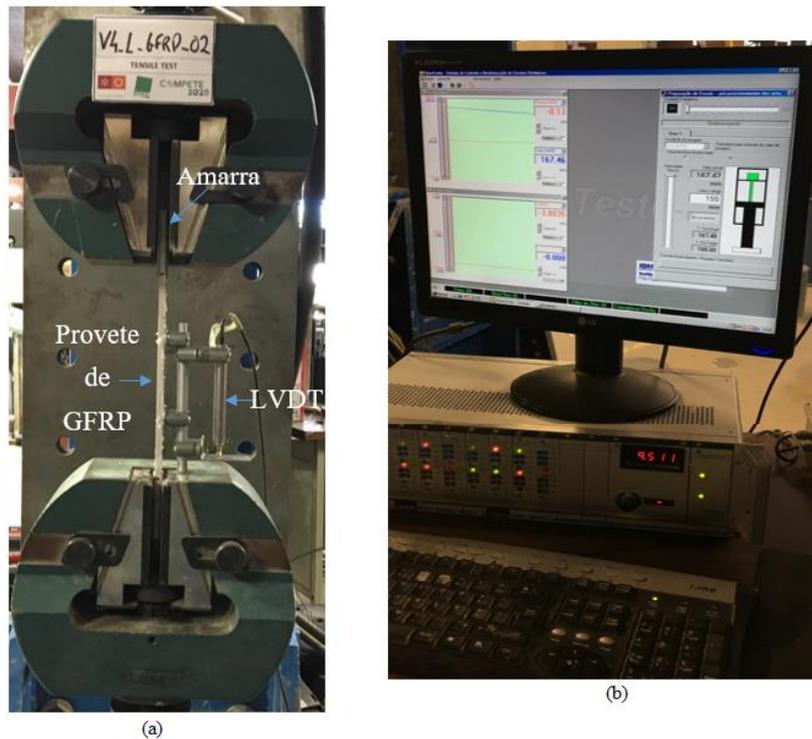


Figura 4.9 – Configuração do ensaio de tração: (a) equipamento universal de ensaios hidráulico com sistema de amarras e provete no início do ensaio. (b) Registo de dados durante o ensaio.

Segundo a norma ASTM D 3039/D 3039M-00 (ASTM, 2000b), a tensão de tração [MPa] e o módulo de elasticidade [GPa] são calculados a partir das equações (4.4) e (4.5), respetivamente,

$$\sigma_{fmax,x} = \frac{P_{max}}{A_{secc\tilde{a}o}} \quad (4.4)$$

em que  $P_{max}$  [N] representa a força máxima e  $A_{secc\tilde{a}o}$  [mm<sup>2</sup>] diz respeito à área da secção transversal do provete.

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

O quociente  $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$  diz respeito ao declive relativo ao ramo linear da curva tensão *versus* extensão. Para o efeito utilizaram-se os pontos sugeridos pela norma, correspondentes a 0.1% e 0.3%. A extensão foi obtida a partir do LVDT utilizado, calculando a razão  $\Delta L/L$  em que  $\Delta L$  é a variação de comprimento do provete em relação ao comprimento de referência [mm] e  $L$  é o comprimento de referência do provete.

## 4.3 Resultados e análise

### 4.3.1 Ensaio de Flexão

Neste subcapítulo são apresentados os resultados dos ensaios de flexão dos laminados de GFRP em estudo assim como as principais ilações retiradas.

De acordo com a norma ASTM D7264/D7264M – 07 todos os resultados dos ensaios em provetes de laminados em GFRP foram considerados como válidos, já que a rotura se deu por tração em flexão nas fibras inferiores extremas.

A Figura 4.10 e Figura 4.12 apresentam as curvas força *versus* deslocamento para os provetes ensaiados à flexão, na direção longitudinal e transversal, respetivamente.

#### **Provetes orientados na direção longitudinal ao reforço principal**

A Figura 4.10 (a) apresenta os provetes dos laminados em GFRP de 4mm de espessura (V1). As curvas que relacionam força aplicada e deformação medida a meio vão são similares entre provetes do mesmo tipo, à exceção do provete 4 que, apesar de evidenciar o mesmo tipo de comportamento, apresenta uma capacidade de carga significativamente inferior à dos restantes provetes.

A Figura 4.10 b) e c) mostra as curvas relativas aos provetes V2 e V3. Estas são semelhantes entre si. Em ambos os casos, os provetes evidenciaram um comportamento linear elástico até à rotura, sendo esta uma característica típica deste tipo de material. Além disso, a resposta após pico comprova a rotura progressiva observada em laboratório. Esse fenómeno deve-se essencialmente ao facto de as fibras que ainda não romperam continuarem em regime elástico. Nestes laminados em GFRP, as diferenças ao nível da constituição dos provetes de GFRP (V3 apenas difere em relação a V2, no sentido em que incorpora ATH na sua constituição) 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 de resultados é reduzida (ver Figura 4.11).

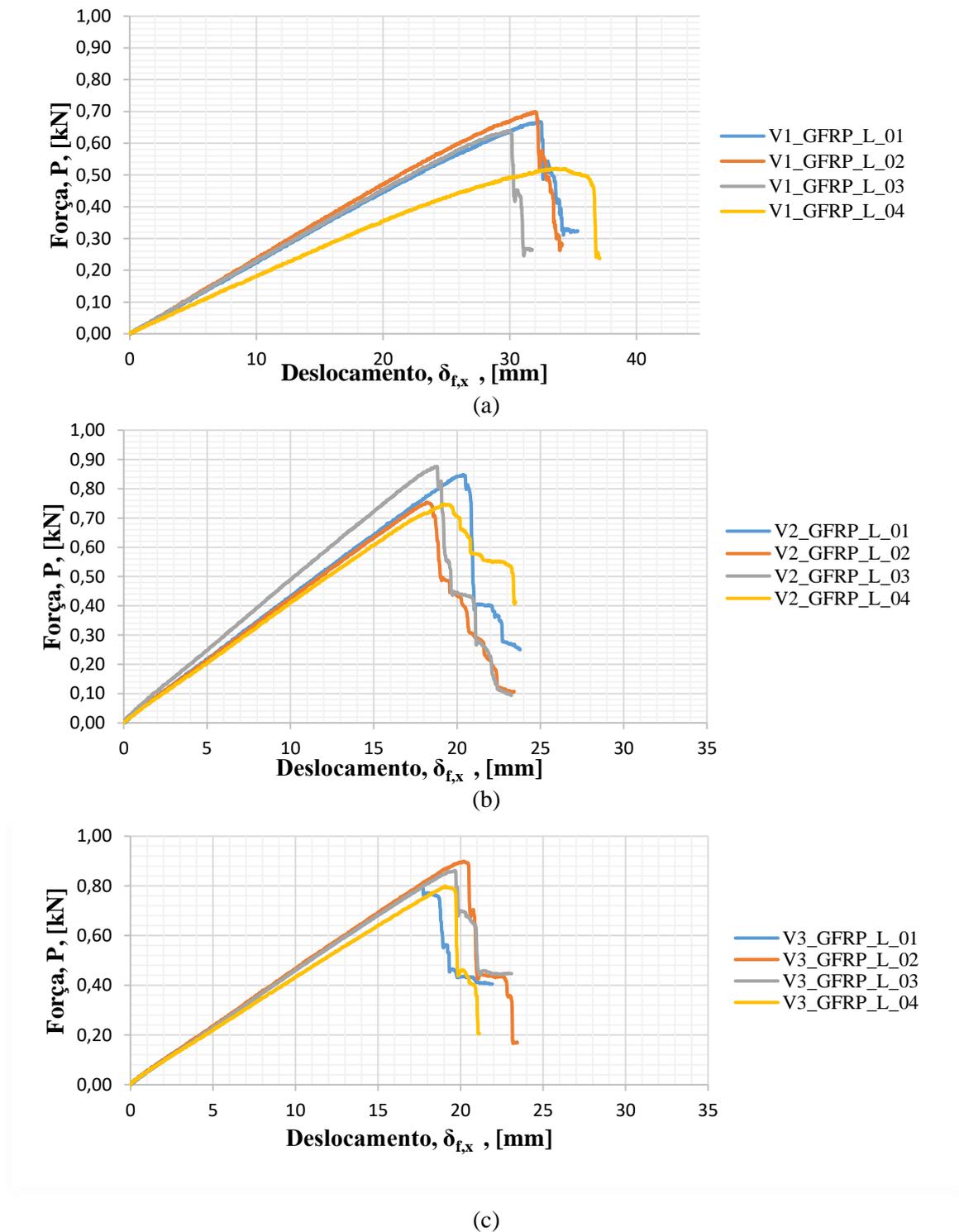


Figura 4.10 – Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para os provetes ensaiados a flexão, na direção longitudinal ao reforço principal: (a) provetes V1; (b) provetes V2 e (c) provetes V3.

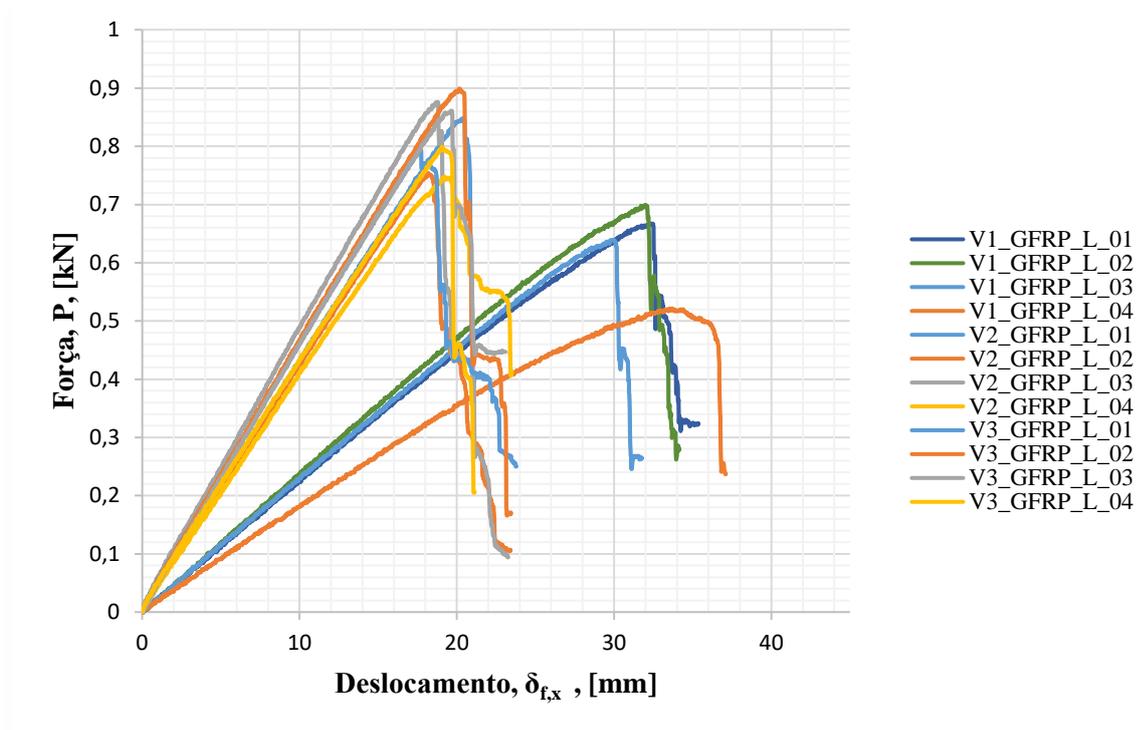


Figura 4.11 – Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para os provetes ensaiados à flexão, na direção longitudinal ao reforço principal.

### Provetes orientados na direção transversal ao reforço principal

Analisando a direção transversal às fibras de reforço principal, o material em estudo na fase inicial do carregamento o comportamento apresentado não é totalmente linear.

Constata-se ainda que a capacidade resistente do material após a rotura é nula (ao contrário do que acontecia na direção longitudinal), estando este comportamento associado ao facto de, nesta direção, a sua resistência se dever praticamente à resina constituinte.

A Figura 4.12 (a) apresenta os provetes obtidos a partir de laminados em GFRP de 4mm de espessura (V1). Estes apresentam um comportamento substancialmente diferente dos provetes V2 e V3. As respostas dos provetes V1 são similares entre si, no entanto diferem quando comparadas com as curvas dos provetes V2 e V3, sendo que apresentam uma capacidade de carga inferior e uma deformação pré-pico expressivamente superior à dos provetes V2 e V3.

A Figura 4.12 b) e c) permite observar as curvas relativas aos provetes V2 e V3. Estas curvas são todas semelhantes entre si. No entanto, é de salientar que a fase de pico e pós-pico dos provetes V2 apresentam diferenças entre si, tanto ao nível da capacidade de carga como de capacidade de deformação.

De uma forma geral, as respostas e os resultados encontrados entre provetes com a mesma constituição são consistentes e a dispersão de resultados é reduzida (ver Figura 4.13).

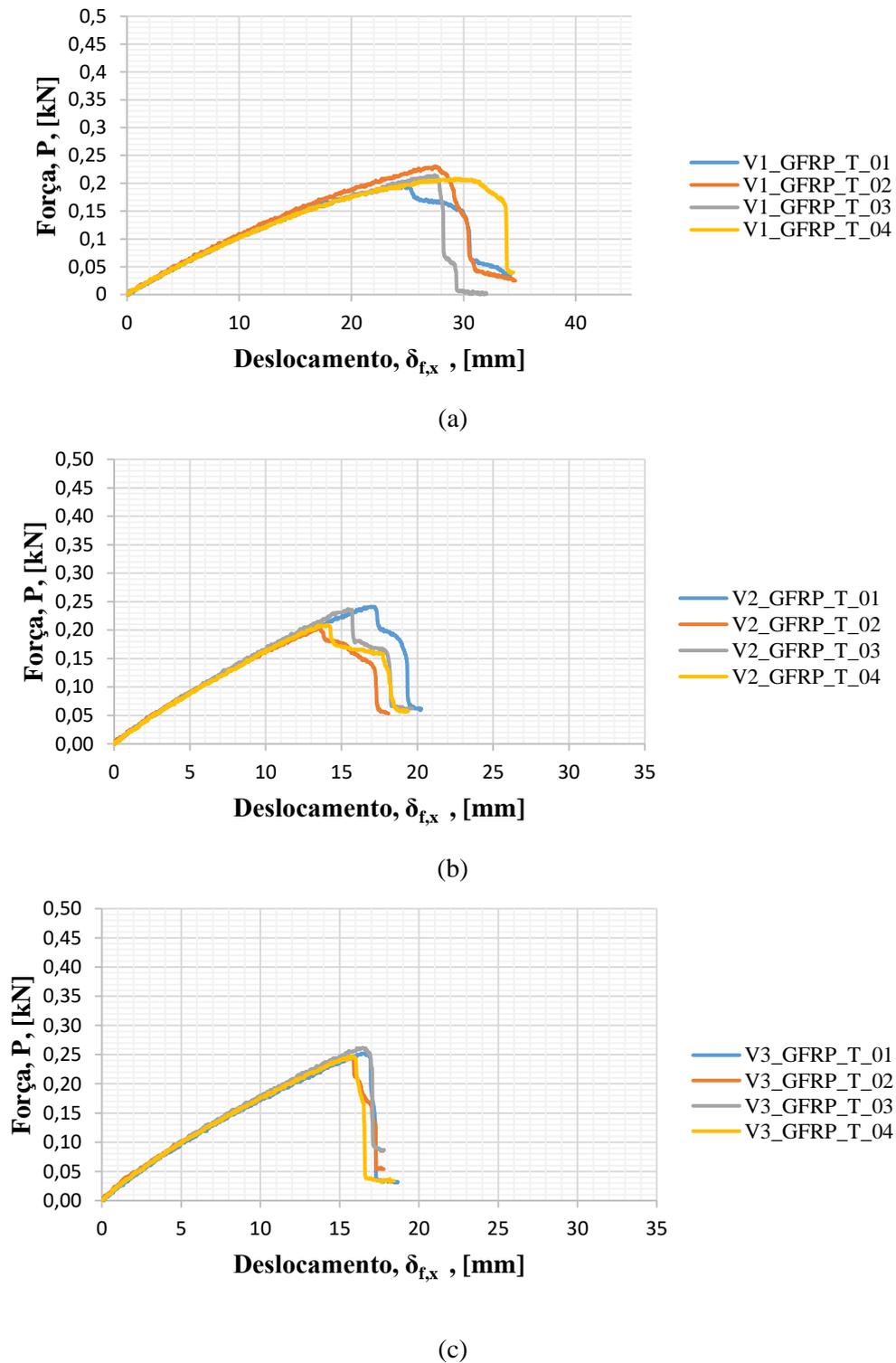


Figura 4.12 – Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para os provetes ensaiados a flexão, na direção transversal ao reforço principal: (a) provetes V1; (b) provetes V2 e (c) provetes V3.

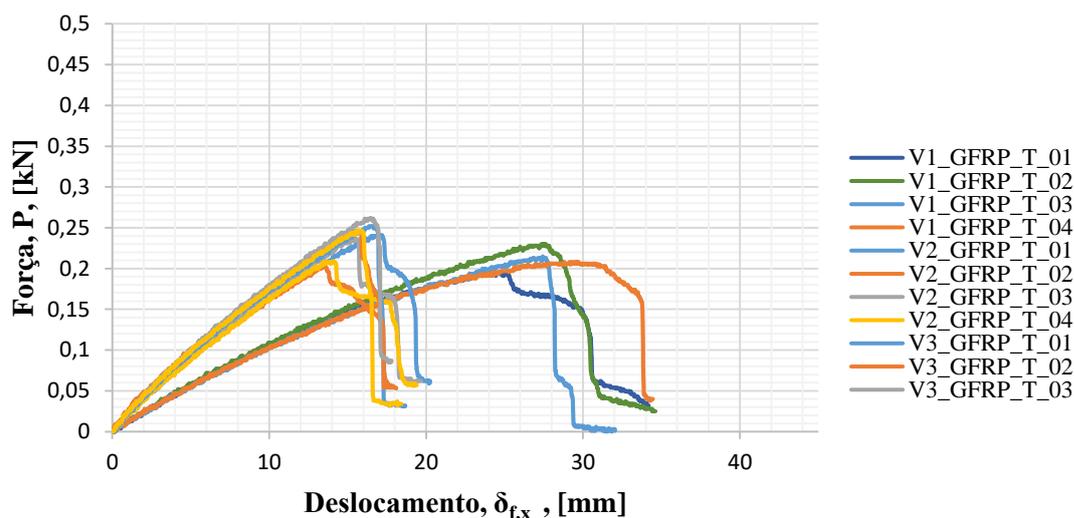


Figura 4.13 – Relação entre a força e o deslocamento a meio vão para os provetes ensaiados à flexão, na direção transversal ao reforço principal.

As respostas obtidas em ambas as direções, enquadram-se no reportado pela literatura.

A Tabela 4.5 e a Tabela 4.6 apresentam os resultados fundamentais obtidos a partir dos ensaios de flexão, em suma apresentam os valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação encontrados para cada um dos parâmetros analisados em ensaios de flexão em provetes de GFRP. São apresentados os valores médios dos parâmetros relativos à carga de rotura ( $P_{max}$ ), ao deslocamento na rotura ( $\delta_{fmax,x}$ ), à tensão de rotura  $(\sigma_{fmax,x})_{sup}$ , à extensão de rotura  $(\epsilon_{fmax,x})_{sup}$  e ao módulo de elasticidade em flexão ( $E_{f,x}$ ). A tensão e a extensão máximas superiores dizem respeito à máxima tensão negativa (compressões) e foram calculadas através das equações (4.1), (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*, designação na literatura inglesa, sendo estes parâmetros teóricos.

Os resultados apresentados na Tabela 4.5 mostram que os provetes V2 e V3 possuem uma tensão de flexão e uma extensão última ligeiramente inferiores aos dos provetes V1. Já o módulo de elasticidade é superior, comparativamente com os provetes V1. Quando comparados os provetes de V2 e V3, os primeiros apresentam maior tensão de flexão e maior módulo de elasticidade, devido à inclusão de trióxido de alumínio nos provetes de V3, enfraquecendo as propriedades mecânicas destes laminados de GFRP.

Tabela 4.5 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão em provetes de GFRP, orientados na direção longitudinal ao reforço principal.

Provete	Densidade	$P_{\text{máx}}$	$\delta_{\text{fímáx.x}}$	$(\sigma_{\text{fímáx.x}})_{\text{sup}}$	$(\epsilon_{\text{fímáx.x}})_{\text{sup}}$	$E_{f.x}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kN]	[mm]	[MPa]	[×10 <sup>-3</sup> ]	[GPa]
V1_GFRP_L_01	1924.73	0.67	32.19	415.02	19.13	23.44
V1_GFRP_L_02	1942.95	0.70	31.99	436.35	18.84	24.94
V1_GFRP_L_03	1950.74	0.64	29.77	425.34	16.96	26.96
V1_GFRP_L_04	1901.81	0.52	33.60	322.27	18.80	20.07
<b>Média</b>	1930.06	0.63	31.89	399.74	18.43	23.85
<b>Desvio Padrão</b>	18.84	0.07	1.37	45.36	0.86	2.51
<b>Cov [%]</b>	0.98%	10.65%	4.30%	11.35%	4.65%	10.54%
V2_GFRP_L_01	2020.68	0.85	20.37	406.56	13.43	31.08
V2_GFRP_L_02	2019.37	0.75	18.16	364.64	11.81	31.43
V2_GFRP_L_03	2049.42	0.88	18.70	408.77	12.35	32.89
V2_GFRP_L_04	1987.31	0.75	19.22	350.87	12.62	28.16
<b>Média</b>	2019.19	0.81	19.11	382.71	12.55	30.89
<b>Desvio Padrão</b>	21.98	0.06	0.81	25.44	0.59	1.71
<b>Cov [%]</b>	1.09%	7.00%	4.26%	6.65%	4.67%	5.55%
V3_GFRP_L_01	1963.85	0.79	17.65	346.46	12.24	27.99
V3_GFRP_L_02	1976.12	0.90	20.15	392.10	13.86	28.51
V3_GFRP_L_03	1986.45	0.86	19.64	383.84	13.47	29.21
V3_GFRP_L_04	1959.10	0.80	19.07	357.60	13.14	26.46
<b>Média</b>	1971.38	0.84	19.13	370.00	13.18	28.04
<b>Desvio Padrão</b>	10.69	0.04	0.93	18.63	0.60	1.01
<b>Cov [%]</b>	0.54%	5.27%	4.89%	5.03%	4.55%	3.61%

A partir da análise da Tabela 4.6, verifica-se que os provetes V2 e V3 apresentam uma tensão de flexão e uma extensão última ligeiramente inferiores às dos provetes V1. Os provetes V2 apresentam o módulo de elasticidade maior.

Tabela 4.6 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão em provetes de GFRP, orientados na direção transversal ao reforço principal.

<b>Provete</b>	<b>Densidade</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b><math>P_{m\acute{a}x}</math></b> [kN]	<b><math>\delta_{f_{m\acute{a}x,x}}</math></b> [mm]	<b><math>(\sigma_{f_{m\acute{a}x,x}})_{sup}</math></b> [MPa]	<b><math>(\epsilon_{f_{m\acute{a}x,x}})_{sup}</math></b> [ $\times 10^{-3}$ ]	<b><math>E_{f,x}</math></b> [GPa]
V1_GFRP_T_01	1996.38	0.20	23.79	118.42	13.30	12.38
V1_GFRP_T_02	2001.20	0.23	27.34	140.24	15.31	12.24
V1_GFRP_T_03	1991.32	0.22	27.43	131.61	15.36	11.94
V1_GFRP_T_04	1973.11	0.21	28.81	122.04	16.25	11.17
<b>Média</b>	1990.50	0.21	26.84	128.08	15.05	11.93
<b>Desvio Padrão</b>	10.63	0.01	1.86	8.52	1.08	0.47
<b>Cov [%]</b>	0.53%	5.79%	6.92%	6.65%	7.17%	3.92%
V2_GFRP_T_01	2042.92	0.24	16.87	115.27	10.85	13.43
V2_GFRP_T_02	2037.37	0.20	13.48	93.57	8.87	11.77
V2_GFRP_T_03	2075.16	0.24	15.43	116.90	9.88	12.85
V2_GFRP_T_04	2061.41	0.21	14.05	102.20	9.10	13.23
<b>Média</b>	2054.22	0.22	14.96	106.99	9.68	12.82
<b>Desvio Padrão</b>	15.01	0.02	1.31	9.61	0.77	0.64
<b>Cov [%]</b>	0.73%	7.50%	8.78%	8.99%	7.99%	4.99%
V3_GFRP_T_01	1910.93	0.25	16.37	105.29	11.33	10.48
V3_GFRP_T_02	1942.70	0.25	15.36	104.02	10.58	11.17
V3_GFRP_T_03	1983.23	0.26	16.45	112.10	11.09	12.56
V3_GFRP_T_04	1953.79	0.25	15.70	101.19	10.74	11.04
<b>Média</b>	1947.66	0.25	15.97	105.65	10.93	11.31
<b>Desvio Padrão</b>	25.87	0.01	0.46	4.01	0.30	0.77
<b>Cov [%]</b>	1.33%	2.52%	2.85%	3.79%	2.71%	6.77%

A partir das análises anteriores comprova-se globalmente a uniformidade de resultados nos vários parâmetros analisados, obtendo-se reduzidos coeficientes de variação associados a estes.

Em geral, os provetes de GFRP (V1, V2 e V3) romperam por tração em flexão por rotura das fibras inferiores, tanto na direção longitudinal, como na direção transversal. Estas foram rompendo progressivamente à medida que o deslocamento imposto a meio vão ia aumentando. Observou-se também a interdelaminação entre camadas horizontais (plano perpendicular à direção de carregamento) na região tracionada dos provetes e na zona central do vão.

Após deslocamento máximo ser atingido continuou-se o ensaio de modo a perceber a evolução do comportamento dos provetes, ao nível da capacidade de carga. Como esperado, as fibras inferiores iam rompendo sequencialmente.

As Figura 4.14 e Figura 4.15 ilustram os modos de rotura tipo obtidos nos ensaios de flexão. A Figura 4.16 apresenta fotografias efetuadas na zona do meio vão, relativas à evolução do comportamento dos provetes de GFRP, em ambas as direções. Uma vez que os modos de rotura foram semelhantes, quer entre provetes do mesmo tipo, quer entre provetes de constituições e dimensões diferentes, então apresenta-se as imagens relativas apenas a um provete de GFRP, na direção longitudinal e direção transversal.

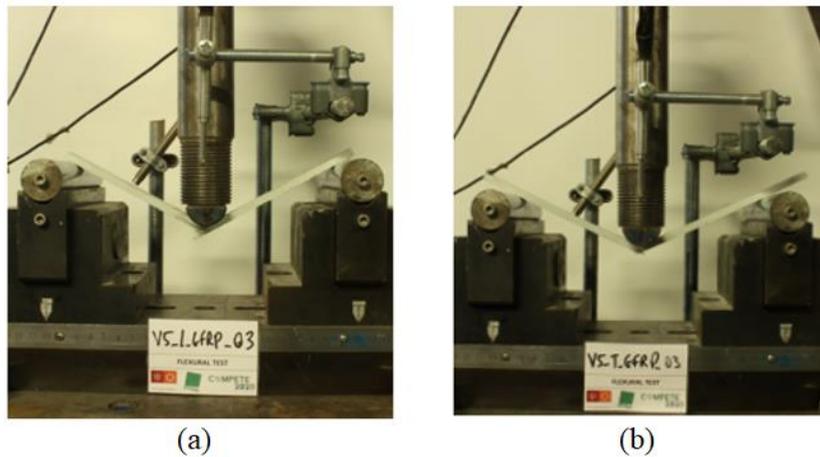


Figura 4.14 – Modos de rotura obtidos de ensaios de flexão em laminados de GFRP: (a) direção longitudinal (direção de pultrusão) (V2\_GFRP\_L\_03) e (b) direção transversal (oposta à direção de pultrusão) (V2\_GFRP\_T\_03).

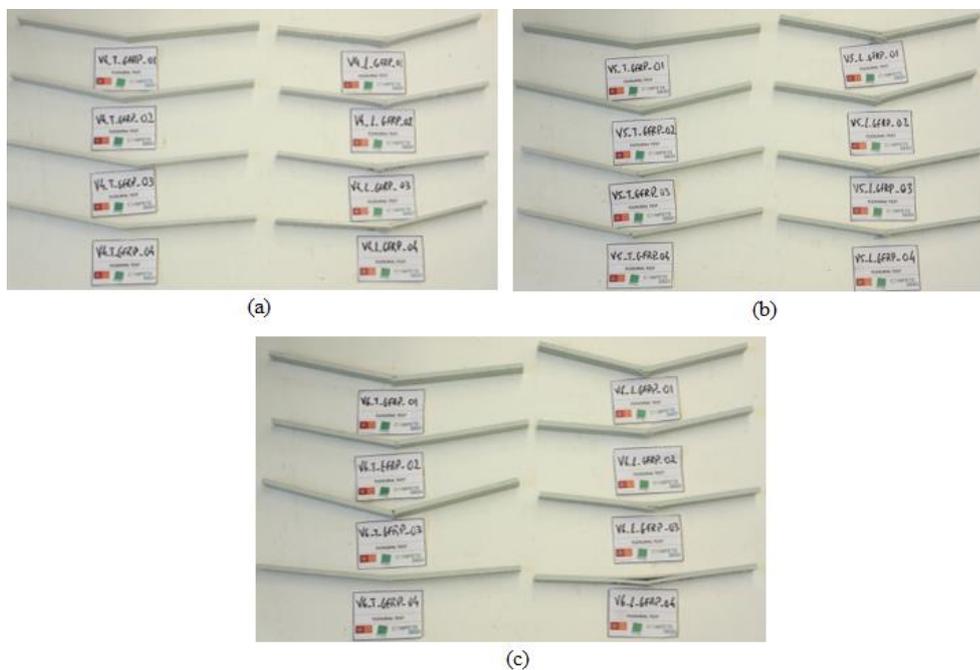


Figura 4.15 – Modos de rotura após os ensaios de flexão em provetes de laminados em GFRP, em ambas as direções (longitudinal: parte direita de cada fotografia e transversal: parte esquerda de cada fotografia): (a) V1; (b) V2 e (c) V3. Nota: o nível de deformação encontra-se “exagerado” relativamente ao ensaio padrão, uma vez que todos os provetes foram continuamente carregados, com o objetivo de amplificar o padrão de rotura.

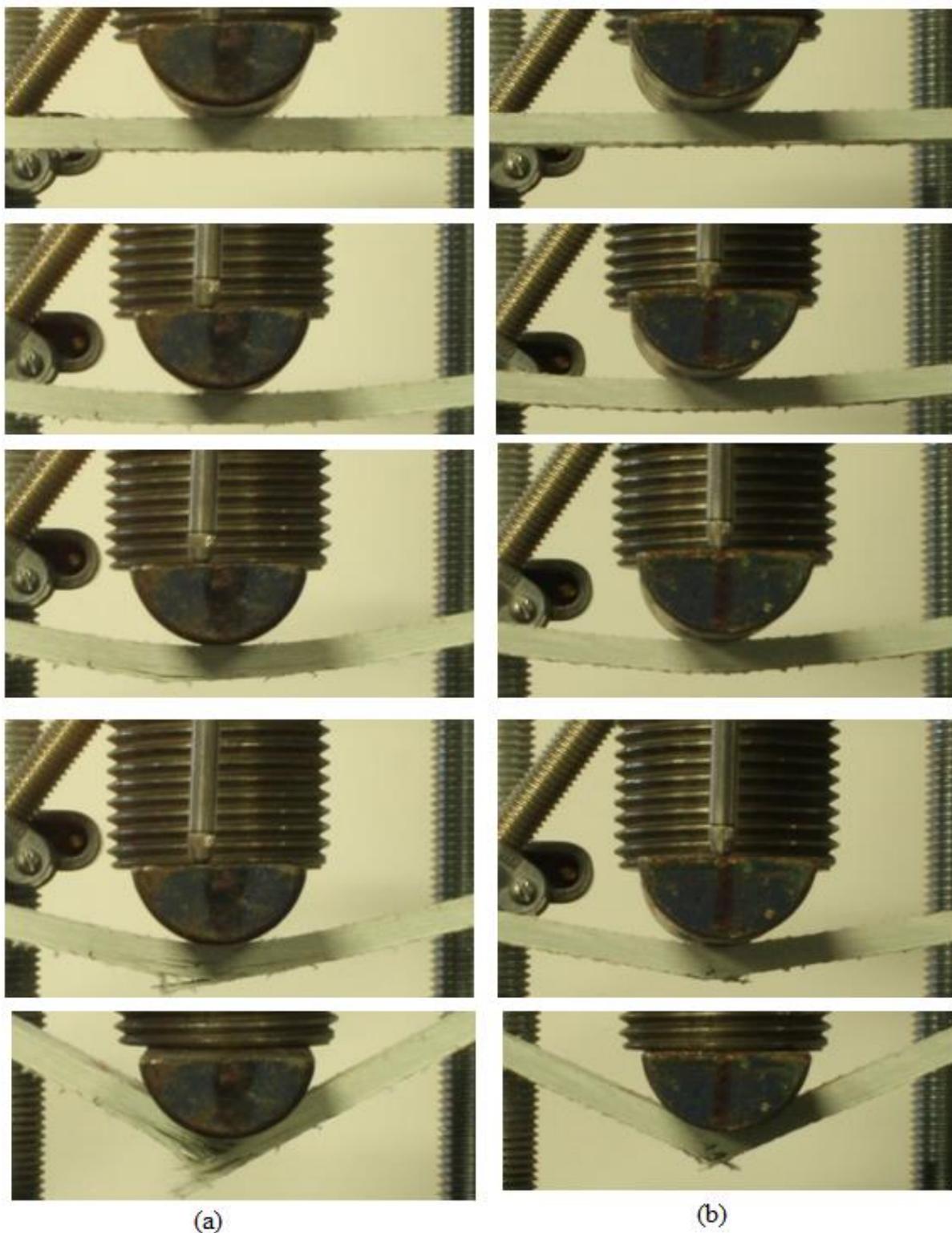


Figura 4.16 – Evolução da deformação e modo de rotura demonstrado pelos provetes de GFRP, testados na direção longitudinal e transversal, respetivamente: (a) provete V2\_GFRP\_L\_03 e (b) provete V2\_GFRP\_T\_03.

No ANEXO II são apresentados todos os modos de rotura dos ensaios à flexão correspondentes a cada tipo de provete.

Nesta fase, pretende-se comparar os valores obtidos entre os provetes (V1, V2 e V3), orientados na direção de pultrusão (longitudinal) e os provetes orientados na direção perpendicular à direção de pultrusão (transversal).

### Comparação dos resultados obtidos nos provetes V1, V2 e V3

Nas Figura 4.17 e Figura 4.18, comparam-se os provetes de V1, V2 e V3 com base nos valores médios obtidos entre cada tipo de provete.

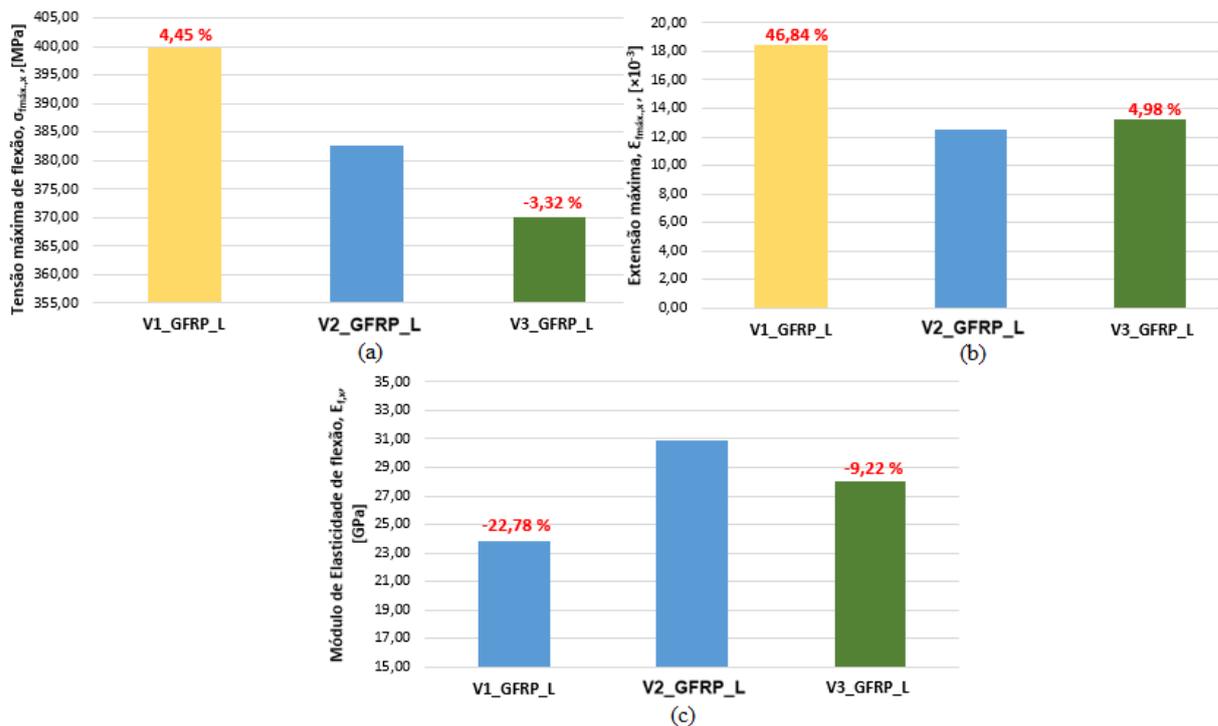


Figura 4.17 – Comparação de resultados para os provetes de V1, V2 e V3 a partir dos respetivos valores médios de: (a) tensão máxima de flexão na face superior; (b) extensão máxima na face superior e (c) módulo de elasticidade de flexão, na direção longitudinal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete V2.

Tal como se pode verificar, as respostas experimentais apresentam maiores diferenças entre os provetes de V1 quando comparados com os provetes de V2 e V3. Analisando esta direção podemos constatar que para a tensão máxima de flexão e extensão máxima, na face superior, os valores obtidos foram superiores para os provetes com menor espessura (V1). Em relação ao módulo de elasticidade de flexão obtiveram-se valores superiores para a maior espessura do provete (V2 e V3), sendo que o maior valor obtido foi nos provetes de V2.

A Figura 4.18 representa os resultados médios dos provetes orientados na direção transversal ao reforço principal.

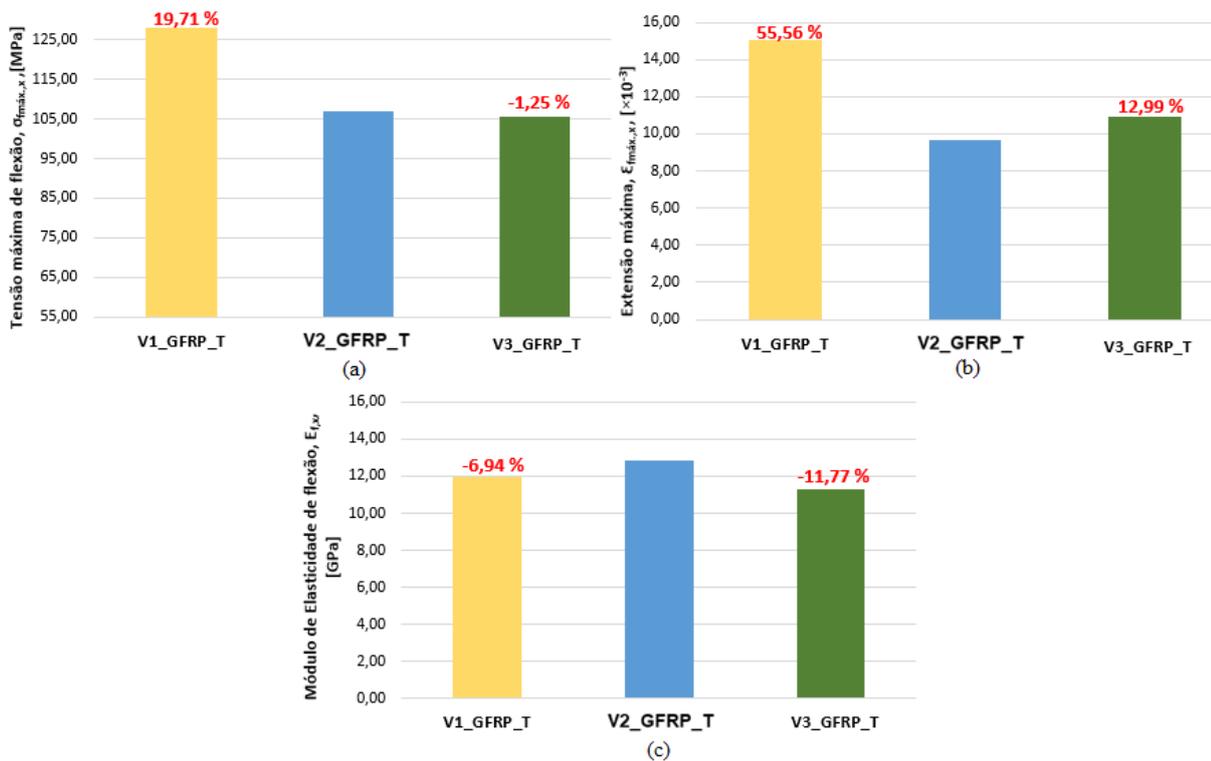


Figura 4.18 – Comparação de resultados para os provetes de V1, V2 e V3 a partir dos respectivos valores médios de: (a) tensão máxima de flexão na face superior; (b) extensão máxima na face superior e (c) módulo de elasticidade de flexão, na direção transversal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete V2.

Analisando a tensão máxima de flexão e extensão máxima, na face superior as variações são significativas, obtendo-se valores de maior ordem de grandeza no provete com menor espessura (V1).

Analisando ambas as direções podemos constatar que para a tensão máxima de flexão e extensão máxima, na face superior, os valores obtidos foram superiores para os provetes com menor espessura (V1). Em relação ao módulo de elasticidade de flexão obtiveram-se valores superiores para a maior espessura do provete (V2).

Assim, constata-se que ligeiras diferenças na espessura do provete, cerca de 1mm, condicionam os resultados obtidos nos ensaios de flexão. A inclusão de trióxido de alumínio na constituição dos provetes de V3 reduziu as características mecânicas dos provetes ensaiados à flexão.

A constituição dos laminados de GFRP fornecida pelo fabricante pode não estar completa, podendo existir diferenças na composição e arquitetura dos diferentes laminados de GFRP.

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.

A Figura 4.19 apresenta a variação média  $\delta_{f,x}/L$ , na direção longitudinal. Como se pode observar, na rotura os provetes de V1 apresentam uma relação  $\delta_{f,x}/L$  relativamente superior aos provetes em GFRP de V2 e V3.

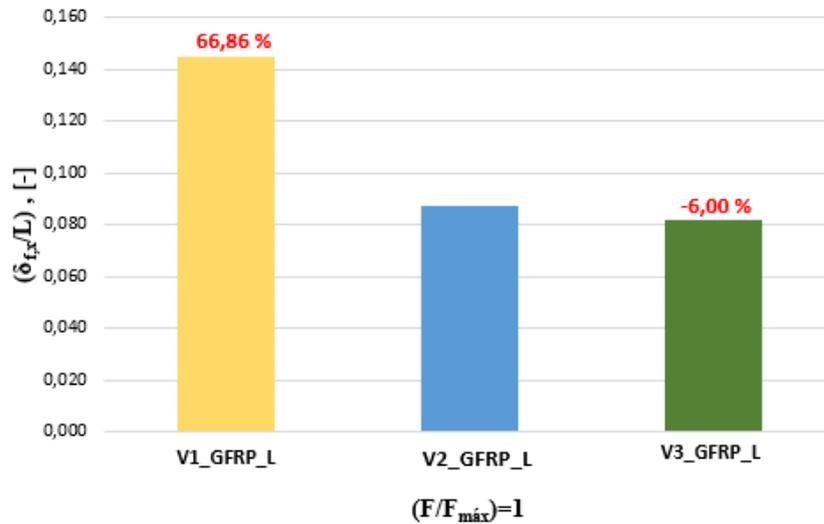


Figura 4.19 – Variação com base nos valores médios, referentes à direção longitudinal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete V2.

A Figura 4.20 apresenta a variação média  $\delta_{f,x}/L$ , na direção transversal. Como se pode observar, na rotura os provetes de V1 apresentam uma relação  $\delta_{f,x}/L$  bastante superior aos provetes em GFRP de V2 e V3. Esta relação superior observada em ambas as direções, relaciona-se com o facto de estes apresentarem uma maior deformabilidade, proporcionada pela menor espessura do provete de V1, sendo esta de 4mm em vez de 5mm apresentada nos provetes de V2 e V3.

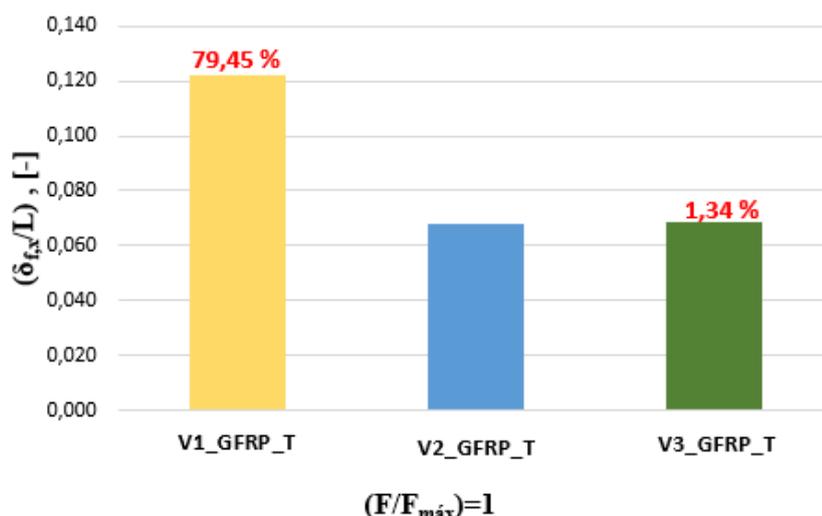


Figura 4.20 – Variação com base nos valores médios, referentes à direção transversal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete V2.

### 4.3.2 Ensaio de Tração Direta

Neste subcapítulo são apresentados os resultados dos ensaios de tração direta dos laminados de GFRP em estudo assim como as principais ilações retiradas.

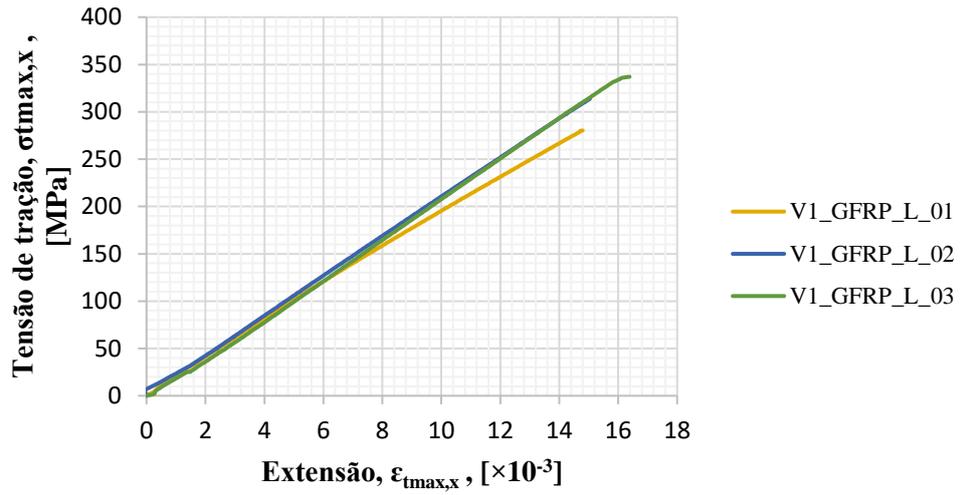
#### Provetes orientados na direção longitudinal ao reforço principal

As Figura 4.21 e Figura 4.22 apresentam as respostas que relacionam tensão de tração e extensão em provetes orientados na direção longitudinal.

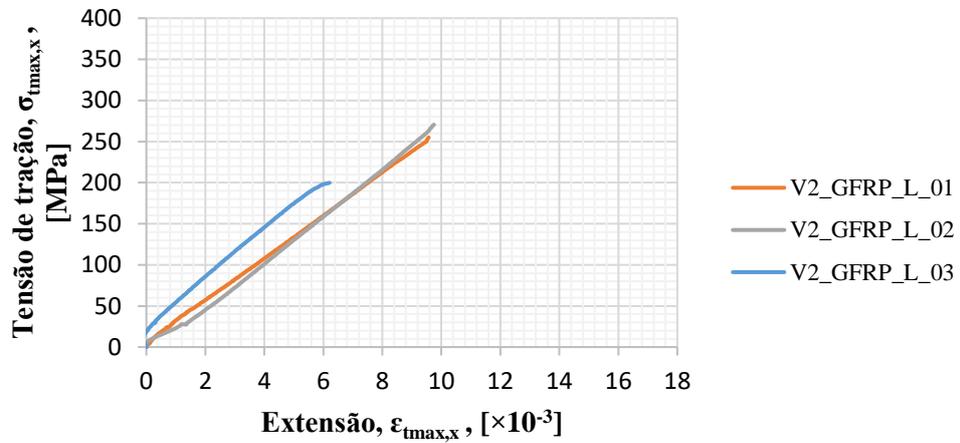
Verifica-se que o comportamento dos diferentes provetes é bastante semelhante. As diferenças centram-se apenas no que respeita à tensão e extensão máximas.

Os provetes ensaiados apresentam um comportamento linear elástico até à rotura, sendo esta uma rotura frágil, uma vez que é uma característica típica deste material.

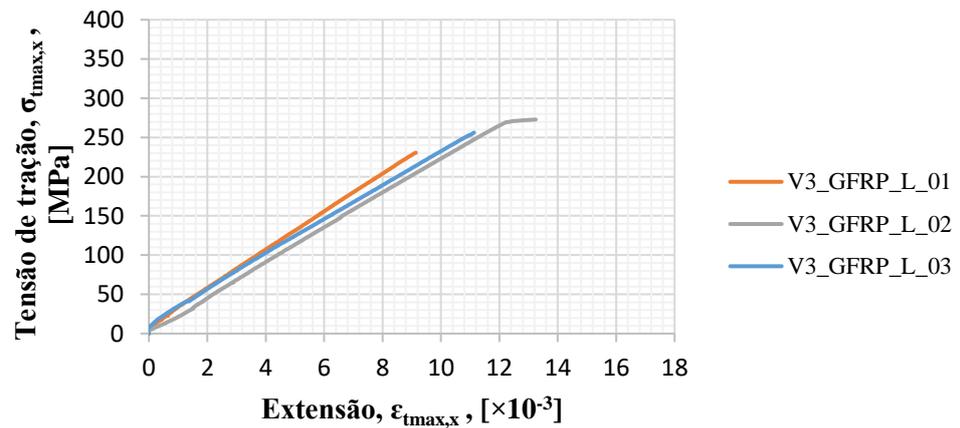
De um modo geral, os provetes V1 apresentam níveis de tensão máxima um pouco superiores aos medidos nos provetes V2 e V3.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.21 – Curvas tensão de tração *versus* extensão dos provetes ensaiados à tração direta, orientados na direção longitudinal: (a) V1, (b) V2 e (c) V3.

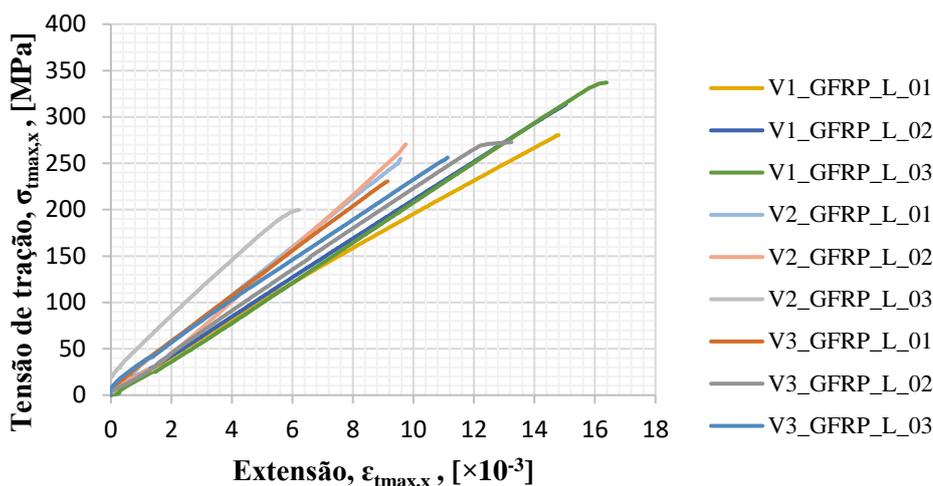


Figura 4.22 – Curvas tensão de tração *versus* extensão dos provetes ensaiados à tração direta, direção longitudinal: V1; V2 e V3.

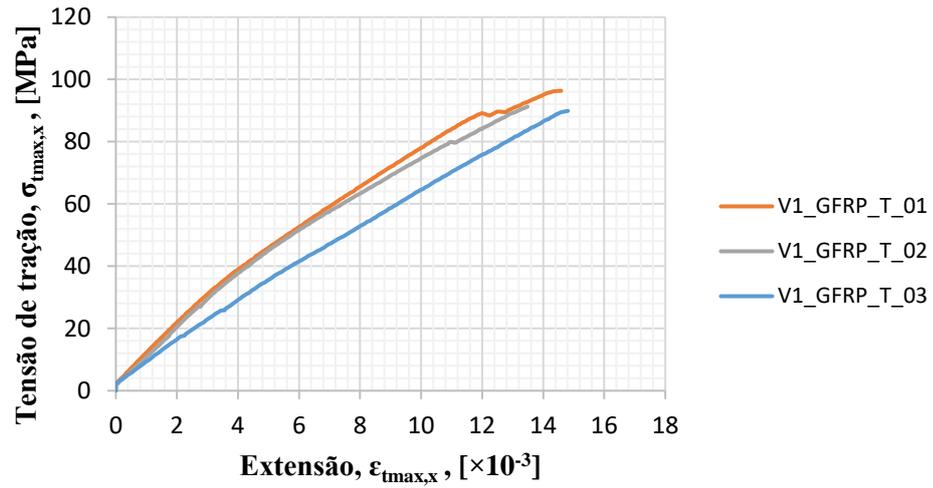
### Provetes orientados na direção transversal ao reforço principal

As Figura 4.23 e Figura 4.24 apresentam as curvas que relacionam tensão de tração e extensão em provetes orientados na direção transversal.

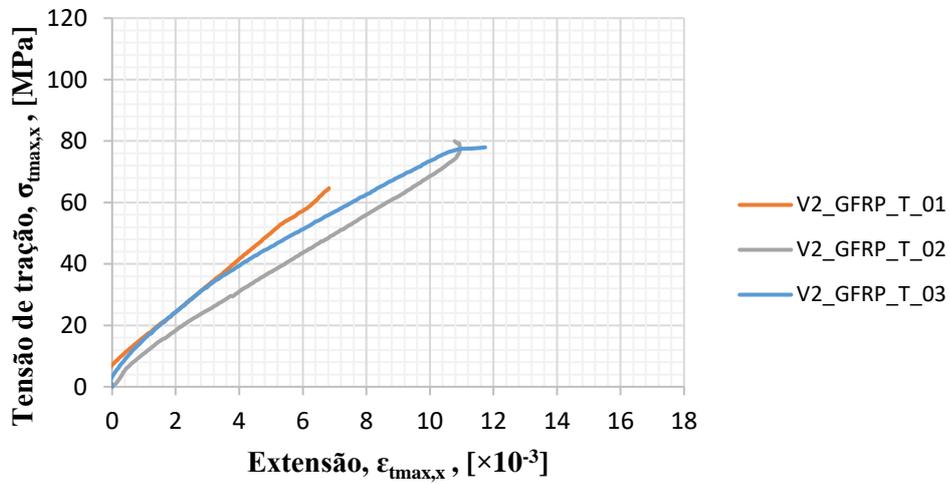
Analisando as Figura 4.23 e Figura 4.24, verifica-se que as respostas dos diferentes provetes são bastantes similares entre si, havendo apenas diferenças no que respeita à tensão e extensão máximas.

Os provetes ensaiados apresentam um comportamento elástico não linear até à rotura. A não linearidade pode estar relacionada com o facto de o provete estar solicitado na direção perpendicular à das fibras de reforço principal. O facto de a matriz estar mais solicitada contribui para este tipo de resposta. A matriz do laminado, ao contrário das fibras, apresenta microfendilhação que se propaga progressivamente. A rotura obtida é frágil, sendo uma característica típica deste material. Outro fator que contribui para estas respostas é o facto de as mantas dos laminados de GFRP em toda a sua espessura na direção transversal, apresentam irregularidades, i.e., a manta não se situa na mesma posição ao longo do desenvolvimento do provete, conforme se comprova na Figura 4.4.

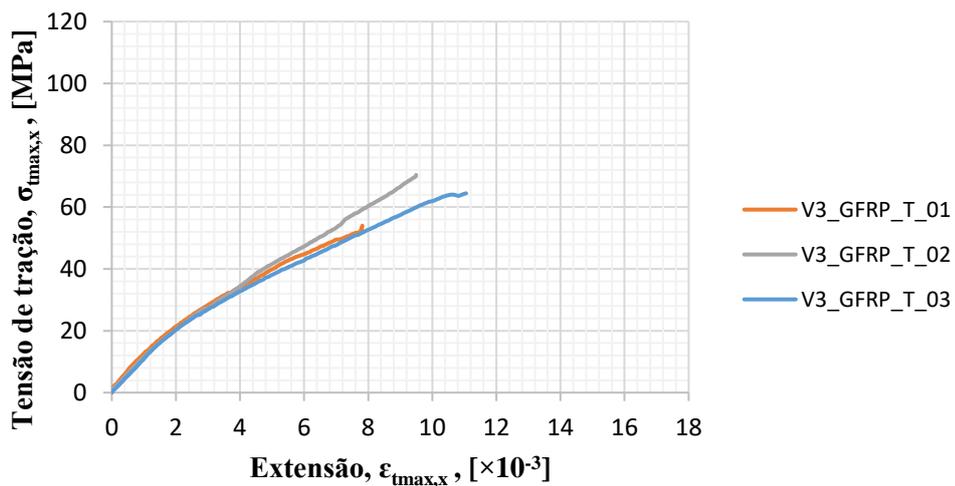
Numa primeira análise, de um modo geral os provetes V1 apresentam níveis de tensão ligeiramente superiores aos provetes V2 e V3.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.23 – Curvas tensão de tração *versus* extensão dos provetes ensaiados à tração direta, direção transversal: (a) V1: 250×25×4 mm<sup>3</sup>, (b) V2: 250×25×5 mm<sup>3</sup> e (c) V3: 250×25×5 mm<sup>3</sup> com ATH na sua constituição.

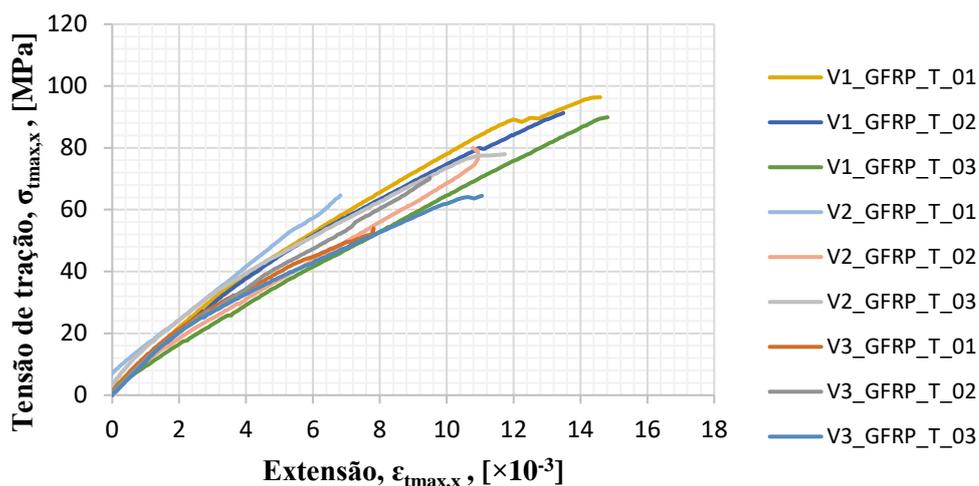


Figura 4.24 – Curvas tensão de tração *versus* extensão dos provetes ensaiados à tração direta, direção transversal: V1; V2 e V3.

Analisando ambas as direções, globalmente as respostas de todos os provetes do mesmo tipo (V1, V2 e V3) são consistentes, enquadrando-se na bibliografia e a dispersão de resultados é reduzida. À exceção da deformação dos provetes que apresentam dispersão de resultados significativa.

A Tabela 4.7 reúne os resultados obtidos dos ensaios de tração direta, realizados com provetes orientados na direção longitudinal. Como se observa na tabela, a densidade deste tipo de material varia entre os  $1901,4 \text{ kg/m}^3$  e os  $2058,7 \text{ kg/m}^3$ . De todos os provetes ensaiados, o provete V1\_GFRP\_L\_03 obteve maior tensão de tração, ( $\sigma_{t_{max,x}}$ ) de  $337,05 \text{ MPa}$ . A extensão máxima ( $\epsilon_{t_{max,x}}$ ) obtida foi de  $16,39\%$  correspondente ao provete V1\_GFRP\_L\_03 e o módulo de elasticidade máximo de  $31,06 \text{ GPa}$  correspondente ao provete V2\_GFRP\_L\_03.

Os valores encontrados estão próximos de resultados comparáveis encontrados na bibliografia.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos em provetes de GFRP ensaiados à tração direta, orientados na direção longitudinal.

<b>Provete</b>	<b>Densidade</b> [Kg/m <sup>3</sup> ]	<b>P<sub>máx</sub></b> [kN]	<b>σ<sub>tmax,x</sub></b> [MPa]	<b>ε<sub>tmax,x</sub></b> [×10 <sup>-3</sup> ]	<b>E<sub>t,x</sub></b> [GPa]
V1_GFRP_L_01	1961.41	30.84	280.29	14.79	19.88
V1_GFRP_L_02	1901.39	34.26	313.92	15.04	19.55
V1_GFRP_L_03	1942.70	36.68	337.05	16.39	18.99
<b>Média</b>	<b>1935.17</b>	<b>33.93</b>	<b>310.42</b>	<b>15.41</b>	<b>19.47</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>25.07</b>	<b>2.40</b>	<b>23.30</b>	<b>0.70</b>	<b>0.37</b>
<b>Cov (%)</b>	<b>1.30%</b>	<b>7.06%</b>	<b>7.51%</b>	<b>4.54%</b>	<b>1.88%</b>
V2_GFRP_L_01	2014.72	33.76	254.94	9.57	24.94
V2_GFRP_L_02	2050.06	34.46	270.46	9.74	24.58
V2_GFRP_L_03	2058.69	26.56	199.77	6.21	31.06
<b>Média</b>	<b>2041.15</b>	<b>31.59</b>	<b>241.72</b>	<b>8.51</b>	<b>26.86</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>19.02</b>	<b>3.57</b>	<b>30.33</b>	<b>1.63</b>	<b>2.97</b>
<b>Cov (%)</b>	<b>0.93%</b>	<b>11.30%</b>	<b>12.55%</b>	<b>19.12%</b>	<b>11.07%</b>
V3_GFRP_L_01	1912.34	30.93	230.49	9.14	24.57
V3_GFRP_L_02	1958.52	37.92	272.75	13.24	23.57
V3_GFRP_L_03	1951.02	37.55	256.16	11.13	22.58
<b>Média</b>	<b>1940.63</b>	<b>35.47</b>	<b>253.13</b>	<b>11.17</b>	<b>23.57</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>20.24</b>	<b>3.21</b>	<b>17.39</b>	<b>1.67</b>	<b>0.81</b>
<b>Cov (%)</b>	<b>1.04%</b>	<b>9.05%</b>	<b>6.87%</b>	<b>14.98%</b>	<b>3.45%</b>

A Tabela 4.8 apresenta os resultados dos ensaios de tração direta, realizados com provetes orientados na direção transversal. Como se observa na tabela, a densidade deste tipo de material varia entre os 1872,7 kg/m<sup>3</sup> e os 2011,0 kg/m<sup>3</sup>. De todos os provetes ensaiados, o provete V1\_GFRP\_T\_01 foi o que obteve maior tensão de tração, (σ<sub>tmax,x</sub>) de 96,35 MPa. A extensão máxima (ε<sub>tmax,x</sub>) obtida foi de 14,81‰ correspondente ao provete V1\_GFRP\_T\_03 e o módulo de elasticidade máximo de 9,41 GPa correspondente ao provete V1\_GFRP\_T\_01.

Os valores encontrados estão de acordo com a bibliografia.

Tabela 4.8 – Resultados obtidos em provetes de GFRP ensaiados à tração direta, orientados na direção transversal.

<b>Provete</b>	<b>Densidade</b> [Kg/m <sup>3</sup> ]	<b><math>P_{máx}</math></b> [kN]	<b><math>\sigma_{tmax.x}</math></b> [MPa]	<b><math>\epsilon_{tmax.x}</math></b> [ $\times 10^{-3}$ ]	<b><math>E_{t,x}</math></b> [GPa]
V1_GFRP_T_01	1872.69	11.69	96.35	14.59	9.41
V1_GFRP_T_02	1899.34	11.00	91.27	13.49	9.37
V1_GFRP_T_03	1901.70	10.72	89.89	14.81	6.76
<b>Média</b>	<b>1891.24</b>	<b>11.14</b>	<b>92.50</b>	<b>14.30</b>	<b>8.51</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>13.15</b>	<b>0.41</b>	<b>2.78</b>	<b>0.58</b>	<b>1.24</b>
<b>Cov (%)</b>	<b>0.70%</b>	<b>3.66%</b>	<b>3.01%</b>	<b>4.04%</b>	<b>14.59%</b>
V2_GFRP_T_01	2011.04	8.53	64.62	6.82	8.37
V2_GFRP_T_02	1992.32	10.28	81.53	6.80	7.09
V2_GFRP_T_03	1988.62	9.83	77.94	11.74	8.54
<b>Média</b>	<b>1997.33</b>	<b>9.55</b>	<b>74.70</b>	<b>8.45</b>	<b>8.00</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>9.81</b>	<b>0.74</b>	<b>7.28</b>	<b>2.32</b>	<b>0.64</b>
<b>Cov (%)</b>	<b>0.49%</b>	<b>7.77%</b>	<b>9.74%</b>	<b>27.49%</b>	<b>8.04%</b>
V3_GFRP_T_01	1953.48	7.37	53.99	7.82	7.96
V3_GFRP_T_02	1910.89	9.45	70.43	9.49	8.37
V3_GFRP_T_03	1947.73	8.12	64.46	11.05	8.10
<b>Média</b>	<b>1937.37</b>	<b>8.31</b>	<b>62.96</b>	<b>9.45</b>	<b>8.14</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>18.87</b>	<b>0.86</b>	<b>6.79</b>	<b>1.32</b>	<b>0.17</b>
<b>Cov (%)</b>	<b>0.97%</b>	<b>10.35%</b>	<b>10.79%</b>	<b>13.98%</b>	<b>2.10%</b>

Nas Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28 apresentam-se os modos de rotura típicos obtidos nos ensaios de tração direta realizados em provetes de GFRP.

A norma de ensaio utilizada fornece a Figura 4.25 para a classificação dos modos de rotura típicos dos ensaios de tração. Cada uma das siglas mencionadas corresponde ao tipo de rotura, área de rotura e local onde ocorre a rotura, respetivamente, e seguem a nomenclatura indicada na norma ASTM D 3039/D 3039M-00 (ASTM, 2000b).

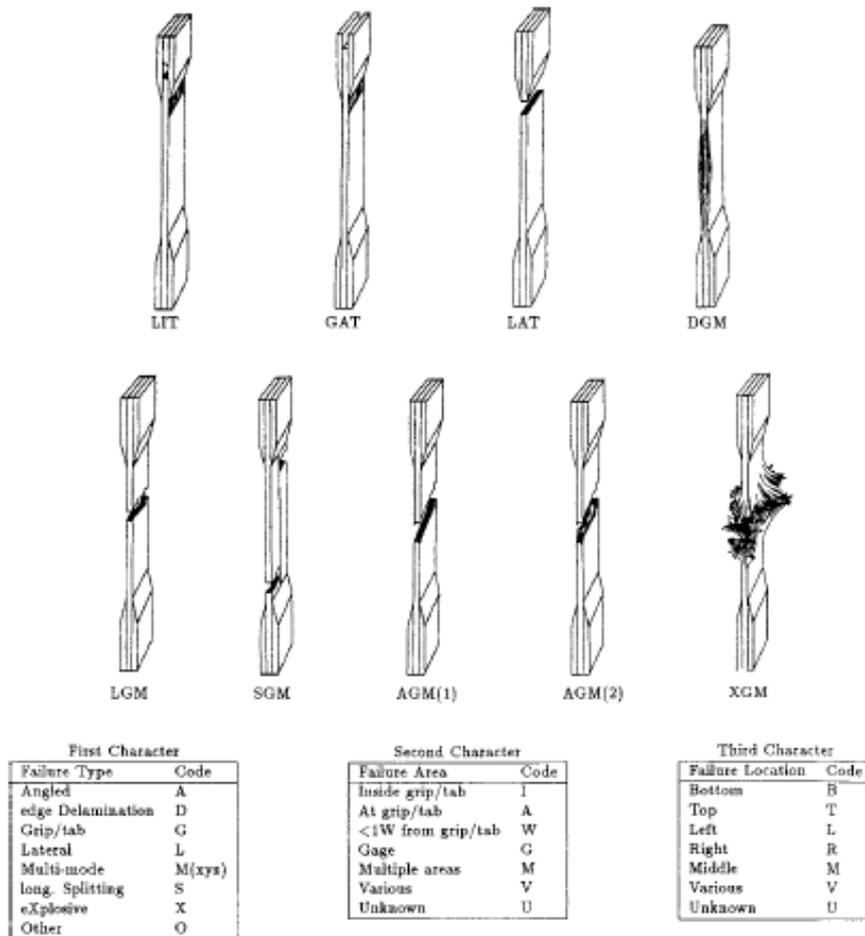


Figura 4.25 – Classificação dos modos de rotura típicos dos ensaios de tração. (ASTM D 3039/D 3039M-00 (ASTM, 2000b)).

No ANEXO III são apresentados todos os modos de rotura correspondentes a cada tipo de provete e correspondente classificação, de acordo com a norma de ensaio utilizada.

De uma forma geral, os provetes apresentam um modo de rotura similar entre si, que é caracterizado pela rotura progressiva dos fios que compõem as diversas camadas de *roving* 9600 de vidro, em vários pontos interiores do provete. Além disso, verifica-se também a delaminação das camadas das extremidades (destacamento devido à rotura de uma camada de *roving* no caso dos provetes correspondentes a V1\_GFRP\_L). De acordo com a norma ASTM D 3039/D 3039M-00, obteve-se um MMV (M – *multimode*, M – *multiple areas*, V – *various*).

Analisando cada tipo de provete orientado na direção longitudinal (Figura 4.26):

- Os provetes de V1, V2 e V3 apresentam dois tipos de rotura, caracterizadas por rotura lateral e rotura a partir da delaminação dos bordos. Os provetes são então classificados por LAB (*L – lateral, A – At grip/tab, B – bottom*), quando a rotura ocorre na zona do aperto do provete. Nos restantes provetes, as roturas deram-se por DGM (*D – edge delamination, G – gage, M – middle*), quando esta ocorreu por delaminação dos bordos do provete.

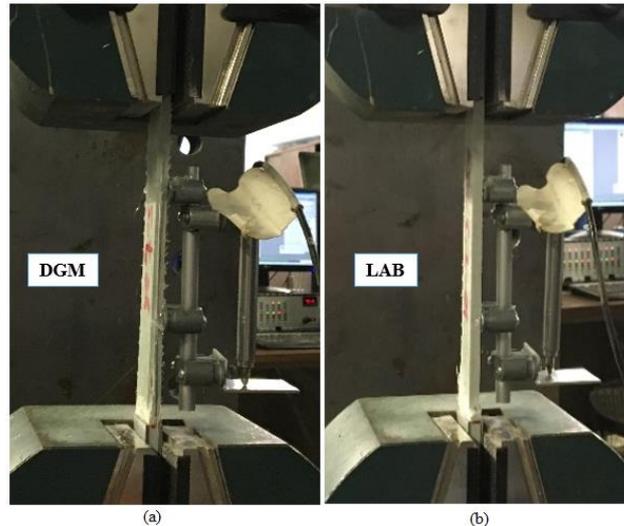


Figura 4.26 – Modos de rotura obtidos em provetes orientados na direção longitudinal, com respetiva classificação: (a) DGM e (b) LAB.

Observando agora o comportamento dos provetes orientados na direção transversal (Figura 4.27):

- Os provetes de V1, V2 e V3 apresentam uma rotura angular, tal como expectável, porque estes foram ensaiados na direção oposta à de pultrusão. A rotura em alguns destes provetes acontece na zona do LVDT, denominando-se a mesma por AGM (*A – angled, G – gage, M – middle*). Noutros provetes da mesma direção, a rotura é do tipo AAT (*A – angle, A – at grip/tab, T – top*) e existiram também roturas do tipo AAB (*A – angle, A – at grip/tab, B – bottom*).

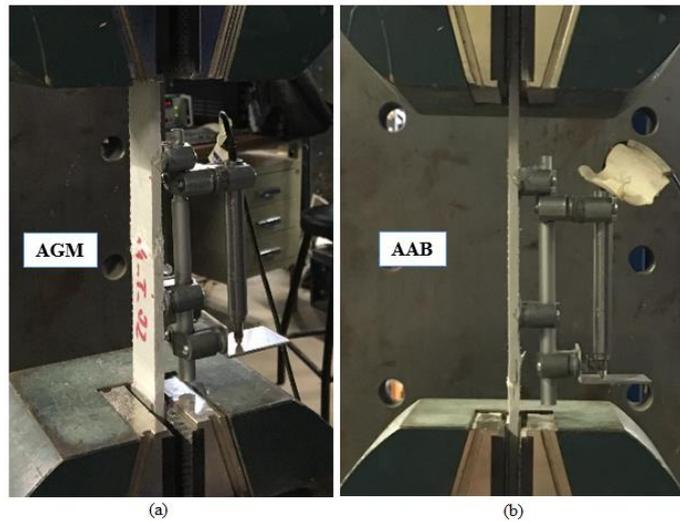


Figura 4.27 – Modos de rotura tipo obtidos nos provetes, na direção transversal, com respetiva classificação segundo a norma de ensaio utilizada: (a) AGM e (b) AAB.

A Figura 4.28 apresenta imagens de todos os provetes de laminados de GFRP, após a realização dos ensaios de tração direta.

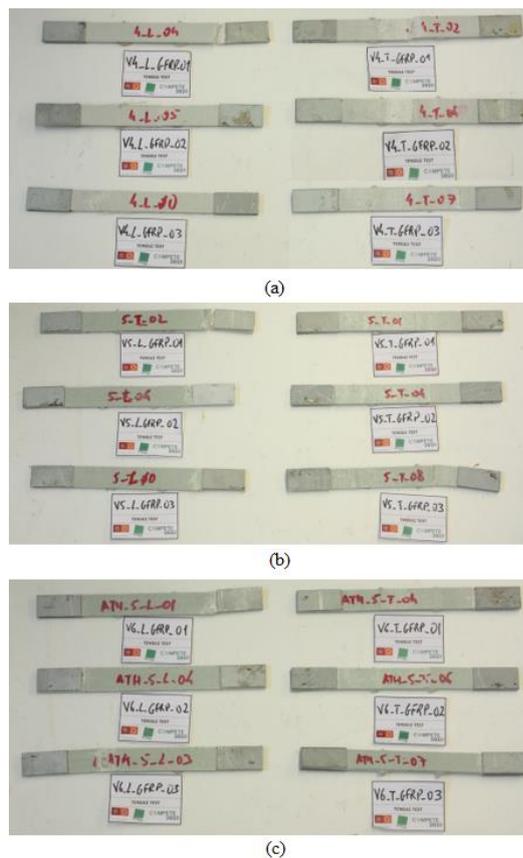


Figura 4.28 – Modos de rotura obtidos nos provetes: (a) V1\_GFRP\_L à esquerda e V1\_GFRP\_T à direita; (b) V2\_GFRP\_L à esquerda e V2\_GFRP\_T à direita e (c) V3\_GFRP\_L à esquerda e V3\_GFRP\_T à direita.

## Comparação de resultados

Nas Figura 4.29 e Figura 4.30 comparam-se os resultados obtidos em provetes de diferentes constituições (V1, V2 e V3), orientados em ambas as direções, isto é, direção longitudinal e transversal, respetivamente.

Na Figura 4.29 analisam-se os resultados obtidos em provetes orientados na direção de pultrusão. Comparando os provetes V1 com os provetes V2, verifica-se que existe uma diminuição nos valores de todos os parâmetros analisados, à exceção do módulo de elasticidade em tração que em V2 é cerca de 37,94% superior a V1.

Confrontando os provetes de diferentes constituições, constata-se que, tanto nos provetes V2 como V3 os valores obtidos são semelhantes, à exceção da extensão máxima que é cerca de 31,29% superior nos provetes V3.

Assinala-se ainda o facto de os provetes V1 atingirem extensões últimas ligeiramente superiores às dos restantes provetes.

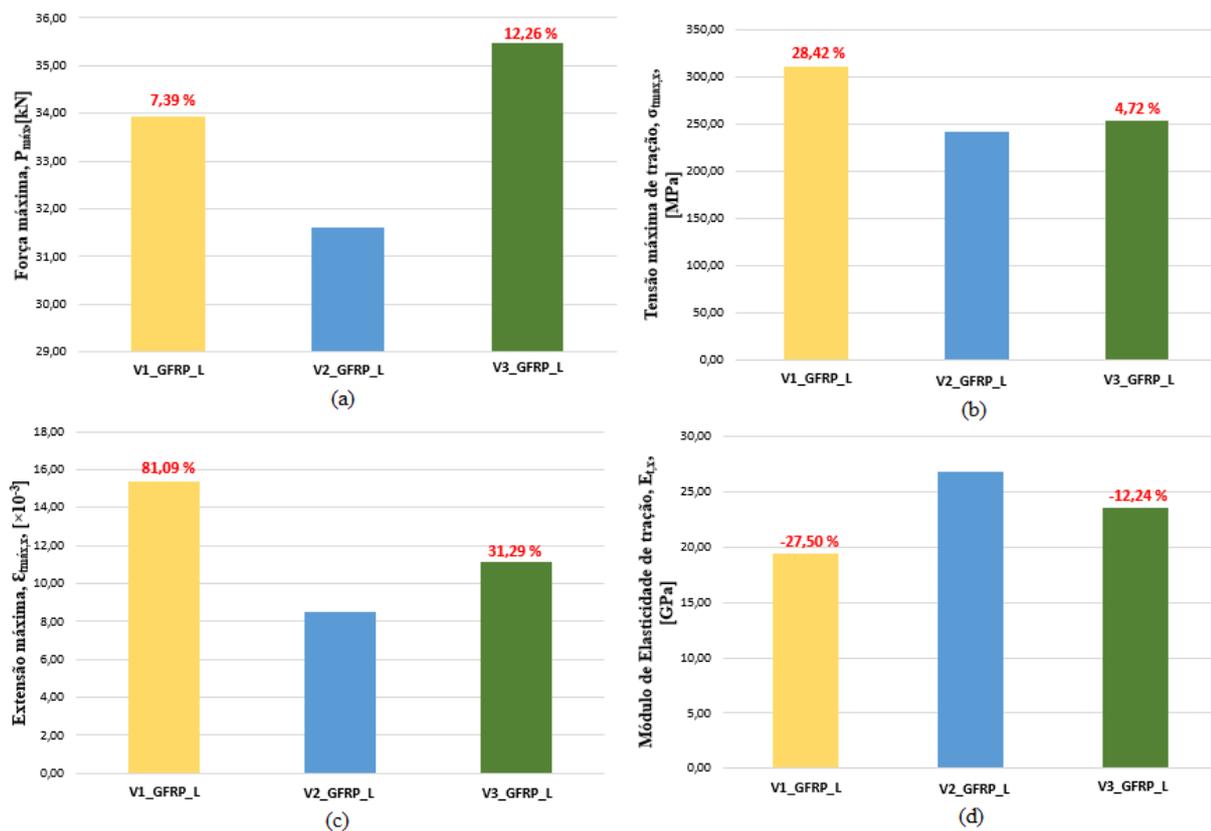


Figura 4.29 – Comparação dos vários parâmetros obtidos entre V1, V2 e V3, orientados na direção longitudinal: (a) força máxima atingida; (b) tensão de tração máxima; (c) extensão máxima e (d) módulo de elasticidade. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete V2.

Na Figura 4.30 analisam-se os resultados obtidos em provetes orientados na direção transversal. Comparando os provetes V1 com os provetes V2, verifica-se que existe uma diminuição geral nos valores obtidos em provetes V2. É de salientar a redução acentuada da extensão máxima em cerca de 40,86%.

Confrontando os provetes de diferentes constituições, constata-se que nos provetes V2 e V3 os valores obtidos são semelhantes, existindo apenas um aumento do módulo de elasticidade de tração de 1,79% nos provetes de V3 comparativamente com os provetes de V2.

Assinala-se novamente, o facto de os provetes de V1 atingirem extensões últimas superiores às que foram medidas nos restantes provetes. Esta observação é válida em ambas as direções.

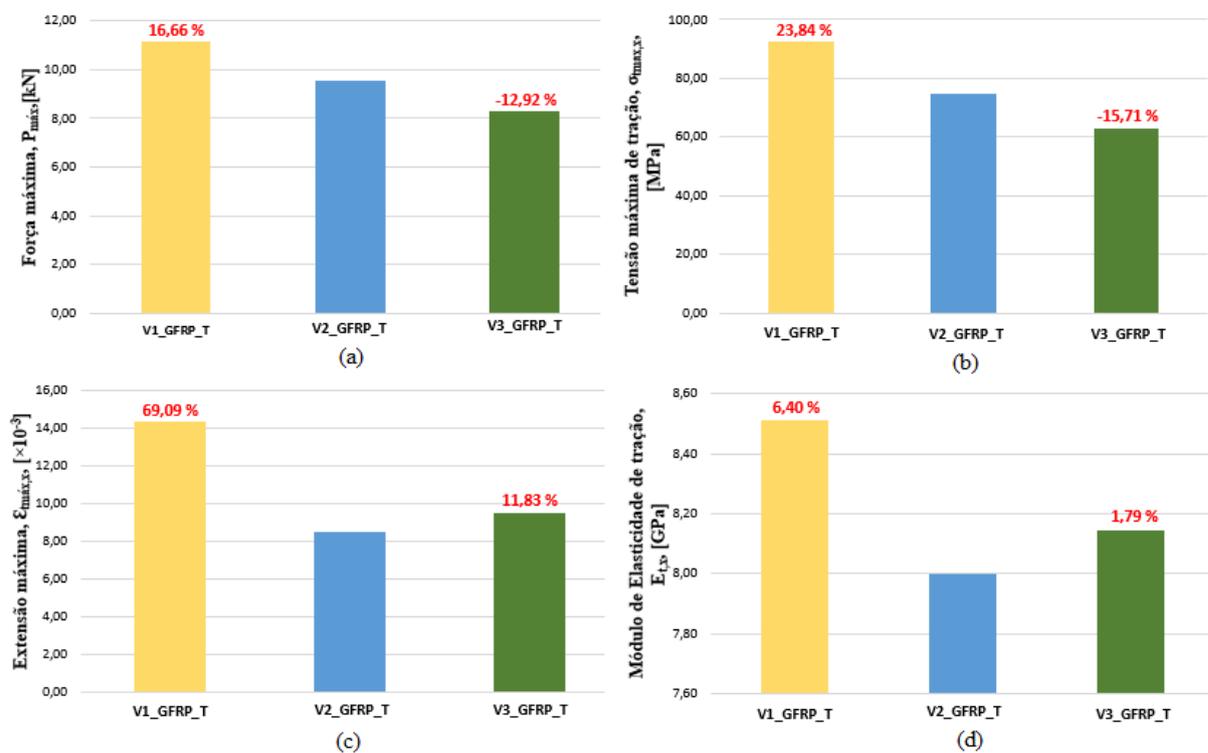


Figura 4.30 – Comparação dos vários parâmetros obtidos entre provetes de diferentes constituições (V1, V2 e V3), na direção transversal: (a) a força máxima atingida; (b) a tensão de tração máxima; (c) a extensão máxima e (d) o módulo de elasticidade. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete V2.

No que diz respeito à rotura dos provetes nos ensaios de tração direta, após uma análise mais cuidada dos mesmos, constatou-se que os valores obtidos entre cada tipo de provete e mesmo em provetes iguais os valores apresentam algumas diferenças. Nas Figura 4.29 e Figura 4.30 apresentou-se a comparação entre laminados de GFRP de diferentes constituições, sendo esta

realizada tendo em conta apenas o desempenho estrutural, pois os laminados apresentam diversas diferenças entre si.

Tendo em conta apenas a configuração dos provetes, estes possuem duas direções ortogonais de *combimat*, pelo que é possível mobilização de forças numa outra direção que não a de pultrusão. Embora apenas se conheça a configuração aproximada do provete, isto é, não se conhecem as propriedades intrínsecas a cada uma das camadas dos provetes, estima-se que as diferenças nos valores obtidos e, portanto, no desempenho estrutural dos provetes se devem sobretudo ao nº fios de *roving* e ao processo de produção, nomeadamente no controlo de qualidade, humidade e qualidade do material usado.

Os resultados obtidos encontram-se de acordo com o expectável, uma vez que a direção de pultrusão é a principal direção de reforço.

O próximo passo consiste em comparar os provetes produzidos com material de igual constituição, mas com orientações distintas (direção longitudinal e direção transversal).

Analisando os resultados obtidos para a força máxima, Figura 4.31, verifica-se que os valores diferem bastante da direção longitudinal para a direção transversal, sendo maiores na direção longitudinal, conforme previsto, andando na ordem dos 70%, para a força máxima.

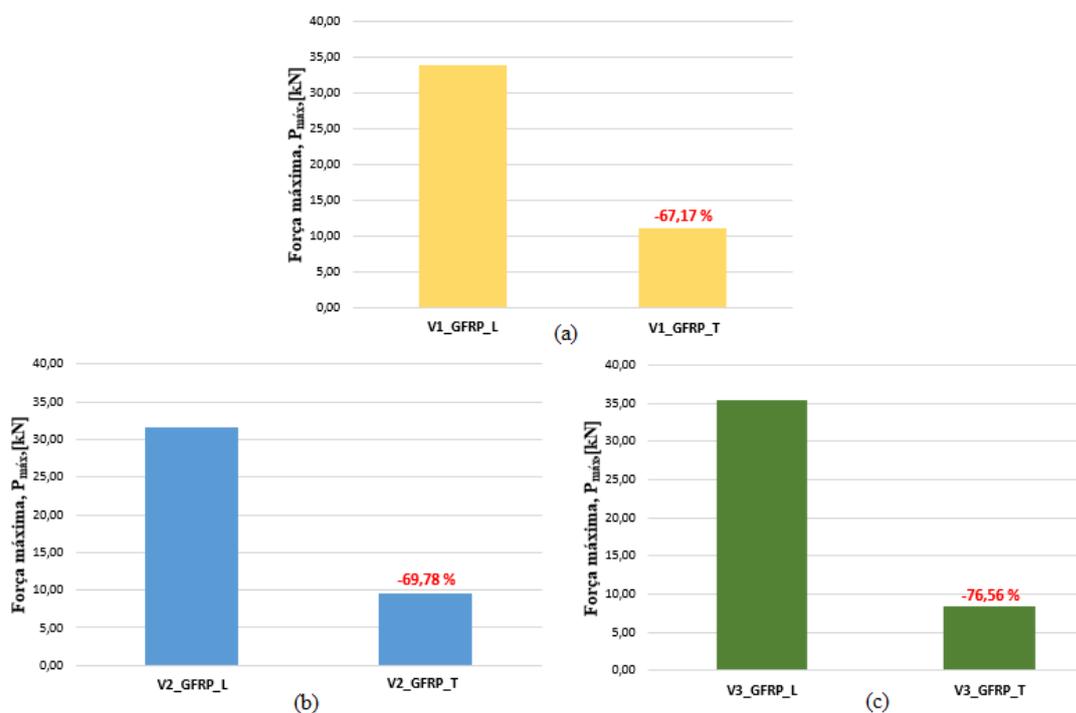


Figura 4.31 – Comparação das forças máximas obtidas entre provetes de diferentes tipos e direções, onde a parte esquerda dos gráficos representa a direção longitudinal e a parte direita a direção transversal: (a) provete V1; (b) provete V2 e (c) provete V3. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda.

Partindo da análise da Figura 4.32, a maior tensão máxima de tração observada é obtida nos provetes de V1\_GFRP\_L, tendo estes, menor espessura dos laminados de GFRP (4mm). Em termos de tensão máxima de tração, a tendência e gama de resultados é igual à que foi observada para a força máxima.

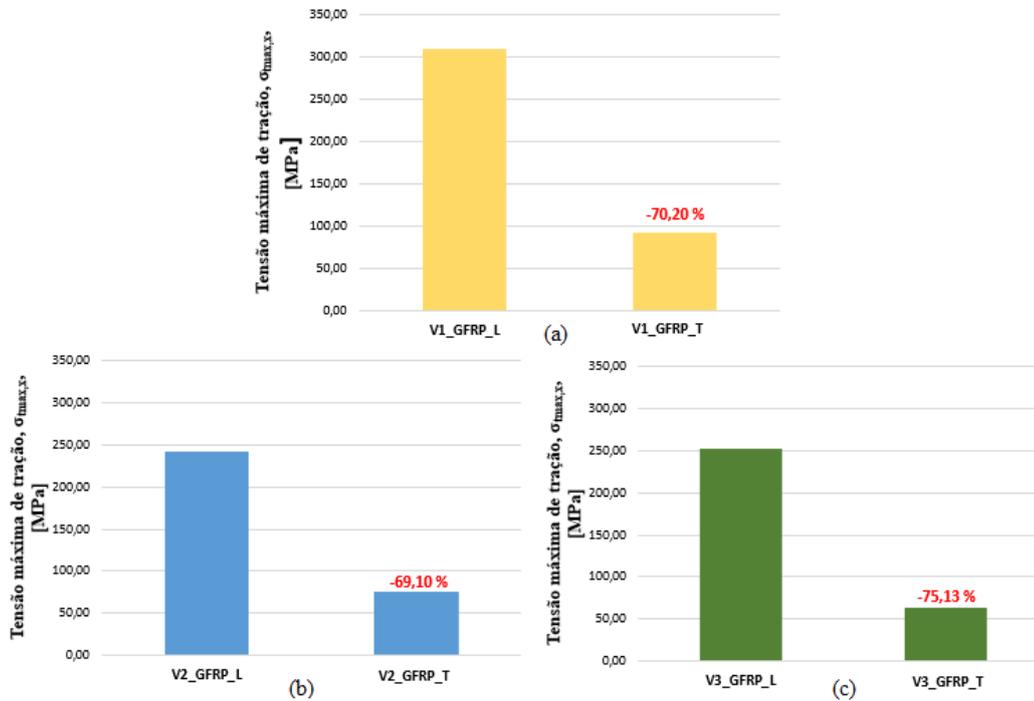


Figura 4.32 – Comparação das tensões de tração máximas obtidas entre provetes de diferentes tipos e direções, onde a parte esquerda dos gráficos representa a direção longitudinal e a parte direita a direção transversal: (a) provete V1; (b) provete V2 e (c) provete V3. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda.

A Figura 4.33 compara os valores de extensão máximos obtidos nos ensaios de tração direta, sendo a maior destas, obtida nos provetes de V1\_GFRP\_L. É de salientar que as diferenças entre os resultados das direções longitudinal e transversal são bastante reduzidas, por exemplo, no caso dos provetes de V2 a diferença foi de apenas 0,63%, sendo as extensões máximas menores na direção transversal (V2\_GFRP\_T).

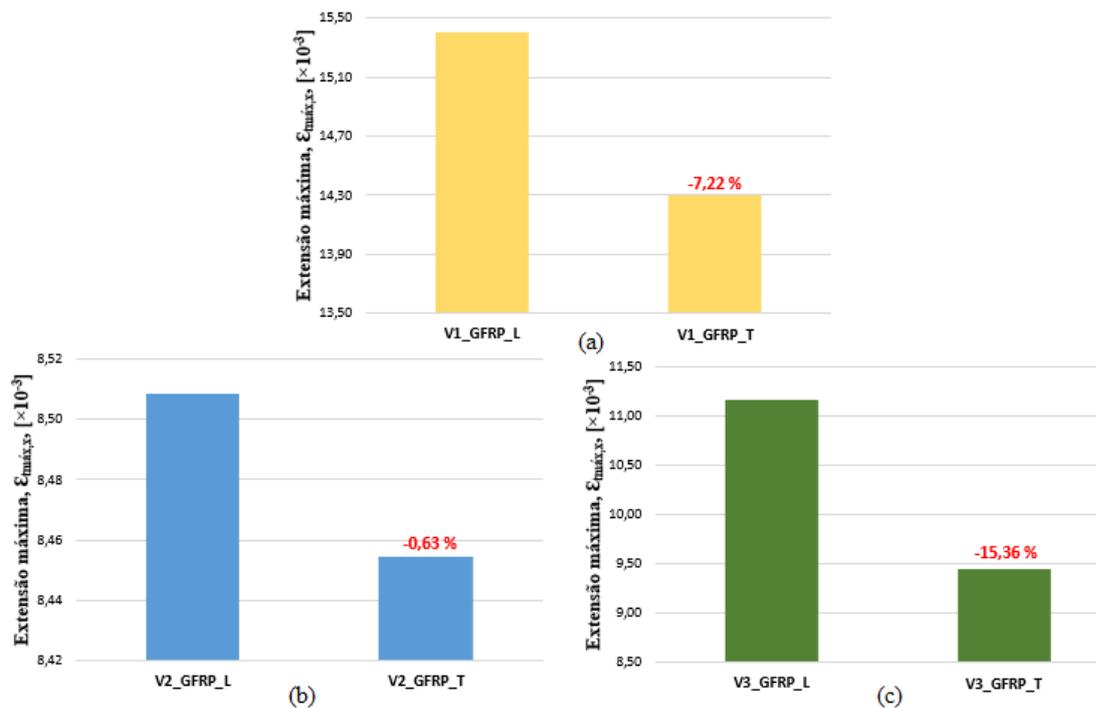


Figura 4.33 – Comparação das extensões máximas obtidas entre provetes de diferentes tipos e direções, onde a parte esquerda dos gráficos representa a direção longitudinal e a parte direita a direção transversal: (a) provete V1; (b) provete V2 e (c) provete V3. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda.

Por fim, analisando a Figura 4.34 que apresenta os diferentes módulos de elasticidade de tração, constata-se que o maior módulo de elasticidade de tração foi obtido pelos provetes V2\_GFRP\_L. As diferenças observadas entre as duas direções são significativas. Os valores superiores foram obtidos na direção longitudinal e variaram entre os 56,30% e 70,22%.

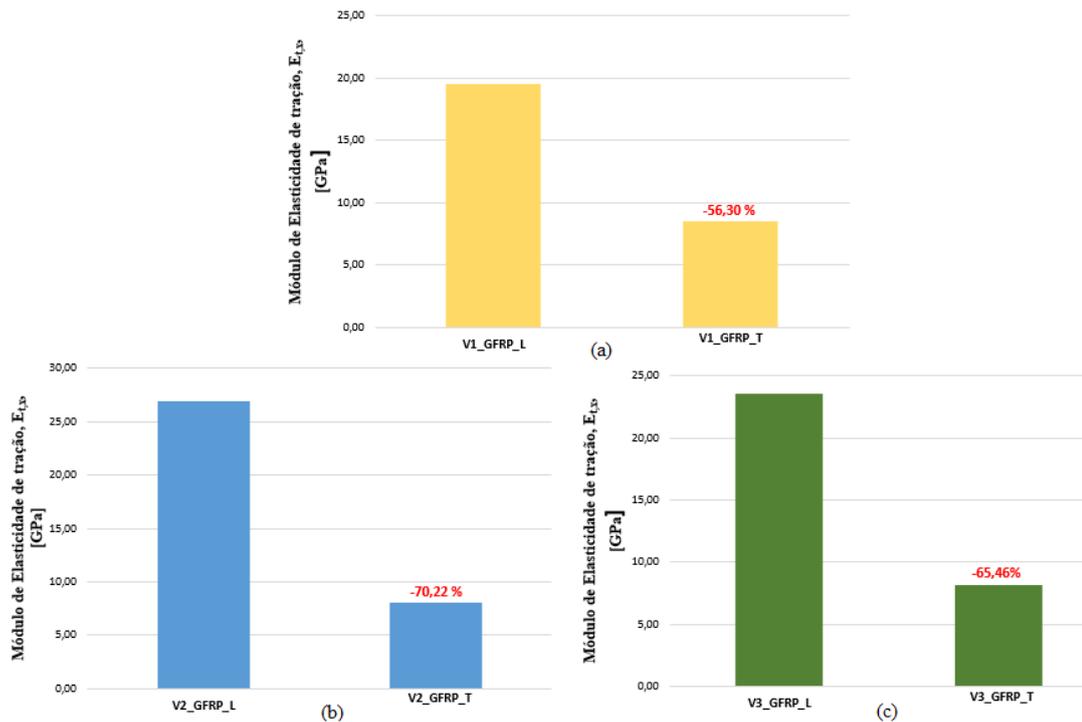


Figura 4.34 – Comparação dos módulos de elasticidade obtidos entre provetes de diferentes tipos e direções, onde a parte esquerda dos gráficos representa a direção longitudinal e a parte direita a direção transversal: (a) provete V1; (b) provete V2 e (c) provete V3. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda.

### 4.3.3 Análise comparativa

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 constituição é igual. Assim sendo, são realizadas comparações em termos de tensão máxima (Figura 4.35), extensão máxima (Figura 4.36) e módulo de elasticidade (Figura 4.37).

Na Figura 4.35, constata-se que em todos os provetes, os valores da tensão de tração máxima obtidos a partir dos ensaios de flexão são superiores aos correspondentes valores obtidos a partir de ensaios de tração direta.

Os valores de resistência obtidos estão dentro do intervalo típico de laminados de FRP (Bank *et al.*, 2006). Como esperado, os valores de resistência no sentido longitudinal foram significativamente mais elevados do que aqueles na direção transversal, devido ao maior reforço de fibra ao longo dessa direção.

No trabalho realizado, quando comparados os ensaios de flexão e tração direta, tendo em conta a tensão máxima, obteve-se valores superiores entre os 22,35% e os 40,41% para ensaios de flexão.

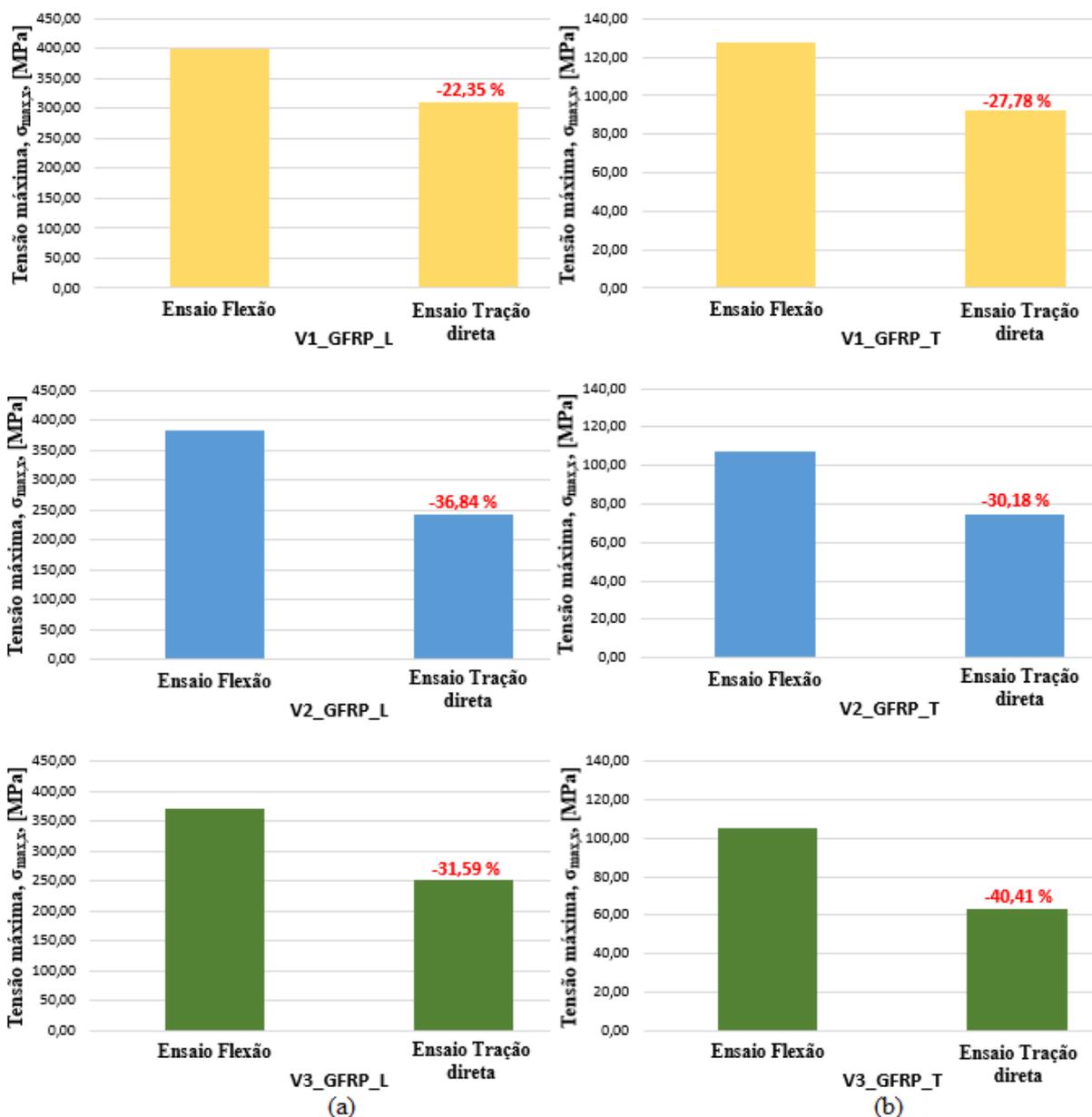


Figura 4.35 – Comparação das tensões máximas obtidas a partir dos ensaios de flexão e tração direta: (a) direção longitudinal e (b) direção transversal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda.

A Figura 4.36 apresenta as extensões máximas obtidas nos vários provetes testados. Verifica-se para os provetes de V1, V2 e V3 que as propriedades obtidas a partir dos ensaios de flexão resultam numa extensão máxima superior, entre os 5,01% e 32,22%, quando comparada com os resultados obtidos a partir de ensaios de tração direta.

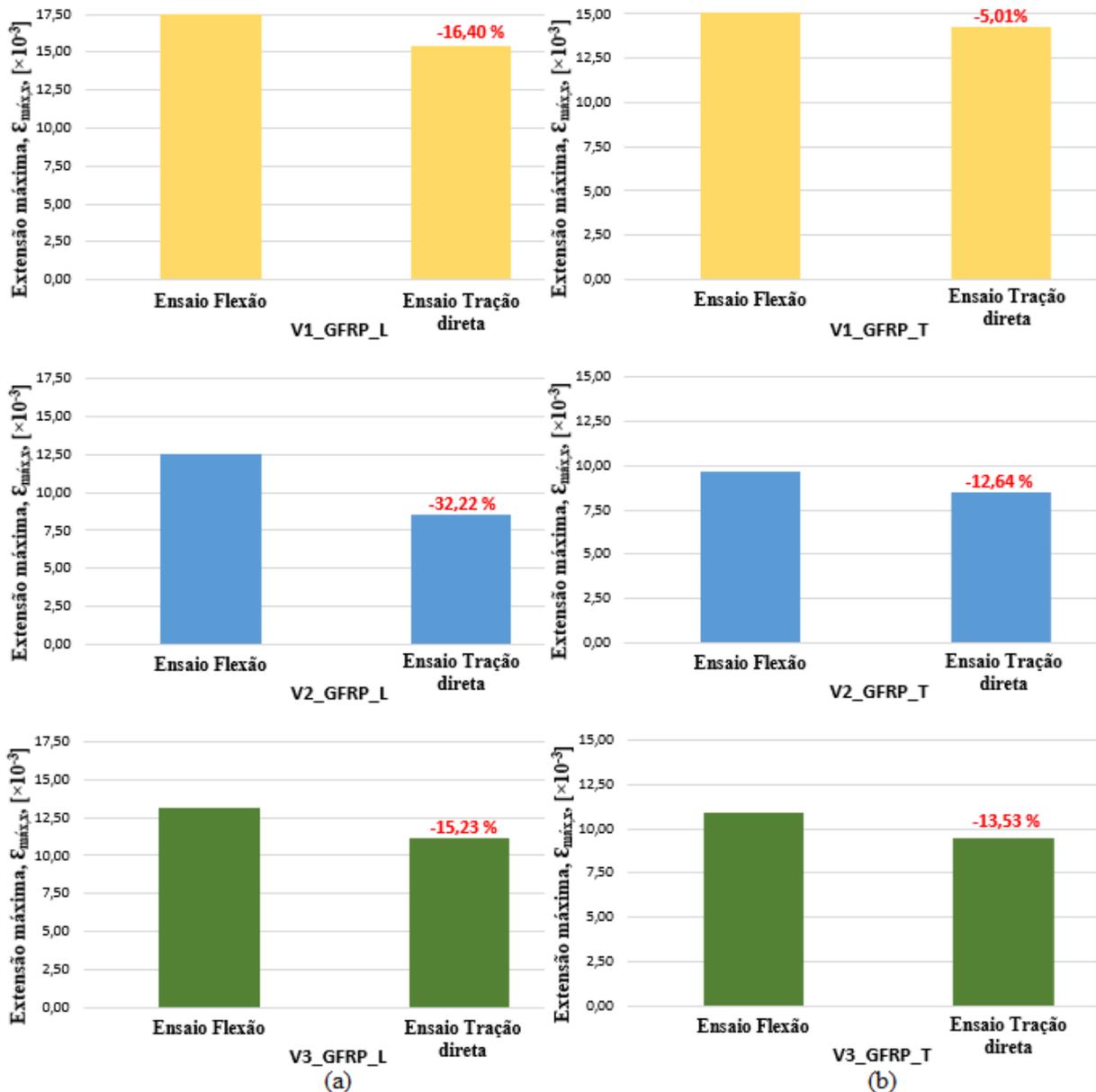


Figura 4.36 – Comparação das extensões máximas obtidas a partir dos ensaios de flexão e tração direta: (a) direção longitudinal e (b) direção transversal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda.

Terminando com a análise da Figura 4.37, constata-se para todos os provetes que os valores de módulo de elasticidade obtidos a partir dos ensaios de flexão são sempre superiores aos correspondentes resultados obtidos a partir de ensaios de tração direta. Para provetes de GFRP, ensaiados na direção longitudinal a diferença entre os ensaios de flexão e tração direta rondou os 13,04% e os 18,35%. No caso, dos provetes ensaiados na direção transversal os valores obtidos foram superiores para os ensaios de flexão entre os 28,01% e 37,61%.

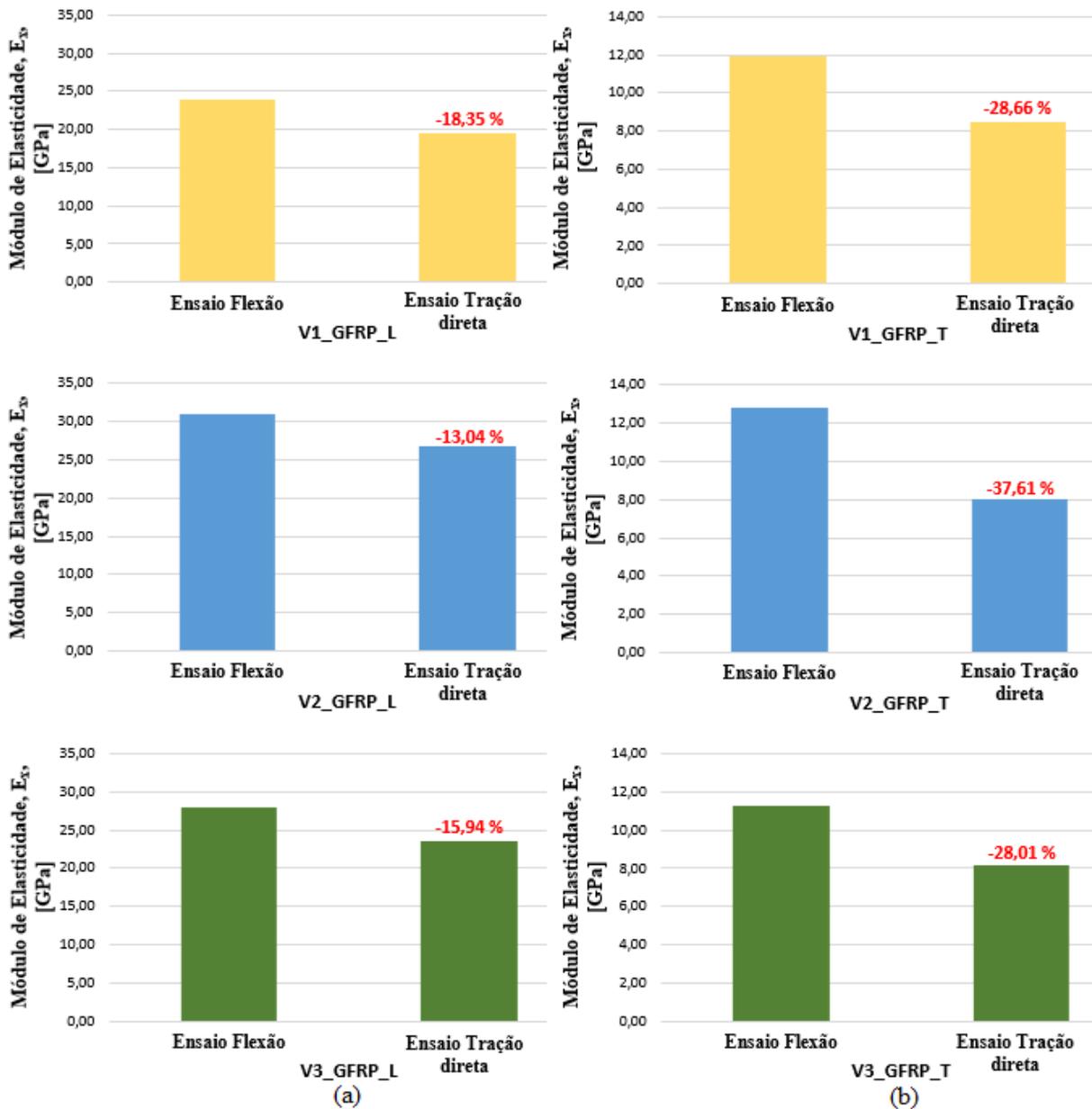


Figura 4.37 – Comparação dos módulos de elasticidade obtidos a partir dos ensaios de flexão e tração direta: (a) direção longitudinal e (b) direção transversal. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete que se encontra imediatamente à esquerda.

Em suma, os motivos para os resultados obtidos nos ensaios de tração serem inferiores aos obtidos em ensaios de flexão, pode dever-se ao excesso de pressão nas amarras de fixação da máquina de ensaio de tração fragilizando o laminado nessas zonas. A máquina de ensaio de tração direta poderia possuir uma excentricidade que também introduziu flexão no laminado de GFRP, além de tração.

## 4.4 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados e analisados os resultados obtidos num conjunto de ensaios realizados em provetes de laminados em GFRP fabricados propositadamente para este projeto e com o objetivo de virem a ser aplicados no painel sanduíche do projeto de investigação “EasyFloor”. O comportamento mecânico destes materiais foi estudado através de ensaios de flexão e tração direta, a partir de provetes orientados na direção de pultrusão, considerada como direção longitudinal, e na direção perpendicular à direção de pultrusão, aqui considerada como direção transversal.

Os provetes de laminados em GFRP do mesmo tipo ensaiados à flexão, para além de apresentarem o mesmo tipo de resposta e modo de rotura, resultaram em valores médios de força, tensão e extensão máximas similares entre si.

Analisando os provetes orientados na direção longitudinal ao reforço principal, o comportamento experimental de todos os provetes evidenciou um comportamento linear elástico até à rotura, sendo esta uma característica típica deste tipo de material. Além disso, a resposta após pico comprovou a rotura progressiva observada em laboratório. Esse fenómeno deve-se essencialmente ao facto de as fibras que ainda não romperam continuarem em regime elástico. Analisando a direção transversal às fibras de reforço principal, o material em estudo na fase inicial do carregamento o comportamento apresentado não é totalmente linear.

Tendo em conta as duas direções estudadas, as respostas dos provetes V1 são similares entre si, no entanto diferem quando comparadas com as respostas dos provetes V2 e V3, sendo que apresentam uma capacidade de carga inferior e uma deformação pré-pico expressivamente superior à dos provetes V2 e V3.

Na direção longitudinal, os resultados apresentados mostraram que os provetes V2 e V3 possuem uma tensão de flexão e uma extensão última ligeiramente inferiores aos dos provetes V1, cerca de 4% para a tensão e 47% para a extensão. Já o módulo de elasticidade é superior, comparativamente com os provetes V1, cerca de 23%. Quando comparados os provetes de V2 e V3, os primeiros apresentam maior tensão de flexão (cerca de 3%) e maior módulo de elasticidade (cerca de 9%), devido à inclusão de trióxido de alumínio nos provetes de V3, enfraquecendo as propriedades mecânicas destes laminados de GFRP.

Na direção transversal, os resultados apresentados mostraram que os provetes de V1 possuem uma tensão de flexão cerca de 20% superior quando comparada com os provetes de V2 e V3.

Tendo em conta a extensão última esta é superior nos provetes de V1 cerca de 56% comparativamente com os provetes de V2. Já o módulo de elasticidade é superior cerca de 7% nos provetes de V2, quando comparado com os provetes de V1.

Tendo em conta os modos de rotura dos laminados em GFRP (V1, V2 e V3) estes romperam por tração em flexão por rotura das fibras inferiores, tanto na direção longitudinal, como na direção transversal. Estas foram rompendo progressivamente à medida que o deslocamento imposto a meio vão ia aumentando. Observou-se também a interdelaminação entre camadas horizontais (plano perpendicular à direção de carregamento) na região tracionada dos provetes e na zona central do vão.

Nos ensaios de tração direta, direção longitudinal, os provetes ensaiados apresentam um comportamento linear elástico até à rotura, sendo esta uma rotura frágil, uma vez que é uma característica típica deste material. Na direção transversal, os provetes ensaiados apresentaram um comportamento elástico não linear até à rotura. A não linearidade pode estar relacionada com o facto de o provete estar solicitado na direção perpendicular à das fibras de reforço principal. O facto de a matriz estar mais solicitada contribui para este tipo de resposta. Outro fator que contribui para estas respostas é o facto de as mantas dos laminados de GFRP em toda a sua espessura na direção transversal, apresentam irregularidades, i.e., a manta não se situa na mesma posição ao longo do desenvolvimento do provete.

Analisando a direção longitudinal e confrontando os resultados dos provetes de diferentes constituições, constatou-se que nos provetes V2 e V3 os valores obtidos são semelhantes, existindo apenas um aumento do módulo de elasticidade de tração em cerca de 12% nos provetes de V2 comparativamente com os provetes de V3. Os provetes de V1 atingiram extensões máximas superiores às que foram medidas nos restantes provetes, cerca de 81% comparativamente com os provetes de V2. A relação dos resultados obtidos na direção transversal é semelhante à observada na direção longitudinal.

Os provetes apresentaram um modo de rotura similar entre provetes do mesmo tipo, que é caracterizado pela rotura progressiva dos fios que compõem as diversas camadas de *roving* 9600 de vidro, em vários pontos interiores do provete. Além disso, verificou-se nos provetes de V1 delaminação das camadas das extremidades.

Comparando os resultados médios obtidos nos ensaios de flexão com os obtidos nos ensaios de tração para os provetes cuja constituição é igual. Nas comparações em termos de tensão

máxima, extensão máxima e módulo de elasticidade, constatou-se que os resultados obtidos nos ensaios de flexão foram superiores em todos os provetes relativamente aos ensaios de tração direta.

Em suma, os resultados obtidos nos dois tipos de ensaios, flexão e tração direta, são concordantes e encontram-se em conformidade com a literatura. A partir dos valores de covariância observados ao longo do capítulo constata-se que é necessário melhorar o controlo de qualidade do processo de fabrico do material.



# COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PUR E PIR – Investigação experimental

---

### 5.1 Introdução

O presente capítulo detalha os estudos experimentais desenvolvidos com o objetivo de caracterizar, do ponto de vista mecânico, os materiais selecionados para incorporar o núcleo do painel sanduíche proposto. Os materiais escolhidos são a espuma rígida de poliuretano (PUR) e o poliisocianurato (PIR).

O núcleo de um painel sanduíche tem como principal função estabilizar ambas as faces e assegurar a resistência ao corte, quando não existem nervuras. Dado que um dos modos de rotura mais frequentes está relacionado com a resistência ao corte do núcleo é, portanto, fundamental caracterizar o comportamento do material quando sujeito a esforços de 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 é realizado o estudo experimental de caracterização dos materiais poliuretano (PUR) e poliisocianurato (PIR). Este inclui ensaios de caracterização à compressão e corte. Com os ensaios de compressão pretendeu-se determinar a resistência e módulo de elasticidade em compressão. Os ensaios de corte pretenderam, entre outras coisas, determinar a resistência ao corte, e correspondente distorção, bem como o módulo de distorção.

De modo a caracterizar o comportamento à compressão do PUR e PIR selecionados, foi realizado um programa experimental constituído por 10 ensaios de compressão, recorrendo a 5 provetes de PUR e restantes provetes em PIR. Posteriormente foram realizados ensaios ao corte em 5 provetes de PUR e 6 provetes de PIR, de modo a caracterizar o seu comportamento mecânico quando sujeitos a este tipo de esforços. A geometria dos provetes, a configuração de ensaio bem como toda a sua instrumentação, serão detalhadamente apresentados nos diferentes subcapítulos.

O programa de ensaios foi realizado no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST-UM). Os provetes foram produzidos e fornecidos pela empresa ALTO Perfis Pultrudidos, Lda.

## **5.2 Investigação experimental**

### **5.2.1 Materiais intervenientes**

Os ensaios de compressão e corte foram realizados em provetes de poliuretano (PUR) e poliisocianurato (PIR) fabricados propositadamente para este projeto, sendo estes caracterizados por núcleos homogêneos, em que as características mecânicas são iguais em ambas as direções. A densidade selecionada para ambos os materiais foi de  $40 \text{ kg/m}^3$ .

### **5.2.2 Programa de ensaios**

#### **5.2.2.1 Ensaios de Compressão**

Os ensaios de compressão realizaram-se de acordo com as recomendações indicadas na norma ASTM C 365/C 365M – 05 “*Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sanduiche Cores*”, (ASTM, 2005). O 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 o deslocamento axial entre pratos de carga e a altura inicial do provete. A norma ASTM C 365/C 365M – 05 ressalva as interferências e a possível dispersão de resultados devido à existência de imperfeições do provete como os vazios, a rugosidade e outras descontinuidades. As condições de armazenamento em que os provetes se encontram e em que o ensaio é efetuado, podem afetar os resultados e os modos de rotura, sendo então 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 provete, o ensaio deve ser considerado inválido.

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 mm<sup>2</sup>. No entanto, no caso de materiais do núcleo contínuos como as espumas, a área mínima das faces deve ser de 625 mm<sup>2</sup>.

No presente trabalho, foram ensaiados 10 provetes cúbicos com 60 mm de aresta, sendo 5 provetes de PUR e os restantes de PIR.

A designação genérica adotada para os provetes de espuma rígida de poliuretano (PUR) é PUR40\_CT\_NN, em que PUR40 refere-se a material seguido da respetiva densidade, CT diz respeito ao tipo de ensaio (*'compression test'*) e NN representa o número de ordem do ensaio. Seguindo o mesmo método a designação genérica adotada para os provetes de espuma rígida de poliisocianurato (PIR) é PIR40\_CT\_NN, em que PIR40 refere-se a material seguido da respetiva densidade, CT diz respeito ao tipo de ensaio (*'compression test'*) e NN representa o número de ordem do ensaio.

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.

A Tabela 5.1 apresenta a caracterização geométrica dos provetes de PUR. Calculou-se a densidade do material e constatou-se que variava entre os 38,4 kg/m<sup>3</sup> e os 40,1 kg/m<sup>3</sup>, com um valor médio de 39,2 kg/m<sup>3</sup>.

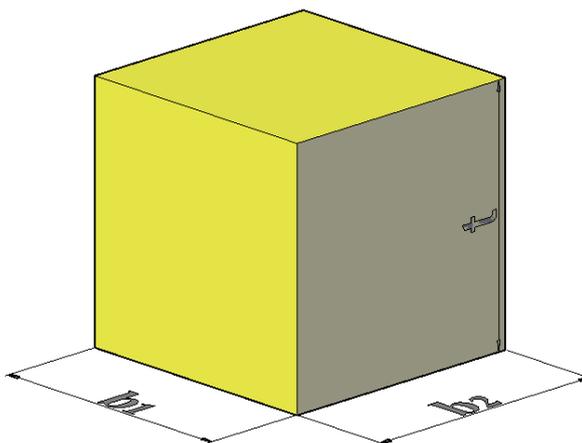


Figura 5.1 – Representação esquemática do provete de PUR/PIR ensaiado à compressão.

Tabela 5.1 – Caracterização geométrica e designação dos provetes de PUR ensaiados à compressão.

<b>Provete</b>	<b>Largura – b<sub>1</sub></b> <b>[mm]</b>	<b>Largura – b<sub>2</sub></b> <b>[mm]</b>	<b>Espessura – t</b> <b>[mm]</b>	<b>Densidade</b> <b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
PUR40_CT_01	57.10	57.18	60.03	38.44
PUR40_CT_02	56.97	59.92	57.22	38.91
PUR40_CT_03	57.07	57.08	56.76	39.31
PUR40_CT_04	56.99	56.93	57.21	40.14
PUR40_CT_05	57.19	56.94	59.99	39.40
<b>Média</b>	<b>57.06</b>	<b>57.61</b>	<b>58.24</b>	<b>39.24</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.08</b>	<b>1.16</b>	<b>1.45</b>	<b>0.57</b>
<b>CoV (%)</b>	<b>0.14%</b>	<b>2.01%</b>	<b>2.50%</b>	<b>1.44%</b>

A Tabela 5.2 apresenta a caracterização geométrica dos provetes de PIR. Calculou-se a densidade do material e constatou-se que variava entre os 38,1 kg/m<sup>3</sup> e os 39,3 kg/m<sup>3</sup>, com um valor médio de 38,7 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 5.2 – Caracterização geométrica e designação dos provetes de PIR ensaiados à compressão.

<b>Provete</b>	<b>Largura -b<sub>1</sub></b> <b>[mm]</b>	<b>Largura – b<sub>2</sub></b> <b>[mm]</b>	<b>Espessura – t</b> <b>[mm]</b>	<b>Densidade</b> <b>[Kg/m<sup>3</sup>]</b>
PIR40_CT_01	57.20	57.20	57.29	39.30
PIR40_CT_02	57.29	59.08	57.65	38.95
PIR40_CT_03	57.35	57.05	58.16	38.89
PIR40_CT_04	57.29	57.35	57.67	38.35
PIR40_CT_05	57.78	57.37	59.71	38.06
<b>Média</b>	<b>57.38</b>	<b>57.61</b>	<b>58.09</b>	<b>38.71</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.20</b>	<b>0.74</b>	<b>0.85</b>	<b>0.44</b>
<b>CoV (%)</b>	<b>0.36%</b>	<b>1.29%</b>	<b>1.47%</b>	<b>1.15%</b>

Posteriormente, colocou-se o provete entre os pratos da máquina de ensaio e deu-se início ao mesmo. Os ensaios de compressão foram realizados sob controlo de deslocamento a uma velocidade de 0.50 mm/min. 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 (modelo modular 600 da RDP GROUP).

A Figura 5.2 e a Figura 5.3 apresentam o sistema de ensaio, uma das amostras de PUR e PIR, respetivamente, durante duas fases de ensaio (inicial e final) e respetivo equipamento utilizado para realização dos ensaios de compressão.

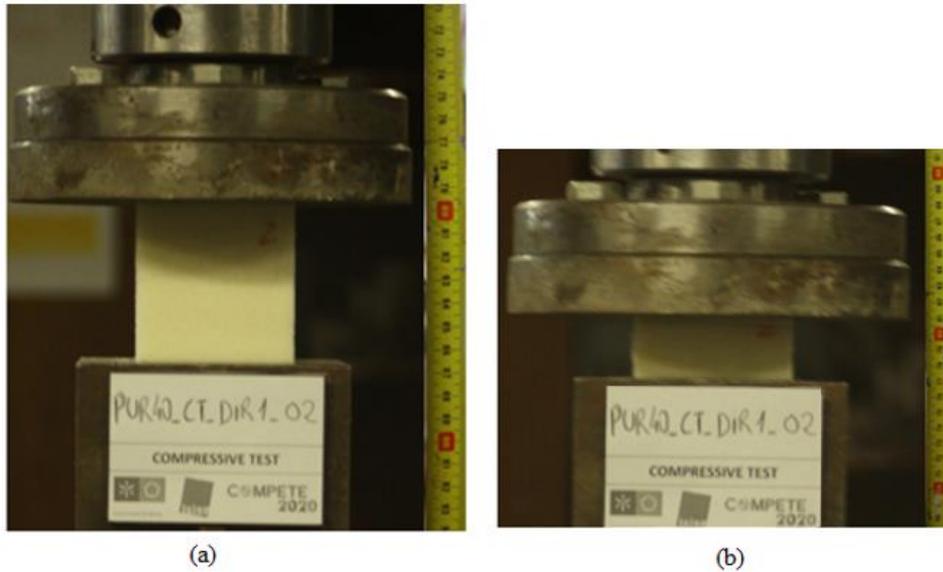


Figura 5.2 – Configuração do ensaio de compressão em PUR: (a) fase pré-inicial do ensaio e (b) fase final do ensaio.



Figura 5.3 – Configuração do ensaio de compressão em PIR: (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:

$$f_z^{ftu} = \frac{P_{max}}{A} \quad (5.1)$$

em que,

$f_z^{ftu}$  – valor da tensão no provete [MPa];

$P_{max}$  – força aplicada [N];

$A$  – área contato da base [mm<sup>2</sup>];

O módulo de elasticidade de compressão pode ser deduzido de acordo com a equação (5.2),

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (5.2)$$

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.

### 5.2.2.2 Ensaio de Corte

No presente trabalho, as características mecânicas do PUR e PIR ao corte foram determinadas a partir de ensaios de corte em placa. Normalmente estes ensaios são executados de acordo com as normas ISO 1922:2001(E) (espumas celulares rígidas) ou ASTM C273-00 “*Standard Test Method for Shear Properties of Sanduiche Core Materials*” (ASTM, 2000).

A norma ISO 1922:2001(E) propõe que o eixo de carregamento se encontre alinhado segundo o eixo longitudinal do provete, conforme apresentado na (Figura 5.4 a)). A norma ASTM C273-00 permite que o ensaio seja realizado aplicando-se uma força de compressão ou de tração. No entanto, também sugere que o eixo de carregamento deve passar pela diagonal do provete (Figura 5.4 b)).

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 de flexão que resulta

da excentricidade da aplicação da carga. A norma refere que 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. Segundo esta, a largura do provete não deve ser inferior a 50 mm e o comprimento (L) deve ser 12 vezes superior à espessura (t).

Segundo a norma ASTM C273-00, 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 provete, neste caso o poliuretano ou poliisocianurato. Medindo o deslocamento relativo entre placas de carga, com um transdutor de deslocamentos ou extensómetro, é possível calcular a resistência ao corte do material e o módulo de corte. Para os respetivos cálculos, a norma supõe que todo o volume do material do núcleo se encontra num estado de tensão de corte uniforme. 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.

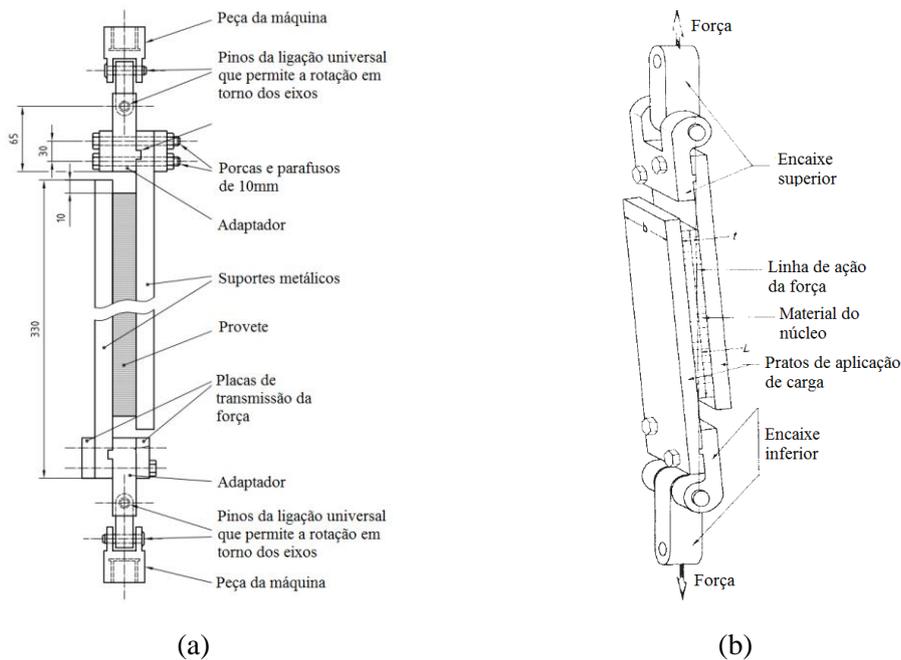


Figura 5.4 – Ensaio de corte propostos pela (a) ISO 1922:2001(E) e (b) ASTM C273-00. Nota: dimensões em [mm].

Em relação à configuração de ensaio adotada, tendo em conta as limitações materiais, laboratoriais e económicas do presente programa experimental, foi considerada a proposta da norma ASTM C273-00 no que diz respeito: (i) ao alinhamento do carregamento e (ii) aos elementos que compõem os pratos de carga em aço. Relativamente às características dos pratos, foi adotada a solução que resultou dos estudos desenvolvidos por Cruz (2017).

A Figura 5.5 detalha o sistema de ensaio de corte utilizado no presente programa experimental.

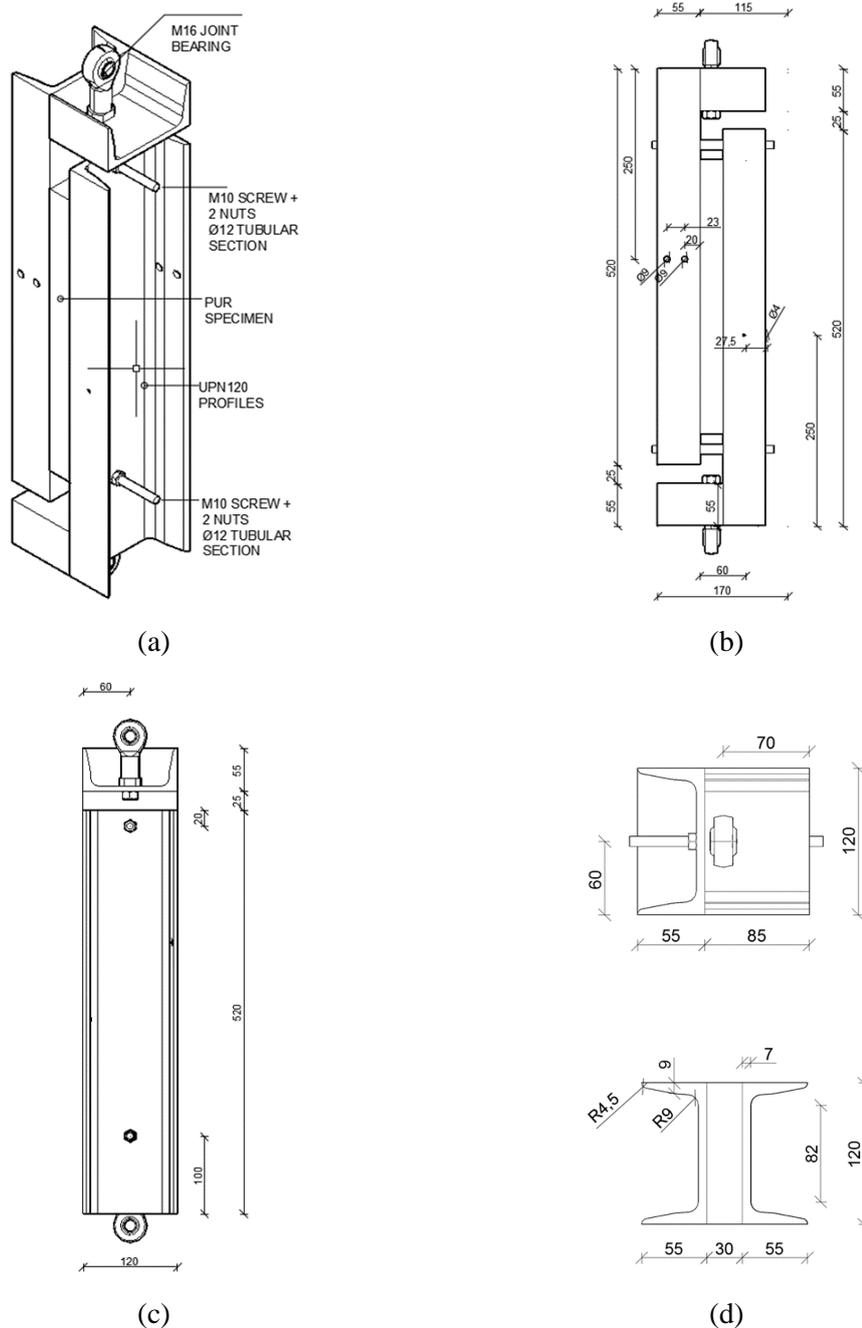


Figura 5.5 – Configuração dos ensaios de corte em placas utilizado: (a) vista 3D; (b) vista frontal; (c) vista lateral e (d) vista em planta. Notas: dimensões em [mm] (Cruz, 2017).

Todos os ensaios foram realizados com 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  $\pm 0.05$  F.S.), existente no LEST-UM. 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.

Na presente campanha experimental, a geometria dos blocos de poliuretano e de poliisocianurato cumpre as recomendações da norma ASTM C273-00. Os blocos têm as dimensões de  $30 \times 360 \times 120$  mm<sup>3</sup>, ou seja,  $L/t=12$ .

Foram ensaiados ao corte 5 provetes de PUR e 6 provetes de PIR. Os provetes permaneceram numa câmara climática a uma temperatura de 18 °C e a uma humidade relativa de 55% até ao dia do ensaio.

A designação genérica adotada para os provetes de espuma rígida de poliuretano (PUR) é PUR40\_ST\_NN, em que PUR40 refere-se a material seguido da respetiva densidade, ST identifica o tipo de ensaio (*'shear test'*) e NN denomina o número de ordem do ensaio.

Seguiu-se o mesmo método de designação genérica adotada para os provetes de espuma rígida de poliisocianurato (PIR), i.e. PIR40\_ST\_NN, em que PIR40 refere-se a material seguido da respetiva densidade, ST identifica o tipo de ensaio (*'shear test'*) e NN denomina o número de ordem do ensaio.

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.

A Tabela 5.3 apresenta a caracterização geométrica dos provetes de PUR. Calculou-se a densidade do material e constatou-se que variava entre os 37,0 kg/m<sup>3</sup> e os 38,3 kg/m<sup>3</sup>.

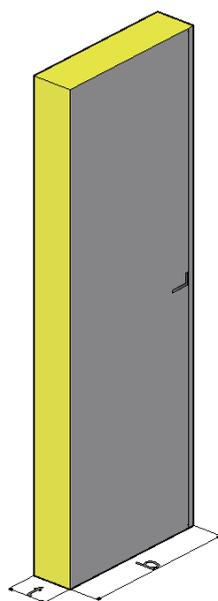


Figura 5.6 – Representação esquemática do provete de PUR/PIR ensaiado ao corte.

Tabela 5.3 – Caracterização geométrica dos provetes de PUR ensaiados ao corte.

<b>Provete</b>	<b>t</b> [mm]	<b>b</b> [mm]	<b>L</b> [mm]	<b>Peso</b> [g]	<b>Densidade</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
PUR40_ST_01	28.65	119.13	360.33	47.10	38.29
PUR40_ST_02	29.42	121.07	358.67	47.87	37.47
PUR40_ST_03	30.41	119.60	359.00	49.53	37.93
PUR40_ST_04	29.52	119.39	361.00	47.93	37.68
PUR40_ST_05	30.13	119.37	358.67	47.73	37.00
<b>Média</b>	<b>29.63</b>	<b>119.71</b>	<b>359.53</b>	<b>48.03</b>	<b>37.67</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.61</b>	<b>0.69</b>	<b>0.96</b>	<b>0.81</b>	<b>0.44</b>
<b>CoV (%)</b>	<b>2.07%</b>	<b>0.58%</b>	<b>0.27%</b>	<b>1.68%</b>	<b>1.16%</b>

A Tabela 5.4 apresenta a caracterização geométrica dos provetes de PIR. Calculou-se a densidade do material e constatou-se que neste caso variava entre os 35,6 kg/m<sup>3</sup> e os 38,8 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 5.4 – Caracterização geométrica dos provetes de PIR ensaiados ao corte.

<b>Provete</b>	<b>t</b> [mm]	<b>b</b> [mm]	<b>L</b> [mm]	<b>Peso</b> [g]	<b>Densidade</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
PIR40_ST_01	29.37	120.94	359.00	49.50	38.81
PIR40_ST_02	29.46	119.55	359.33	47.67	37.67
PIR40_ST_03	29.44	119.69	359.67	48.70	38.43
PIR40_ST_04	30.16	119.38	360.33	46.17	35.58
PIR40_ST_05	28.96	119.33	358.33	47.30	38.19
PIR40_ST_06	29.45	119.33	359.33	46.23	36.62
<b>Média</b>	<b>29.47</b>	<b>119.71</b>	<b>359.33</b>	<b>47.59</b>	<b>37.55</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.35</b>	<b>0.57</b>	<b>0.61</b>	<b>1.21</b>	<b>1.12</b>
<b>CoV (%)</b>	<b>1.19%</b>	<b>0.47%</b>	<b>0.17%</b>	<b>2.55%</b>	<b>2.98%</b>

Os resultados da caracterização geométrica servem 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.

Após a caracterização geométrica dos provetes, estes foram colados aos pratos metálicos de aplicação de carga com um adesivo concebido para aplicação em painéis sanduíche, designadamente o adesivo SikaForce® 7710 L100 produzido e fornecido pela empresa Sika (Figura 5.7).



Figura 5.7 – Adesivo selecionado para colagem dos provetes de PUR/PIR para ensaios de corte:

(a) componente A e (b) componente B.

Para a colagem dos provetes aos perfis metálicos, foram seguidos os seguintes passos:

- i. Preparou-se o adesivo de acordo com a ficha técnica do produto (ANEXO IV) (Figura 5.8 a), b) e c));
- ii. Limpavam-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 5.8 d) e e));
- iii. Aplicou-se o adesivo em ambas as faces de cada um dos perfis metálicos UPN120 e nas faces do provete (Figura 5.8 f) e g));
- iv. Colou-se uma face de PUR/PIR 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/PIR. À medida que se ajustava o provete e na fase de apertar o perfil metálico, o adesivo em excesso que emanava da colagem ia sendo retirado com uma espátula (Figura 5.8 h) e i));
- v. Terminado este 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 referidas. 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 a cura aproximadamente 4 horas após a aplicação do adesivo.

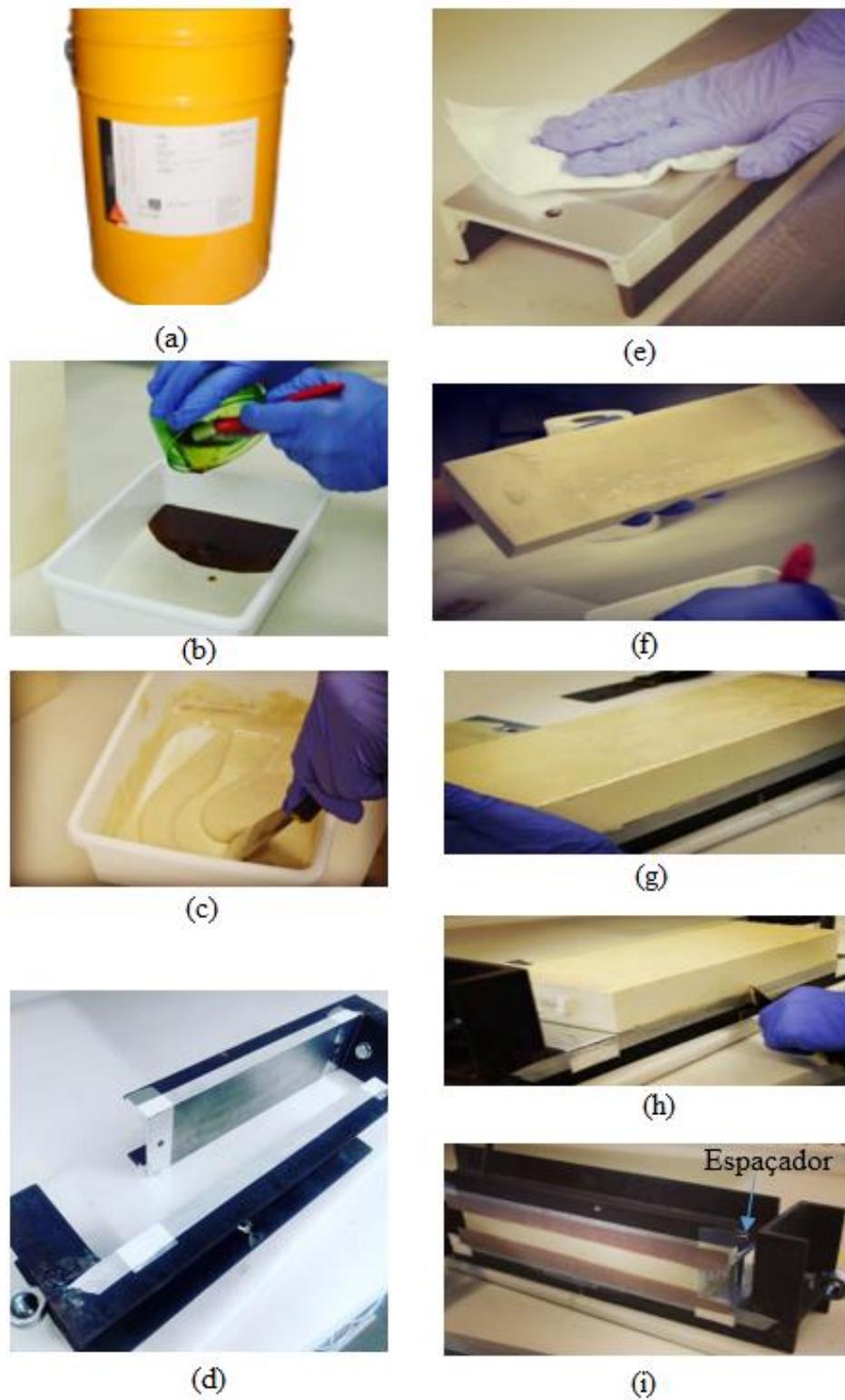


Figura 5.8 – Etapas de preparação para os ensaios de corte dos provetes de PUR e PIR. (Adaptado de Cruz, 2017).

Após o tempo de cura, o provete foi instalado na prensa universal, tendo-se colocado a instrumentação e os acessórios necessários para o ensaio de corte. A Figura 5.9 apresenta a configuração e a instrumentação típica utilizada nos ensaios da presente campanha experimental.

Para medir o deslocamento relativo entre os “pratos de carga”, foram instalados dois transdutores de deslocamentos indutivos (LVDT *linear variable differential transducer*, na literatura inglesa), com uma amplitude de  $\pm 25$  mm (coeficiente de linearidade de  $\pm 0.24\%$  F.S.), na zona central. No sentido de medir todos os deslocamentos, fixaram-se batentes metálicos no perfil oposto aquele onde os LVDT's se instalaram. Por fim, retiraram-se os espaçadores e procedeu-se ao ensaio até à rotura do provete.

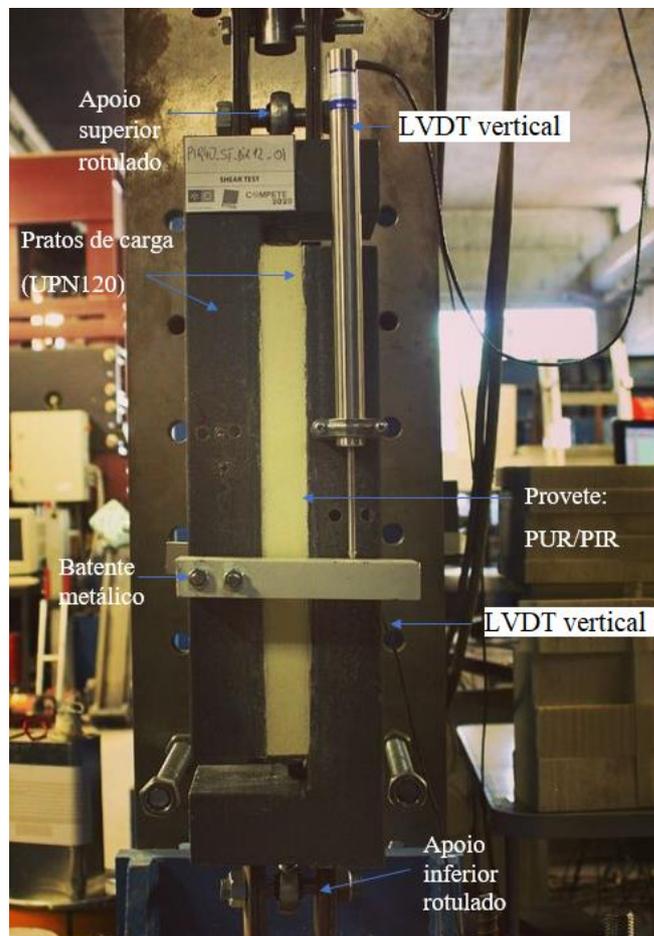


Figura 5.9 – Configuração do ensaio de corte em PUR/PIR.

De acordo com a norma ASTM C273-00 é possível calcular a tensão de corte ( $\tau$ ) e o módulo de corte ( $G$ ) através das expressões (5.3) (5.4), respetivamente,

$$\tau = \frac{P}{Lb} \quad (5.3)$$

onde,

$\tau$  = tensão de corte do núcleo [MPa];

$P$  = carga aplicada [N];

$L$  = comprimento do provete [mm];

$b$  = largura do provete [mm].

$$G = \frac{S \times t}{L \times b} \quad (5.4)$$

onde,

$G$  = módulo de corte do núcleo [MPa];

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

$\Delta u$  = variação do deslocamento vertical [mm];

$\Delta P$  = variação da força para  $\Delta u$  [mm];

$t$  = espessura do provete [mm].

## 5.3 Resultados e análise

### 5.3.1 Ensaio de Compressão

A Figura 5.10 e a Figura 5.11 apresentam os resultados dos ensaios de compressão realizados nos provetes de PUR e PIR, respetivamente, em termos da relação tensão *versus* extensão.

De um modo geral, as respostas obtidas nos ensaios de compressão são semelhantes entre si. Embora não seja completamente 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, 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 aproximadamente constante. A parte final da resposta caracteriza-se pelo crescimento exponencial da tensão, no entanto, este é mais evidenciado nos provetes de PUR comparativamente com os provetes de PIR.

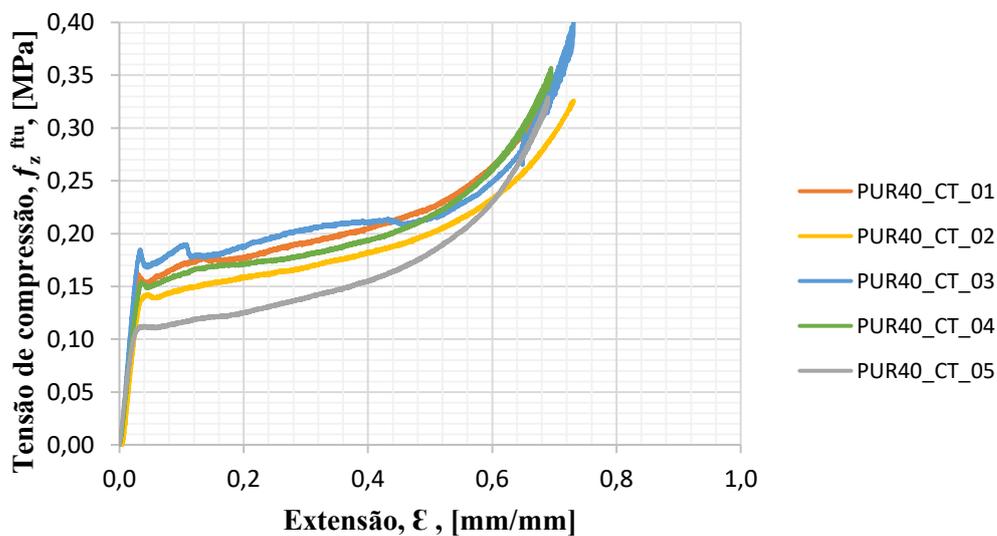


Figura 5.10 – Relação tensão de compressão *versus* extensão axial dos provetes de PUR ensaiados à compressão.

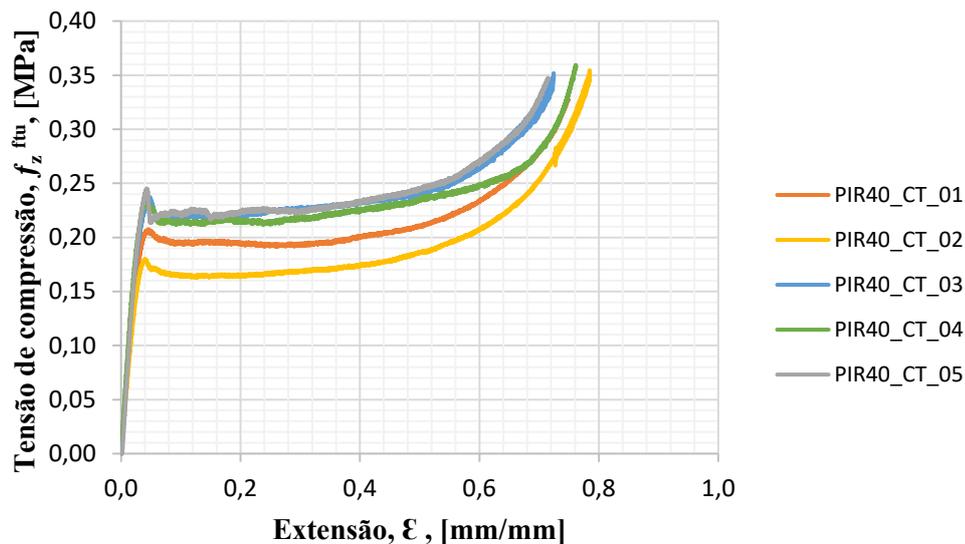


Figura 5.11 – Relação tensão de compressão versus extensão axial dos provetes de PIR ensaiados à compressão.

A Tabela 5.5 e a Tabela 5.6 apresentam os valores relativos à força máxima ( $P_{\max}$ ), à tensão máxima ( $f_{z,\max}^{ftu}$ ), à extensão correspondente à tensão máxima ( $\epsilon_{f\max}$ ), e ao módulo de elasticidade de compressão ( $E$ ) obtidos nos provetes de PUR e PIR, respetivamente. Estes parâmetros foram calculados de acordo com as equações (5.1) e (5.2). 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 da resposta não ser linear nesse troço.

Na Tabela 5.5 observa-se que a extensão máxima varia entre os 3% e os 4% e a tensão de compressão varia entre os 0,11 MPa e os 0,18 MPa. Os provetes apresentam uma tensão de cedência média de  $0,15 \pm 0,02$  MPa e um módulo de elasticidade em compressão médio igual a  $5,07 \pm 1,17$  MPa.

Tabela 5.5 – Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compressão em PUR.

<b>Provete</b>	<b>P<sub>max</sub></b> [kN]	<b>f<sub>z,max</sub><sup>ftu</sup></b> [MPa]	<b>ε<sub>max</sub></b> [mm/mm]	<b>E</b> [MPa]
PUR_CT_01	0.53	0.16	0.03	6.32
PUR_CT_02	0.48	0.14	0.04	5.15
PUR_CT_03	0.60	0.18	0.03	6.03
PUR_CT_04	0.50	0.15	0.04	4.83
PUR_CT_05	0.37	0.11	0.04	3.01
<b>Média</b>	<b>0.50</b>	<b>0.15</b>	<b>0.04</b>	<b>5.07</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.08</b>	<b>0.02</b>	<b>0.00</b>	<b>1.17</b>
<b>CoV (%)</b>	<b>15.35%</b>	<b>15.71%</b>	<b>10.67%</b>	<b>23.01%</b>

Na Tabela 5.6 observa-se que a extensão máxima obtida em todos os provetes é de 4% e a tensão de compressão varia entre os 0,18 MPa e os 0,24 MPa. Os provetes apresentam uma tensão de cedência média de 0,22±0,02 MPa e um módulo de elasticidade em compressão médio igual a 5,81±0,67 MPa.

Tabela 5.6 – Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compressão em PIR.

<b>Provete</b>	<b>P<sub>max</sub></b> [kN]	<b>F<sub>z,max</sub><sup>ftu</sup></b> [MPa]	<b>ε<sub>max</sub></b> [mm/mm]	<b>E</b> [MPa]
PIR_CT_01	0.68	0.21	0.04	5.21
PIR_CT_02	0.61	0.18	0.04	4.98
PIR_CT_03	0.76	0.23	0.04	5.85
PIR_CT_04	0.77	0.23	0.04	6.18
PIR_CT_05	0.81	0.24	0.04	6.83
<b>Média</b>	<b>0.73</b>	<b>0.22</b>	<b>0.04</b>	<b>5.81</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.07</b>	<b>0.02</b>	<b>0.00</b>	<b>0.67</b>
<b>CoV (%)</b>	<b>10.01%</b>	<b>10.67%</b>	<b>2.90%</b>	<b>11.53%</b>

Analisando os resultados (respostas experimentais e valores médios) verifica-se uma dispersão de resultados significativa, o que se deve à heterogeneidade dos provetes ensaiados.

Os valores obtidos nos diferentes provetes de PUR e PIR enquadram-se no reportado pela literatura.

Nos ensaios de compressão do PUR e PIR, os modos de rotura observados foram considerados válidos de acordo com a norma de ensaio utilizada. No ANEXO V apresentam-se todos os provetes ensaiados à compressão com os correspondentes modos de rotura.

A Figura 5.12 apresenta os modos de rotura típicos dos provetes ensaiados à compressão.



Figura 5.12 – Modos de rotura dos provetes ensaiados à compressão: (a) provete tipo PUR (PUR40\_CT\_02) e (b) provete tipo PIR (PIR40\_CT\_02).

### 5.3.2 Ensaio de Corte

Neste subcapítulo são apresentados os resultados dos ensaios de corte realizados em provetes de PUR e de PIR. De um modo geral, as respostas obtidas nos ensaios de corte com PUR e com PIR são semelhantes.

Nas Figura 5.13 e Figura 5.14 encontram-se as curvas que relacionam a tensão de corte e a correspondente distorção de todos os provetes ensaiados de PUR e PIR, respetivamente.

Em termos de resposta, observa-se inicialmente um comportamento aproximadamente linear elástico, seguido de um comportamento não linear até à rotura.

Os provetes de PUR, Figura 5.13 apresentam um comportamento similar entre si, denotando-se uma maior proximidade no ramo linear elástico até uma distorção próxima dos 0.02. Contudo, observa-se que o provete PUR40\_ST\_03 apresenta um comportamento diferente dos restantes, o que fica a dever-se ao facto deste provete apresentar uma rotura na interface adesivo/PUR, com destacamento do provete em relação aos pratos antes de se atingir a sua resistência máxima.

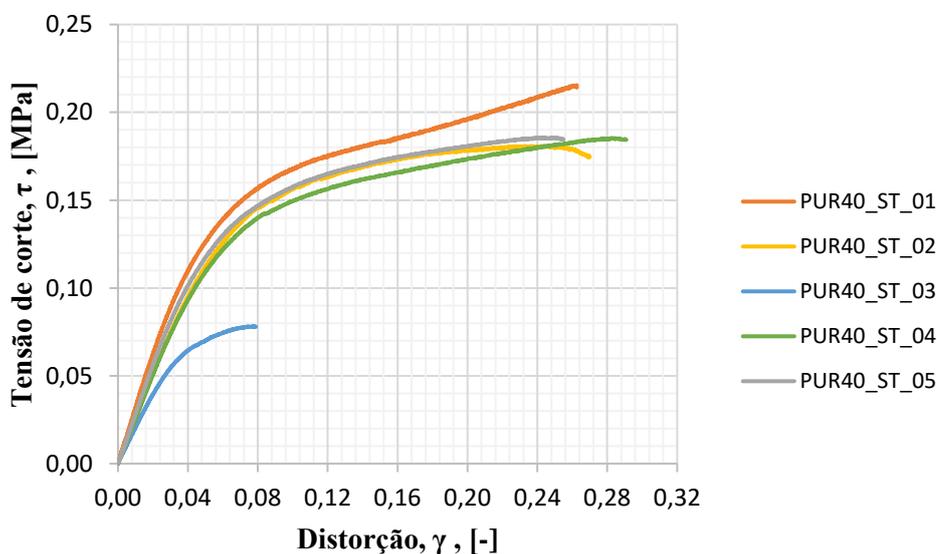


Figura 5.13 – Curvas da relação entre a tensão de corte e a distorção para os provetes de PUR.

Os provetes de PIR, Figura 5.14, apresentam um comportamento bastante similar, denotando-se uma maior proximidade das respostas no ramo linear elástico até ao início da zona marcadamente não linear, próxima dos 0.04. Contudo, observa-se que os provetes

PIR40\_ST\_02 e PIR40\_ST\_05 apresentam um comportamento diferente dos restantes, sendo a resposta obtida em termos de distorção-tensão de corte idêntica aos restantes, no entanto apresentam uma queda brusca da tensão de corte, enquanto nos restantes não se visualiza essa queda. Este comportamento deve-se ao facto de a rotura ocorrer na interface adesivo/PIR, com destacamento progressivo do provete em relação aos pratos.

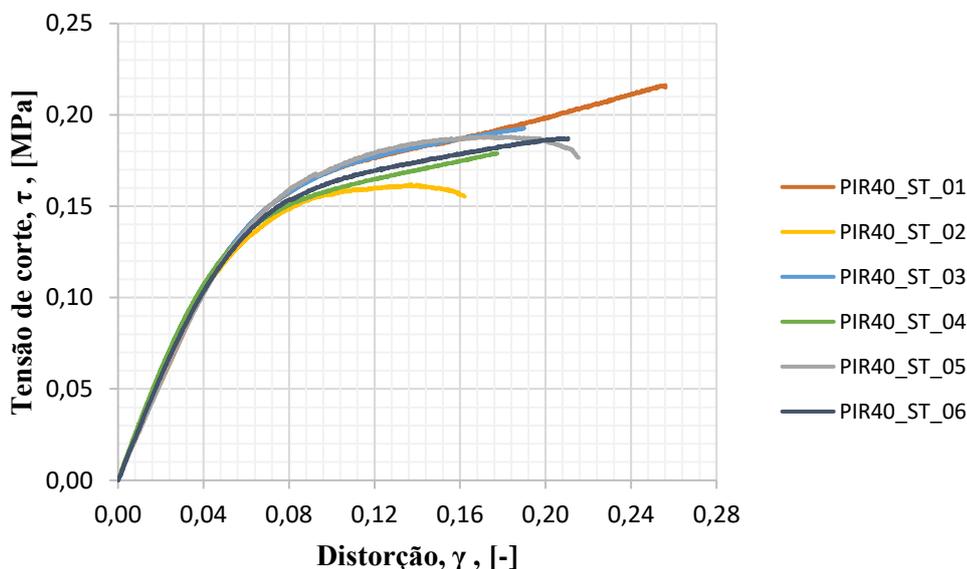
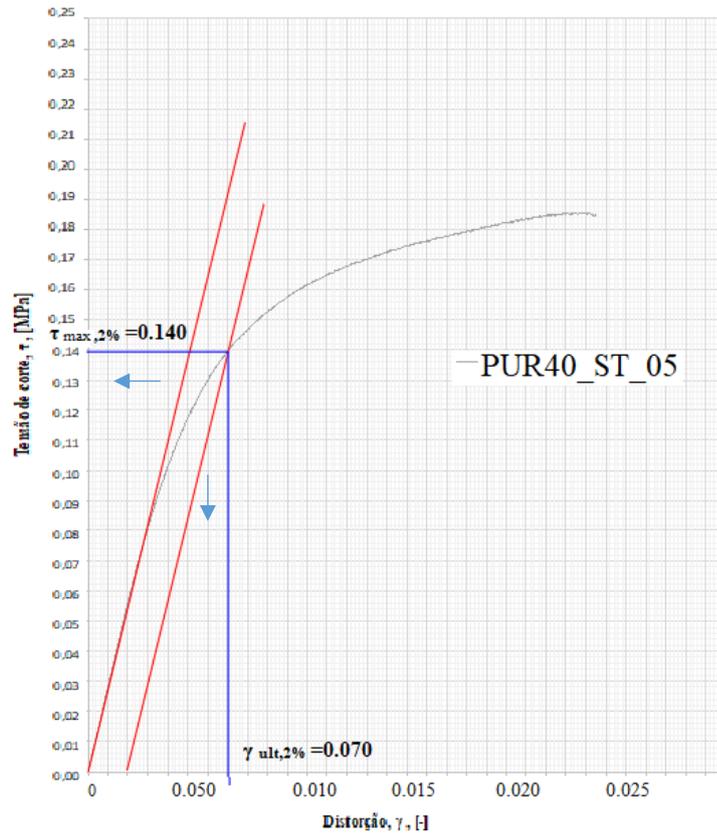
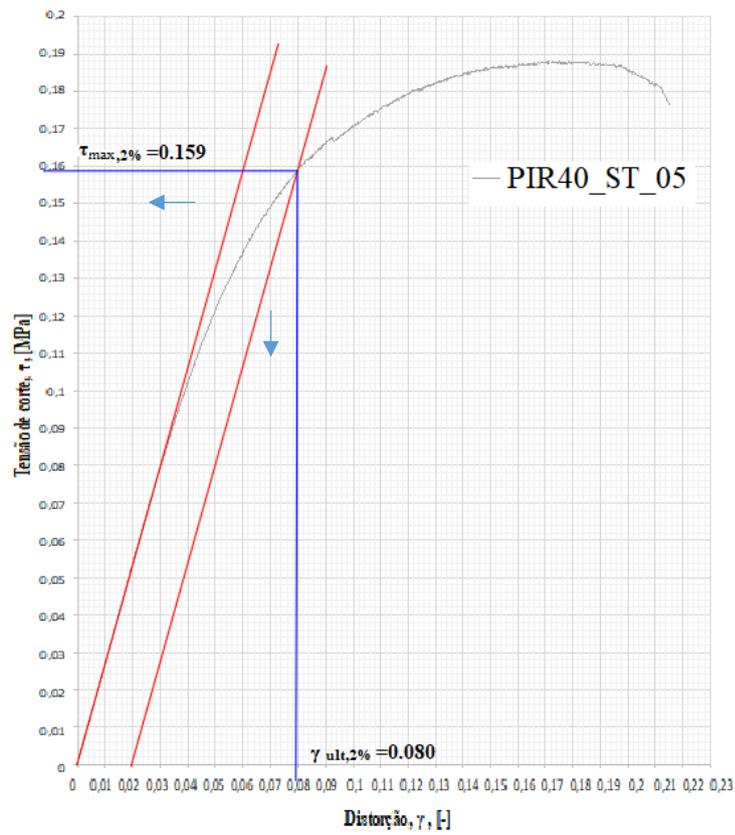


Figura 5.14 – Curvas da relação entre a tensão de corte e a distorção para os provetes de PIR.

As Tabela 5.7 e Tabela 5.8 apresentam os principais parâmetros que caracterizam o comportamento ao corte do PUR e PIR, respetivamente. Assim, nestas tabelas  $F_{\max,2\%}$ ,  $\tau_{\max,2\%}$  e  $\gamma_{\text{ult},2\%}$  dizem respeito à força máxima registada, à tensão de corte e à distorção obtidas 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 5.15).  $F_{\max,\text{ap}}$  é a força máxima registada,  $\tau_{\max,\text{ap}}$  representa a tensão de corte máxima e  $\gamma_{\text{ult},\text{ap}}$  é a distorção última.



(a)



(b)

Figura 5.15 – Determinação de  $\tau_{\max,2\%}$  e  $\gamma_{\text{ult},2\%}$ : (a) provete PUR40\_ST\_05 e (b) provete PIR40\_ST\_05.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5.7, constata-se que em termos médios o módulo de corte dos provetes de PUR é igual a 2,66 MPa,  $F_{\max,2\%}$  é igual a 6,21 kN e  $F_{\max,ap}=8,21$  kN. Por sua vez,  $\tau_{\max,2\%}=0,14$  MPa,  $\tau_{\max,ap}=0,19$  MPa,  $\gamma_{ult,2\%}=0,07$  e o  $\gamma_{ult,ap}=0,27$ . O provete PUR40\_ST\_03 não foi incluído na análise, porque o modo de rotura obtido é diferente dos restantes provetes. No geral, a dispersão de resultados é reduzida.

Tabela 5.7 – Valores dos principais parâmetros obtidos nos ensaios de corte para os provetes de PUR.

Provetes	r	$F_{\max,2\%}$	$\tau_{\max,2\%}$	$\gamma_{ult,2\%}$	$F_{\max,ap}$	$\tau_{\max,ap}$	$\gamma_{ult,ap}$	G
PUR	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kN]	[MPa]	-	[kN]	[MPa]	-	[MPa]
PUR40_ST_01	38.29	6.44	0.15	0.07	9.24	0.22	0.26	2.97
PUR40_ST_02	37.47	6.41	0.15	0.08	7.72	0.18	0.27	2.47
PUR40_ST_04	37.68	6.02	0.14	0.08	7.96	0.19	0.29	2.48
PUR40_ST_05	37.00	5.98	0.14	0.07	7.92	0.19	0.25	2.72
<b>Média</b>	<b>37.61</b>	<b>6.21</b>	<b>0.14</b>	<b>0.07</b>	<b>8.21</b>	<b>0.19</b>	<b>0.27</b>	<b>2.66</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.46</b>	<b>0.21</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.60</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.21</b>
<b>CoV (%)</b>	<b>1.24%</b>	<b>3.43%</b>	<b>3.06%</b>	<b>6.37%</b>	<b>7.33%</b>	<b>7.19%</b>	<b>4.98%</b>	<b>7.75%</b>
PUR40_ST_03	37.93	0.16	0.07	0.06	3.34	0.08	0.08	1.79

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5.8, constata-se que em termos médios, o módulo de corte os provetes de PIR é igual a 2,73 MPa,  $F_{\max,2\%}$  igual a 6,32 kN e  $F_{\max,ap}=8,20$  kN. Por sua vez,  $\tau_{\max,2\%}=0,14$  MPa,  $\tau_{\max,ap}=0,19$  MPa,  $\gamma_{ult,2\%}=0,07$  e o  $\gamma_{ult,ap}=0,20$ . Também neste caso, a dispersão de resultados é reduzida.

Tabela 5.8 – Valores dos principais parâmetros obtidos nos ensaios de corte para os provetes de PIR.

Provetes	r	$F_{\max,2\%}$	$\tau_{\max,2\%}$	$\gamma_{ult,2\%}$	$F_{\max,ap}$	$\tau_{\max,ap}$	$\gamma_{ult,ap}$	G
PIR	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kN]	[MPa]	-	[kN]	[MPa]	-	[MPa]
PIR40_ST_01	38.81	6.10	0.12	0.06	9.24	0.22	0.26	2.68
PIR40_ST_02	37.67	5.99	0.14	0.07	7.72	0.18	0.16	2.75
PIR40_ST_03	38.43	6.51	0.15	0.07	8.25	0.19	0.19	2.77
PIR40_ST_04	35.58	6.09	0.14	0.07	7.96	0.19	0.18	2.81
PIR40_ST_05	38.19	6.81	0.16	0.08	8.03	0.19	0.22	2.64
PIR40_ST_06	36.62	6.43	0.15	0.07	8.01	0.19	0.21	2.74
<b>Média</b>	<b>37.55</b>	<b>6.32</b>	<b>0.14</b>	<b>0.07</b>	<b>8.20</b>	<b>0.19</b>	<b>0.20</b>	<b>2.73</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1.12</b>	<b>0.29</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.49</b>	<b>0.01</b>	<b>0.03</b>	<b>0.06</b>
<b>CoV (%)</b>	<b>2.98%</b>	<b>4.56%</b>	<b>8.85%</b>	<b>9.72%</b>	<b>5.97%</b>	<b>6.01%</b>	<b>14.97%</b>	<b>2.06%</b>

Na Figura 5.16 e na Figura 5.17 apresenta-se o modo de rotura típico obtido nos ensaios de corte realizados em provetes de PUR e PIR, respetivamente. Sendo que as fotografias dos modos de rotura de cada provete encontram-se no ANEXO VI. Os modos de rotura observados foram considerados válidos de acordo com a norma de ensaio utilizada, ASTM C273-00.

Nos ensaios de corte de ambos os provetes, surgem macro-fendas de tração, uma em cada extremidade do provete. Deste modo, o provete vai perdendo capacidade de carga, até que rompe quando se atinge uma deformação elevada.

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 contíguas aos respetivos pratos de carga. Estas encontram-se diagonalmente apostas e progredem verticalmente. Segundo a resistência de materiais clássica, o desenvolvimento deste tipo de fendas fundamenta-se pela ocorrência de esforços de tração por flexão do provete nas extremidades referidas que resultam da configuração estrutural do sistema de ensaio.

De um modo geral, a rotura dos vários provetes ocorreu de forma semelhante entre si, rompendo essencialmente por corte devido à existência de uma fenda de corte orientada a  $45^\circ$ .

No caso dos ensaios de corte com PUR (Figura 5.16), os provetes apresentaram resultados similares entre si. O modo de rotura tipo foi caracterizado por uma fenda diagonal à espessura do provete em toda a sua largura.

Refere-se ainda que o provete PUR40\_ST\_03 apresentou uma rotura na interface adesivo/PUR (ver ANEXO VI). 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. O sucedido ocorreu porque existiu um destacamento prematuro do material em relação aos pratos de ensaio devido à rotura na interface adesivo/PUR. Tal pode dever-se à incorreta aplicação do adesivo ou à quantidade do adesivo aplicado não ter sido a suficiente para impedir o destacamento.

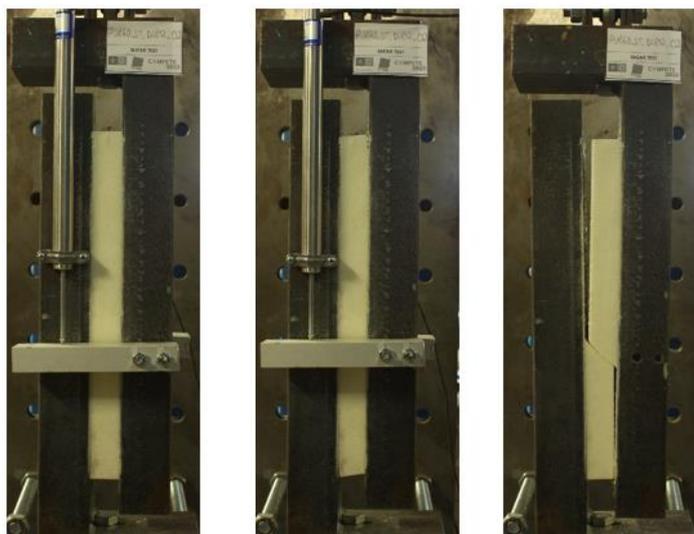


Figura 5.16 – Modo de rotura típico dos provetes de PUR ensaiados ao corte. (Nota: as fotografias encontram-se colocadas de forma sequencial.)

No caso dos ensaios de corte com PIR (Figura 5.17), estes provetes apresentaram resultados similares, sendo o modo de rotura tipo, a rotura por corte.

Refere-se ainda que nos provetes PIR40\_ST\_02 e PIR40\_ST\_05 (ver ANEXO VI), a fenda de corte não se propagou na totalidade da largura do provete pelo que se percebe que o modo de rotura não tenha sido essencialmente por corte. Este facto deve-se ao destacamento prematuro do material em relação aos pratos de ensaio devido à rotura na interface adesivo/PIR, conforme verificado e descrito anteriormente num provete de PUR.

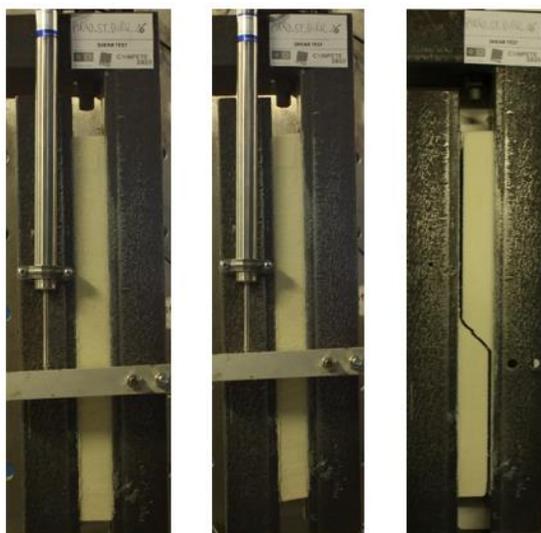


Figura 5.17 – Modo de rotura típico dos provetes de PIR ensaiados ao corte. Nota: as fotografias encontram-se colocadas de forma sequencial.

### 5.3.3 Análise comparativa

#### 5.3.3.1 Ensaaios de Compressão

Neste subcapítulo, pretende-se comparar os valores obtidos em ensaios de compressão realizados com provetes de PUR e de PIR.

A Figura 5.18 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compressão realizados em provetes de PUR e PIR, tendo em conta a relação entre tensão normal de compressão e correspondente extensão. Da análise conclui-se que os provetes de PIR apresentam maiores valores de tensão máxima de compressão do que os de PUR. Quanto ao comportamento observado é bastante semelhante entre provetes de PUR e PIR.

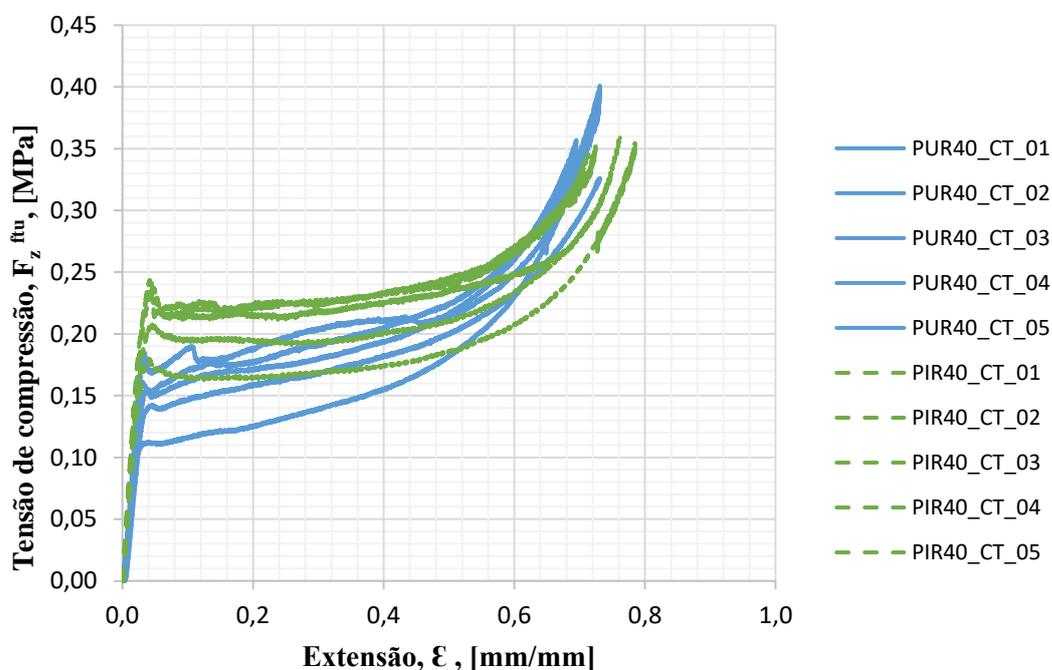


Figura 5.18 – Relação entre tensão de compressão e extensão axial em provetes de PUR e PIR quando ensaiados à compressão.

Na Figura 5.19 comparam-se os resultados dos provetes de PUR e PIR. Comparando os provetes de PUR em relação a PIR existe uma igualdade nos valores dos resultados obtidos quando se analisa a extensão máxima, no entanto, é de realçar a força máxima e a tensão máxima de PIR que são superiores cerca de 46% aos correspondentes valores medidos no PUR, assim como o módulo de elasticidade de compressão que é novamente superior cerca de 14,6% em relação aos provetes de PUR.

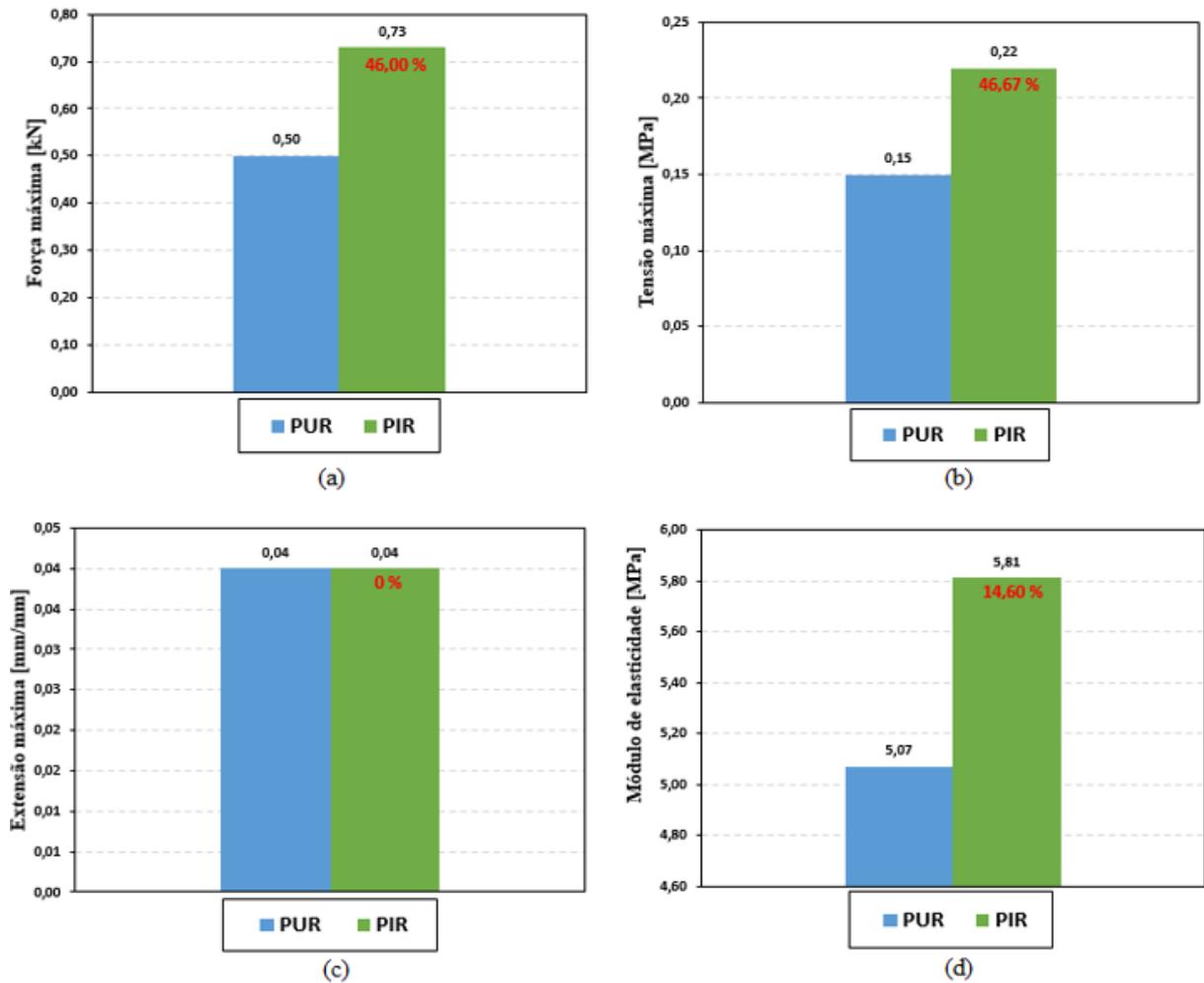


Figura 5.19 – Comparação de valores médios obtidos em ensaios com provetes de PUR e PIR: (a) força máxima; (b) tensão máxima; (c) extensão máxima e (d) módulo de elasticidade de compressão. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete PUR.

### 5.3.3.2 Ensaio de Corte

Neste subcapítulo, pretende-se comparar os valores obtidos nos ensaios de corte realizados em provetes de PUR e de PIR. Com esse objetivo, será efetuada uma análise comparativa entre os parâmetros medidos em todos os provetes ensaiados.

A Figura 5.20 apresenta as curvas que relacionam a tensão de corte e a correspondente distorção de todos os provetes ensaiados de PUR e PIR, obtidas a partir dos ensaios experimentais de corte. Ambos os provetes (PUR e PIR) apresentam uma resposta similar. Realça-se que a maioria dos provetes é capaz de desenvolver um patamar de ductilidade (Figura 5.20).

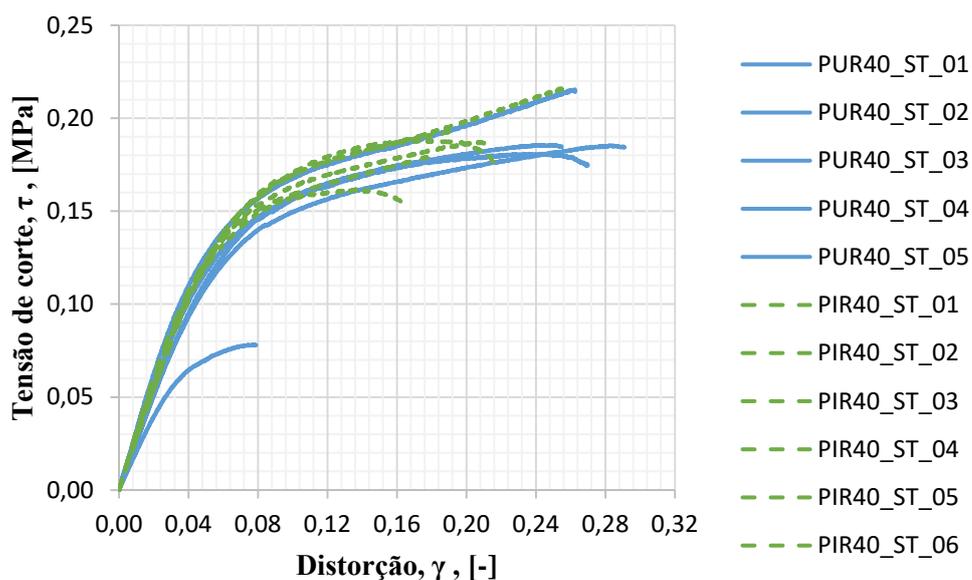


Figura 5.20 – Curvas que traduzem a relação entre a tensão de corte e a distorção nos provetes de PUR e de PIR.

A seguir, comparam-se os valores médios dos principais parâmetros que caracterizam o comportamento ao corte do PUR e do PIR: (i) força de corte, (ii) tensão de corte e (iii) distorção. Na Figura 5.21 apresenta-se a comparação da força máxima de corte entre provetes de PUR e PIR. Nos provetes de PIR, o valor de  $F_{\max,2\%}$  é 1,77% superior aos valores de  $F_{\max,2\%}$  obtidos nos provetes de PUR. No caso da força resistente ao corte na rotura ( $F_{\max,ap}$ ), verifica-se que o valor obtido nos provetes de PIR é 0,12% inferior ao que foi obtido nos provetes de PUR.

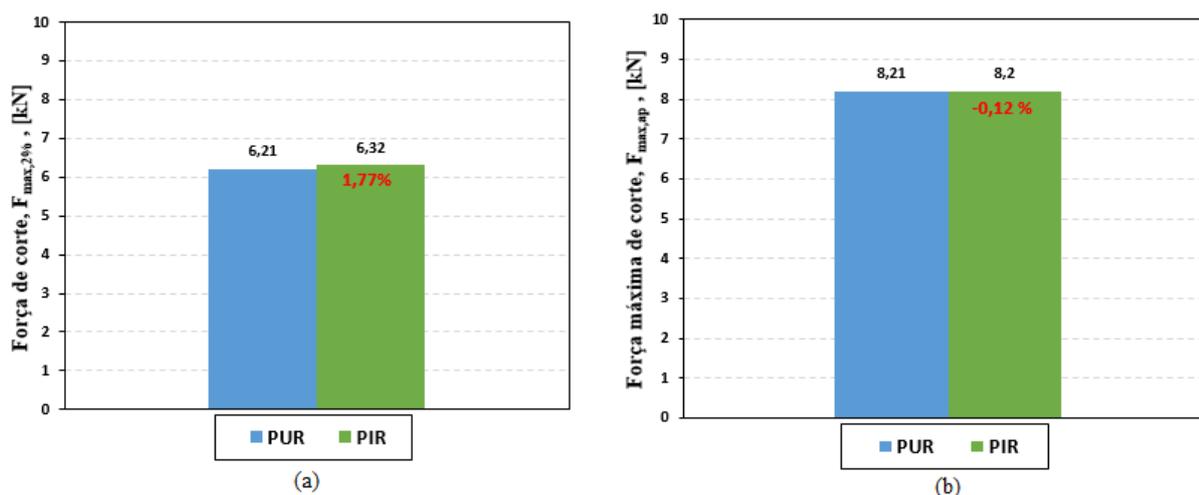


Figura 5.21 – Comparação da força máxima de corte entre provetes de PUR e PIR: (a) força para uma deformação de corte de 2%,  $F_{\max,2\%}$ , e (b) força na rotura,  $F_{\max,ap}$  (valor aparente). Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete PUR.

Na Figura 5.22 apresenta-se a comparação da tensão máxima de corte entre provetes de PUR e PIR. Observa-se que a tensão de corte nos provetes de PUR e PIR é igual, tanto para o valor de  $F_{\max,2\%}$  como para  $F_{\max,ap}$ .

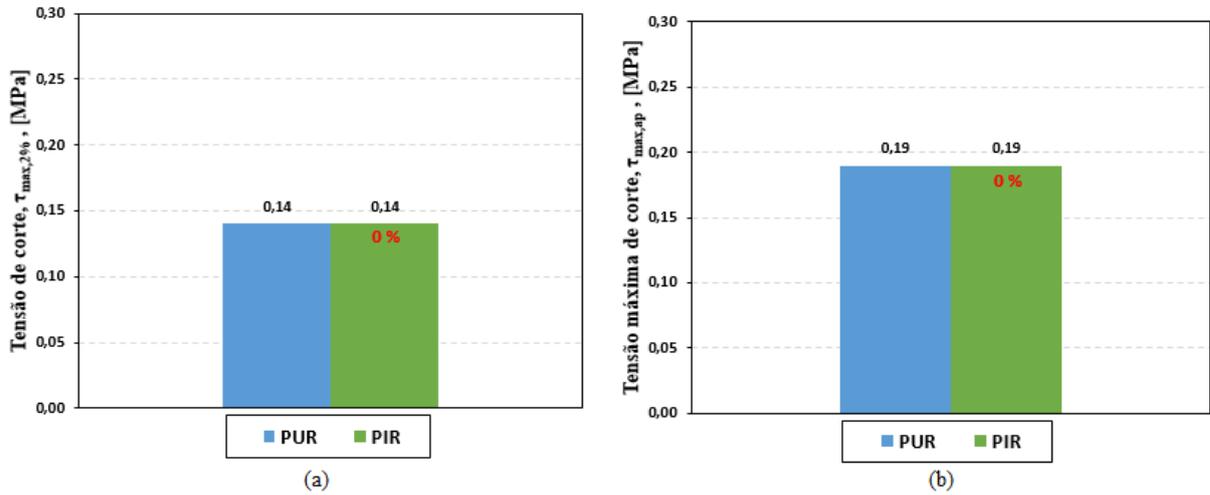


Figura 5.22 – Comparação da tensão máxima de corte entre provetes de PUR e PIR: (a) tensão para uma deformação de corte de 2%,  $\tau_{\max,2\%}$ , e (b) tensão na rotura,  $\tau_{\max,ap}$  (valor aparente). Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete PUR, esquerda.

Na Figura 5.23 apresenta-se a comparação da distorção última de corte entre provetes de PUR e PIR. Quando se comparam os valores obtidos para  $\gamma_{ult,2\%}$ , estes são iguais, no entanto analisando  $\gamma_{ult,ap}$ , constata-se que os valores obtidos para o PIR são inferiores 25,93% em relação ao PUR.

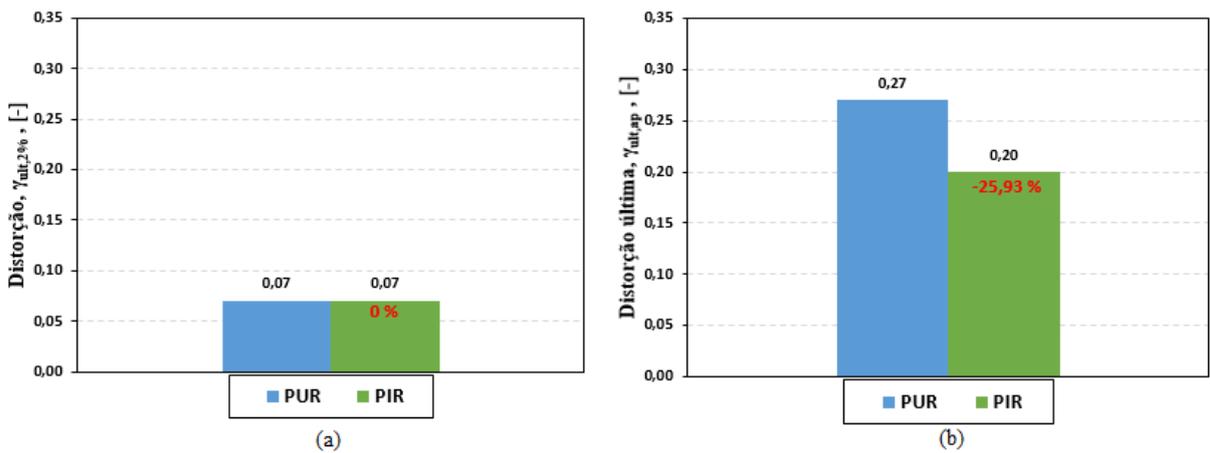


Figura 5.23 – Comparação da distorção última de corte entre provetes de PUR e PIR: (a) distorção para uma deformação de corte de 2%,  $\gamma_{ult,2\%}$  e (b) distorção na rotura,  $\gamma_{ult,ap}$  (valor aparente). Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete PUR.

Na Figura 5.24 apresenta-se a comparação do módulo de corte (G) entre provetes de PUR e PIR. Na presença de PIR, os módulos de corte dos provetes apenas aumentam em 2,63% em relação aos provetes de PUR.

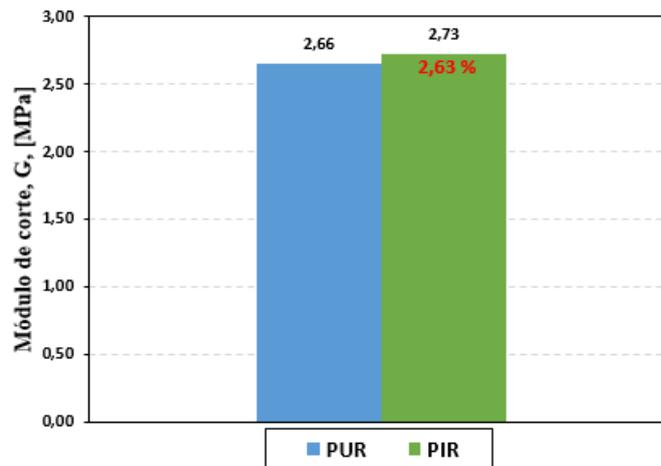


Figura 5.24 – Comparação do módulo de corte entre provetes de PUR e PIR. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao provete PUR.

Assim, de um modo geral, conclui-se que os provetes de PIR, apresentam uma distorção última igual ou inferior aos provetes de PUR. Relativamente ao módulo de corte obtiveram-se valores muito próximos para os provetes de PUR e PIR.

## 5.4 Conclusões

O presente capítulo descreveu os ensaios relativos ao comportamento em compressão e corte de uma espuma rígida de poliuretano (PUR) e de poliisocianurato (PIR) a utilizar no núcleo do painel sanduíche híbrido proposto no projeto de investigação “EasyFloor”.

Quando submetidas a esforços de compressão, as espumas de poliuretano (PUR) e poliisocianurato (PIR) apresentam um comportamento inicial aproximadamente linear até se atingir a força máxima, a que se segue um decréscimo da força e uma fase onde se observa o aumento das deformações para valores de força aproximadamente constantes, sendo as deformações residuais elevadas. Este patamar foi mais evidente nos provetes de PIR. A tensão de compressão máxima obtida nos provetes de PIR foi superior cerca de 46,67% em relação aos provetes de PUR, assim como o módulo de elasticidade de compressão que é cerca de 14,60% superior módulo de elasticidade de compressão medido nos provetes de PUR. Os

modos de rotura observados nos ensaios de compressão são semelhantes, quer entre os provetes de PUR e PIR, quer entre os provetes ensaiados de cada material.

Nos ensaios de corte em placa, observou-se inicialmente um comportamento linear elástico, seguido por um comportamento não linear até à rotura apresentando um patamar com aumento da distorção para valores de tensão de corte aproximadamente constantes. As respostas apresentadas a partir dos ensaios de corte resultaram num campo de extensões uniforme até uma distorção entre os 2% (PUR) e 4% (PIR) e num campo de extensões não uniforme a partir daí até à rotura. A tensão máxima de corte nos provetes de PIR foi igual à tensão máxima de corte medida nos provetes de PUR. Relativamente ao módulo de corte obtiveram-se valores superiores para os provetes de PIR em apenas 2,63%, comparativamente com os provetes de PUR. Ao nível dos modos de rotura apresentados, neste tipo de ensaio ocorreu excecionalmente em alguns provetes um destacamento prematuro do provete em relação aos pratos de ensaio devido à rotura na interface adesivo/PUR ou adesivo/PIR. Este destacamento prematuro pode ter resultado da incorreta aplicação do adesivo ou da quantidade do adesivo aplicado não ter sido a suficiente para evitar o destacamento.

Em suma, analisando o comportamento mecânico da espuma rígida de poliuretano (PUR) e poliisocianurato (PIR), onde a densidade selecionada para ambos os materiais foi de  $40 \text{ kg/m}^3$ , os estudos experimentais revelaram que, de acordo com os resultados apresentados ao longo do presente capítulo, o PIR apresenta melhores características mecânicas quando submetido a ensaios de compressão, no entanto em relação aos resultados obtidos pelos ensaios de corte as características mecânicas são muito semelhantes entre os provetes de PUR e PIR.

Como resultado da avaliação realizada e tendo em conta o comportamento melhorado ao fogo do PIR, tomou-se a opção de adotar PIR na realização do núcleo do painel sanduíche híbrido proposto no presente projeto “EasyFloor”.



# ESTUDOS NUMÉRICOS DE PAINÉIS SANDUÍCHE HÍBRIDOS

---

### 6.1 Introdução

O presente capítulo detalha simulações numéricas do painel sanduíche híbrido do projeto “EasyFloor”. O *software* adotado para a análise foi o ABAQUS (versão 6.13), sendo esta ferramenta indicada para modelação de materiais compósitos.

Estas simulações tiveram por base os resultados obtidos nas campanhas experimentais desenvolvidas ao longo desta dissertação para caracterizar mecanicamente todos os materiais constituintes do painel sanduíche híbrido proposto.

O enfoque destas simulações numéricas foi na obtenção de modelos preditivos do comportamento mecânico do painel sanduíche híbrido, para distintas configurações de ensaio previstas no âmbito do projeto “EasyFloor”.

Inicialmente foi efetuada a calibração do modelo de elementos finitos recorrendo à geometria, condições de apoio e características mecânicas dos materiais constituintes do painel sanduíche. Os resultados obtidos na modelação numérica foram comparados com os resultados obtidos por soluções teóricas do problema em análise. Posteriormente foram efetuados estudos paramétricos, onde foi apresentada a configuração de ensaio a usar no âmbito deste projeto. De modo a concluir foram analisados os resultados relativos a cada configuração de ensaio.

### 6.2 Calibração do modelo de elementos finitos

O conjunto alargado de simulações teve como ponto de partida o i) desenvolvimento de uma malha de elementos finitos do painel sanduíche, representando a sua geometria e componentes envolvidos, ii) a utilização das propriedades mecânicas dos materiais envolvidos, que resultaram da caracterização mecânica incluída na presente dissertação, e iii) validação do modelo por comparação dos resultados obtidos com os relativos a soluções teóricas do problema em análise.

O modelo desenvolvido consiste no painel sanduíche híbrido com 5.0 m de vão, simplesmente apoiado nas extremidades e sujeito a carga uniformemente distribuída na camada superior de SCSFRMC. A constituição adotada para os estudos incorpora uma lâmina inferior e superior e nervuras em GFRP, uma lâmina superior em micro-betão autocompactável reforçado com fibras de aço (SCSFRMC) e um núcleo em poliisocianurato (PIR), conforme se apresenta na Figura 6.1.

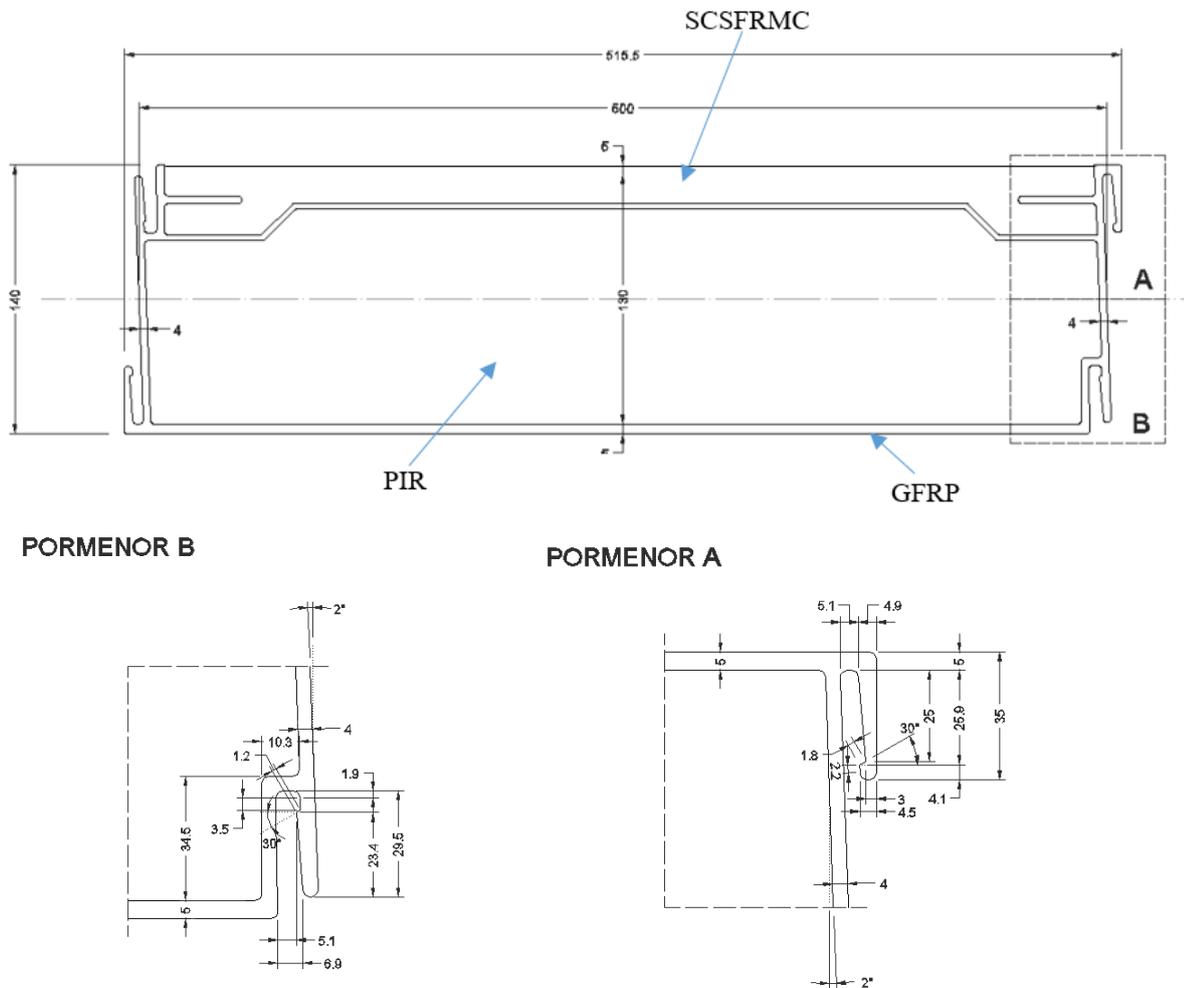


Figura 6.1 – Geometria do painel sanduíche híbrido do Projeto “EasyFloor”. Nota: Dimensões em [mm].

O comportamento do painel sanduíche híbrido é essencialmente tridimensional e, conseqüentemente, de grande complexidade. Assim, todos os materiais constituintes do painel e apoios idealizados para representar o suporte dos painéis foram simulados numericamente como um problema 3D, com recurso a elementos tridimensionais (Figura 6.2).

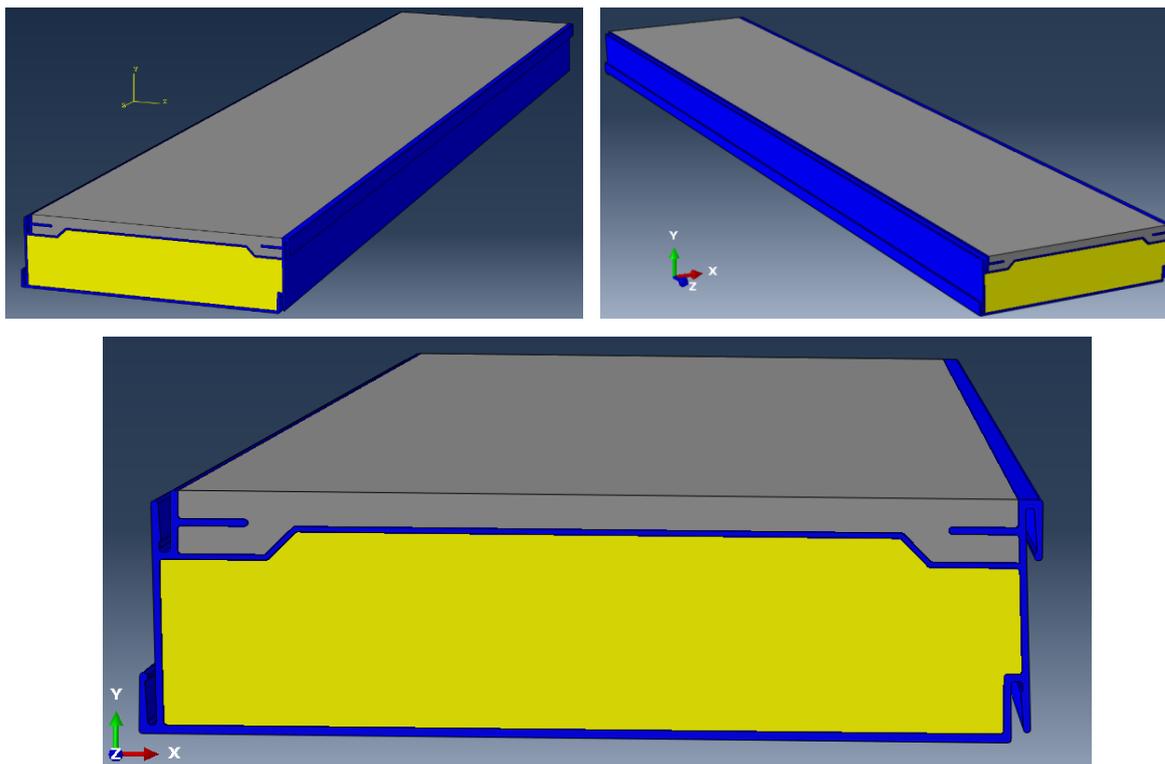


Figura 6.2 – Painel sanduíche híbrido para simulações numéricas: GFRP (azul), SCSFRMC (cinzento) e PIR (amarelo).

Na simulação utilizaram-se elementos sólidos hexaédricos. Dentro da família de elementos finitos sólidos (de volume) disponível no ABAQUS, os mais comuns são C3D8 (8 nós) e C3D20 (20 nós). Procurando balancear entre o tempo de cálculo necessário, exigência computacional ao nível do *hardware* e rigor de simulação, foi dada preferência aos elementos finitos C3D8. A integração numérica dos elementos de volume foi a *Gauss-Legendre* com  $2 \times 2 \times 2$  pontos de integração.

Na discretização adotada para a malha de elementos finitos, procurou assegurar-se a relação entre as dimensões do elemento finito (maior dimensão *versus* menor dimensão) inferior a 5. Face aos materiais constituintes do painel e aos pressupostos de cálculo usados no dimensionamento deste, será expetável que nos ensaios experimentais a realizar com os painéis, para cargas de serviço (SLS) e estado limite último de projeto (ULS) o painel apresente essencialmente comportamento elástico linear. Neste contexto, admitiu-se a hipótese simplificativa de todos os materiais apresentarem comportamento elástico linear. Admitiu-se aderência perfeita entre todos os materiais, i.e. entre GFRP e PIR, e GFRP e SCSFRMC. Admitiu-se ainda, por simplificação, que os materiais apresentavam comportamento isotrópico.

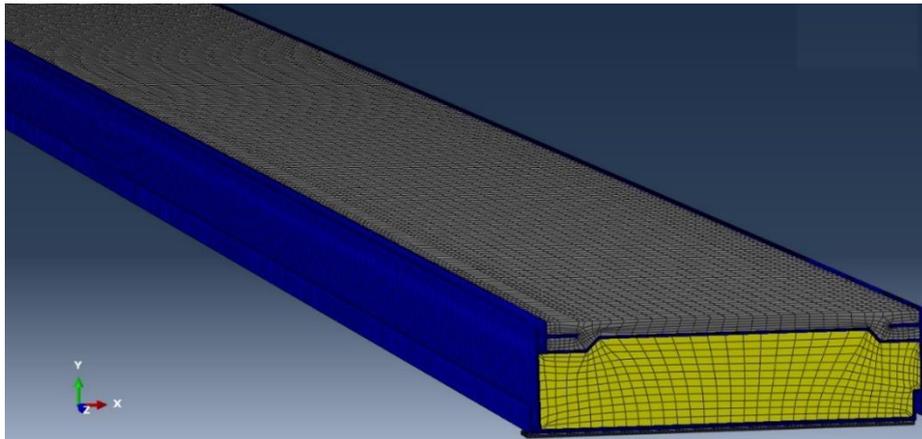
Dada a simetria do painel sanduíche híbrido, apenas foi modelado metade do painel, ficando este com 2.50 m de comprimento. A estratégia seguida para as condições de apoio e carregamento refletem a simetria do problema, sendo esta igualmente considerada.

As propriedades mecânicas adotadas para os distintos materiais, de acordo com a bibliografia e ensaios experimentais encontram-se detalhas na Tabela 6.1.

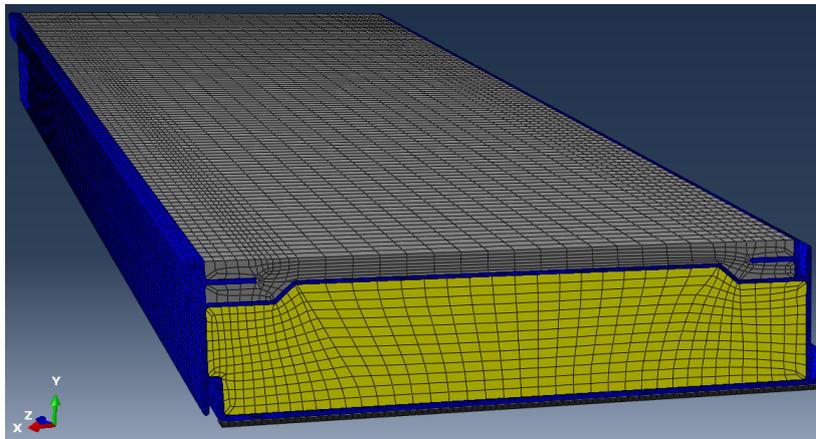
Tabela 6.1 – Propriedades mecânicas adotadas nas simulações numéricas.

	<b>E</b>	<b>v</b>
	[MPa]	[-]
SCSFRMC	23800	0.15
PIR	5.81	0.30
GFRP	30000	0.15

Dada a complexidade do problema em estudo, o processo de validação do modelo numérico foi desenvolvido faseadamente. Neste processo foram identificados os vários parâmetros que influenciaram a resposta do modelo e que conseqüentemente resultaram na tomada decisões para a obtenção do modelo final. Neste contexto apresenta-se, o modelo inicial de partida e o modelo final adotado. Assim, foi inicialmente definida uma malha de elementos finitos bastante refinada para cada um dos componentes que constituem o painel, o que conduziu um custo computacional muito elevado, devido às necessidades de alocação de memória da matriz de rigidez, que não foi possível concretizar com o *hardware* disponível (ver Figura 6.3a)). De modo a solucionar o problema, aumentou-se a dimensão dos elementos finitos que compõem a malha. Com esta solução foi possível calcular o modelo proposto (ver Figura 6.3b)).



(a)



(b)

Figura 6.3 – Configuração da malha do painel sanduíche híbrido: (a) inicial e (b) final.

Numa primeira fase considerou-se um carregamento uniformemente distribuído de  $p_{Ed}=10 \text{ kN/m}^2$ . A carga foi aplicada como sendo uniformemente distribuída na face superior da camada de SCSFRMC (Figura 6.4) e (Figura 6.5).

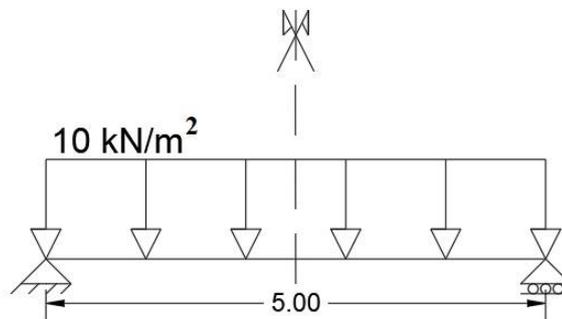


Figura 6.4 – Configuração das condições fronteira e carregamento. Nota: Dimensões em [m].

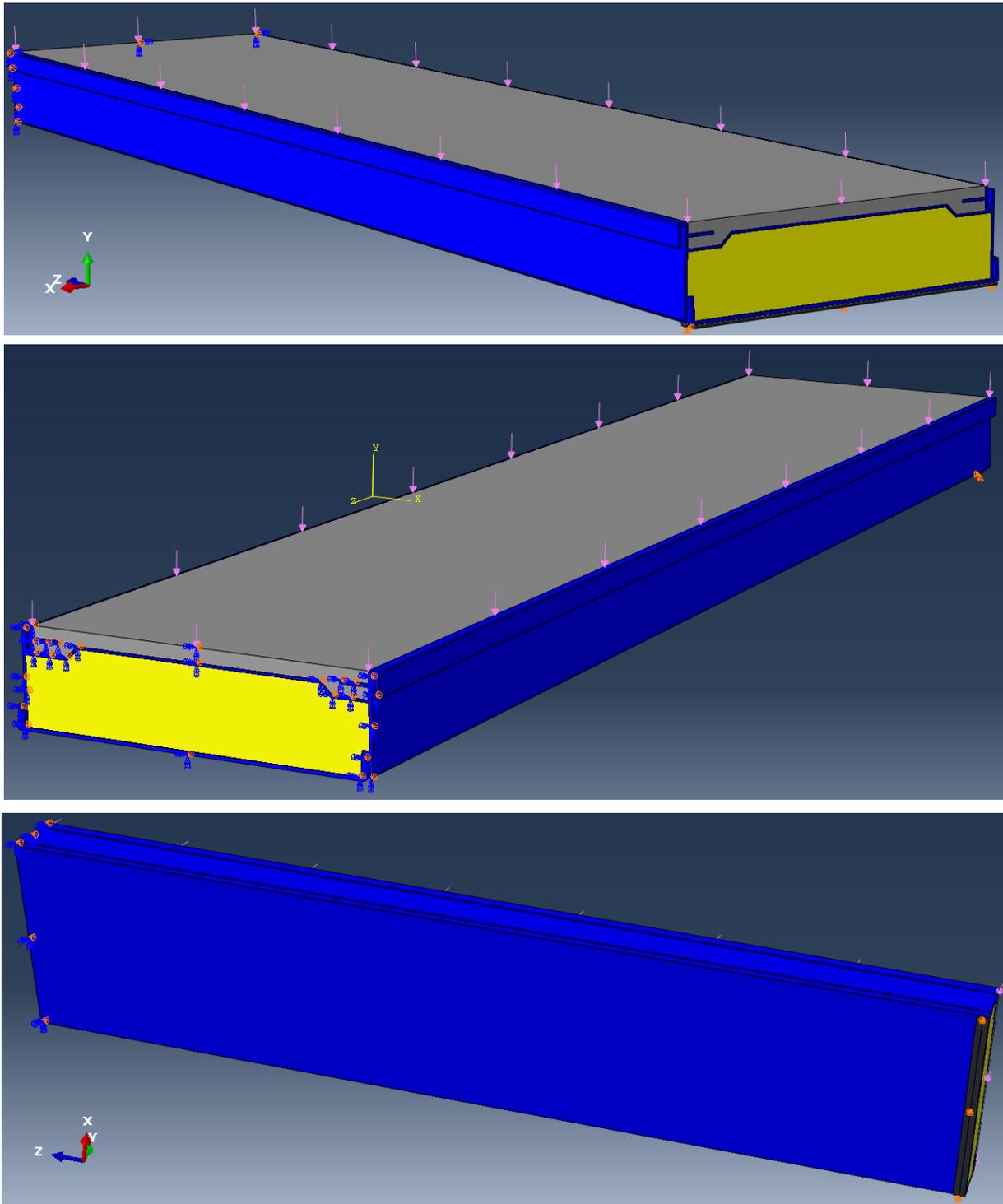


Figura 6.5 – Configuração das condições fronteira e carregamento do painel sanduíche híbrido.

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos numericamente com uma solução teórica analítica, usou-se a teoria clássica da viga de *Timoshenko*. Assim, a deformação total elástica é a que resulta da soma da deformação por flexão e por corte, uma vez que as flechas resultam

fundamentalmente da deformação do painel causada por esforços axiais e de flexão das lâminas e por esforços de corte do núcleo (Allen (2013); Davies (2001)). Portanto, e tendo em conta as simplificações anteriormente referidas é possível calcular o deslocamento vertical do painel sanduíche, com base na teoria clássica de flexão.

Na presença de uma carga uniformemente distribuída,  $q$ , o deslocamento total a meio vão ( $\delta$ ) é dado por:

$$\delta = \delta_{flexão} + \delta_{corte} = \frac{5qL^4}{384D} + \frac{qL^2}{8GA'} \quad (6.1)$$

em que,  $q$  [N/mm<sup>2</sup>],  $L$  [mm],  $D$  [kN.m<sup>2</sup>],  $G$  [MPa] e  $A'$  [mm<sup>2</sup>] são a carga uniformemente distribuída, o vão de ensaio, o  $EI$ , o módulo de distorção e a área reduzida de corte, respetivamente.

Na Tabela 6.2, Tabela 6.3 e Tabela 6.4 apresentam-se os dados para o cálculo do deslocamento analítico total a meio vão para o painel sanduíche simplesmente apoiado e sujeito a uma carga uniformemente distribuída ( $p_{Ed} = 10$  kN/m<sup>2</sup>). Recorreu-se à homogeneização da secção do painel em PIR, obtendo-se uma posição do centro de gravidade de:  $y_g = 98.12$  mm.

Tabela 6.2 – Características mecânicas e geométricas dos materiais intervenientes do painel sanduíche.

	Área [mm <sup>2</sup> ]	I <sub>x</sub> [mm <sup>4</sup> ]	y <sub>g</sub> [mm]	E [MPa]
<b>SCSFRMC</b>	11218.56	865862.10	127.17	23000
<b>PIR</b>	52575.98	51806743.39	59.32	5.81
<b>GFRP</b>	6036.26	17452986.61	56.80	30000

Nota: I<sub>x</sub>, onde o eixo X corresponde à direção longitudinal (direção principal do painel).

Tabela 6.3 – Cálculo do momento de inércia (secção homogeneizada).

	I [mm <sup>4</sup> ]	EI [kN.m <sup>2</sup> ]
<b>SCSFRMC</b>	10331168.19	237.62
<b>PIR</b>	51806743.39	0.30
<b>GFRP</b>	27760224.42	832.81

Nota: I, no eixo correspondente à direção longitudinal (direção principal do painel).

Tabela 6.4 – Dados para o cálculo do deslocamento.

<b>D</b>	<b>G</b>	<b>L</b>	<b>q</b>	<b>A'</b>
<b>[kN.m<sup>2</sup>]</b>	<b>[MPa]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>[mm<sup>2</sup>]</b>
1071.18	6.2	5000	0.005	53471.98

Nota:  $A' = A_{\text{PIR}} + A_{\text{Duas almas laterais em GFRP}}$

Assim, usando os valores da tabela anterior na equação (6.1) obtém-se um deslocamento a meio vão,  $\delta = 38.05$  mm.

A Tabela 6.5 apresenta a comparação entre o deslocamento vertical máximo determinado pela simulação numérica do painel sanduíche, bem como o deslocamento analítico calculado através da expressão (6.1). Da observação, conclui-se que o modelo numérico conduz a deslocamentos muito semelhantes ao analítico, tendo-se obtido apenas um erro de 0.03%.

Tabela 6.5 – Deslocamento vertical a meio vão, determinado pelo modelo de elementos finitos e de forma analítica.

<b>Deslocamento máximo analítico</b>	<b>Deslocamento máximo numérico</b>	<b>Erro</b>
<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[%]</b>
38.05	38.06	0.03

A Figura 6.6 apresenta a evolução dos deslocamentos na direção Y do painel sanduíche. Como se observa, os deslocamentos em Y são uniformes ao longo da espessura e vão aumentando em direção à medida que nos afastamos do apoio. O máximo é verificado a meio vão, tal como espectável, conduzindo a um valor de 38.06 mm.

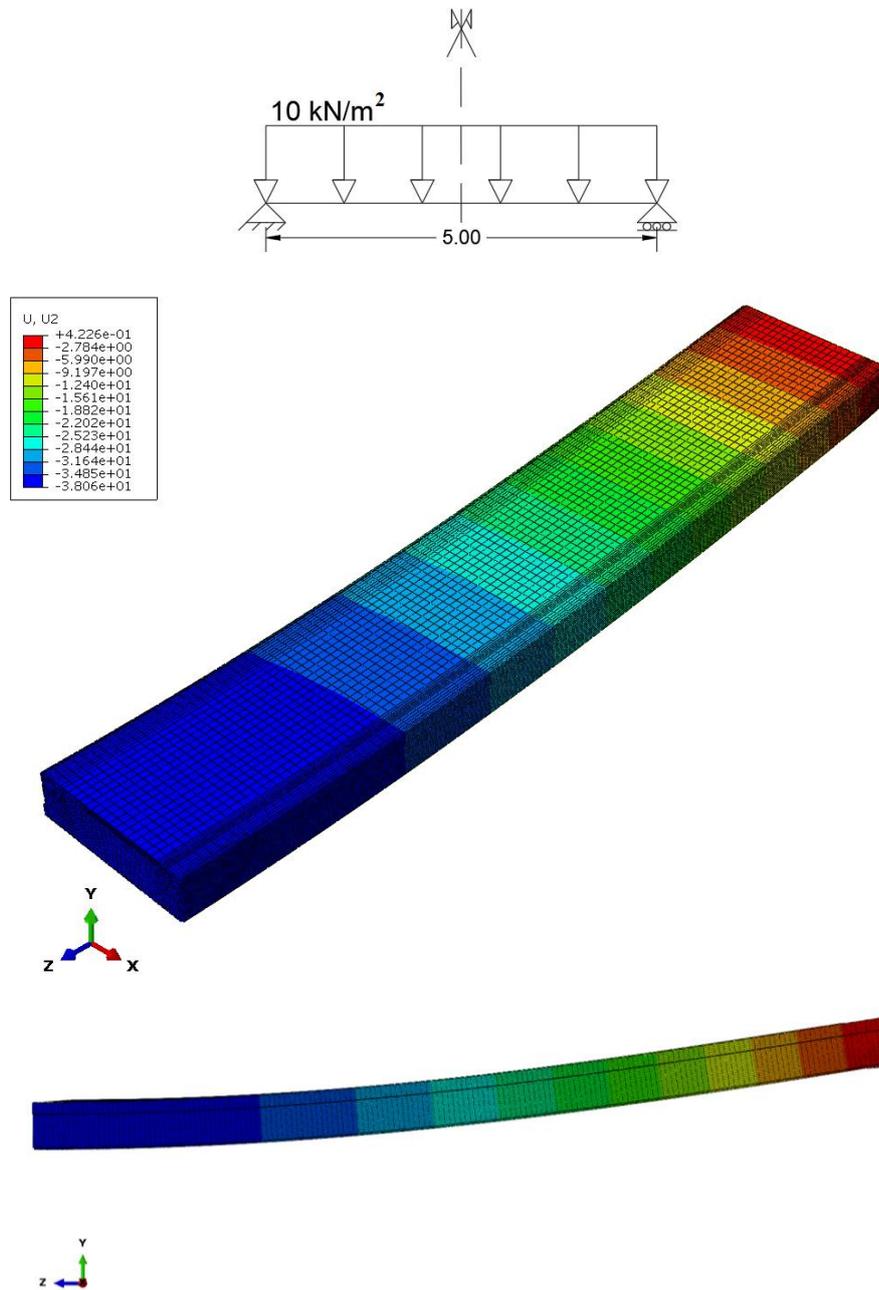


Figura 6.6 – Deformada e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm].

### 6.3 Estudos paramétricos

No que segue apresentam-se os estudos paramétricos realizados, tendo por base o modelo de elementos finitos desenvolvido.

#### 6.3.1 Caso 1

No primeiro caso dos estudos paramétricos pretende-se obter uma simulação em termos de condições reais de serviço e estado limite último de resistência recorrendo a cargas pontuais. Assim, este caso, seguiu a configuração de ensaio apresentada na Figura 6.7 onde se idealizou uma laje simplesmente apoiada com carga uniformemente distribuída, tendo como objetivos analisar: (i) os deslocamentos máximos a meio vão, (ii) as tensões máximas na direção longitudinal (direção principal do painel), nos materiais de GFRP e SCSFRMC constituintes do painel sanduíche híbrido e (iii) as tensões máximas de corte no PIR. Para isso, efetuou-se uma simulação estática de metade do painel sanduíche. Foram aplicadas quatro cargas de faca no valor de 1.25 kN/0.50 m uniformemente na largura do painel e na face superior da camada de SCSFRMC.

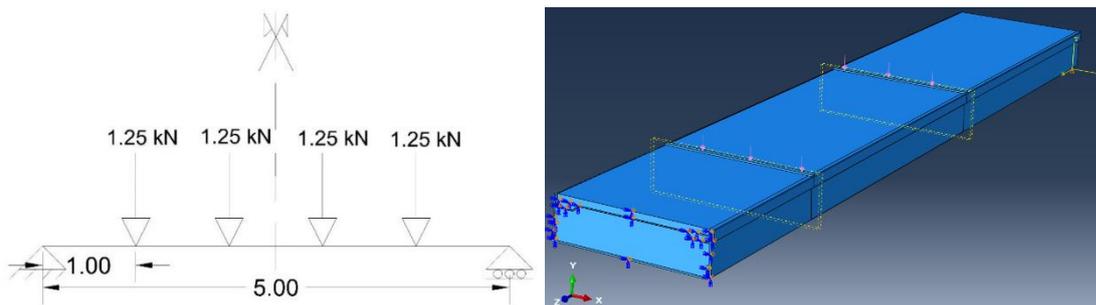


Figura 6.7 – Configuração de ensaio do Caso 1

#### 6.3.2 Caso 2

O segundo caso de estudo corresponde à configuração de ensaio apresentada na Figura 6.8 onde se pretende idealizar uma laje com três pontos de apoio e 2 cargas pontuais para simulação de um cenário de um hipotético apoio intermédio com existência de momentos negativos. Este caso teve como objetivos analisar: (i) os deslocamentos máximos na seção S2, (ii) as tensões máximas, na direção longitudinal, nas secções S2 e S1 dos materiais de SCSFRMC e GFRP constituintes do painel sanduíche híbrido e (iii) as tensões máximas de corte do PIR, junto aos apoios AP1 e AP2. Para isso, efetuou-se uma simulação estática de metade do painel sanduíche (com 2.50 m de desenvolvimento). Foi utilizada a combinação referente a um hipotético estado limite de utilização:  $p_{qp} = (\text{peso próprio} + \text{revestimentos}) + 0.3 \times \text{sobrecarga}$ , com peso próprio

= 0.6 kN/m<sup>2</sup>, revestimentos = 0.96 kN/m<sup>2</sup> e sobrecarga = 2 kN/m<sup>2</sup>. Sendo,  $p_{qp} = 2.16 \text{ kN/m}^2$ . Aplica-se a carga em toda a superfície superior do painel, resultando  $p_{qp} = 5.4 \text{ kN}$ . Distribuindo por duas cargas faca ao longo da largura do painel sanduíche, resulta  $p_{qp} = 2.7 \text{ kN}/0.50 \text{ m}$ , aplicado a meio vão dos apoios, na face superior da camada de SCSFRMC. Adicionalmente, foram impedidos os deslocamentos verticais na extremidade esquerda de modo a reproduzir as condições de suporte do apoio intermédio.

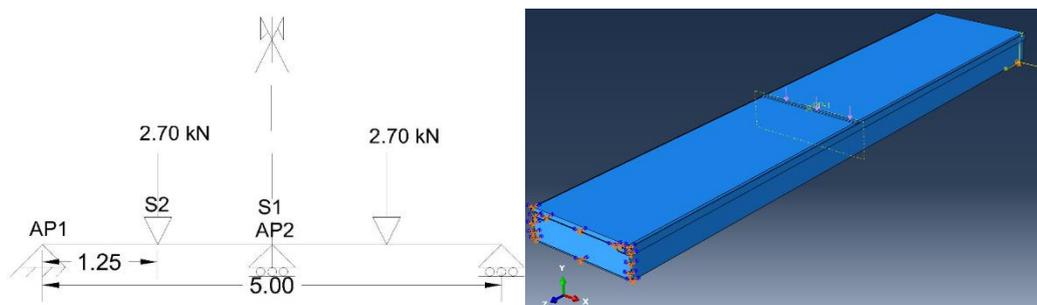


Figura 6.8 – Configuração de ensaio do Caso 2.

### 6.3.3 Caso 3

No terceiro estudo pretendeu-se simular a situação de cenários que procuram promover diferentes tipos de modos de rotura tentando perceber o comportamento do painel sob o efeito de diferentes tipos de carregamento. Assim, o objetivo foi avaliar e comparar a influência da variação da distância entre pontos de aplicação das cargas em relação ao meio vão do painel sanduíche (Tabela 6.6). Este subdivide-se em quatro novos casos, tendo estes como objetivo analisar: (i) os deslocamentos máximos, (ii) as tensões normais máximas na direção longitudinal, direção principal do painel, nos materiais de SCSFRMC e GFRP constituintes do painel sanduíche híbrido e (iii) as tensões máximas de corte do PIR.

Tabela 6.6 – Configuração de carregamento do Caso 3.

	<b>Carregamento [kN]/0.50m</b>	<b>Distância do meio vão [m]</b>
<b>Caso 3 i)</b>	2.70	5 / 4
<b>Caso 3 ii)</b>	2.70	5 / 6
<b>Caso 3 iii)</b>	2.70	5 / 8
<b>Caso 3 iv)</b>	2.70	5 / 10

### 6.3.3.1 Caso 3 i)

Neste caso, foi seguida a configuração de ensaio apresentada na Figura 6.9.

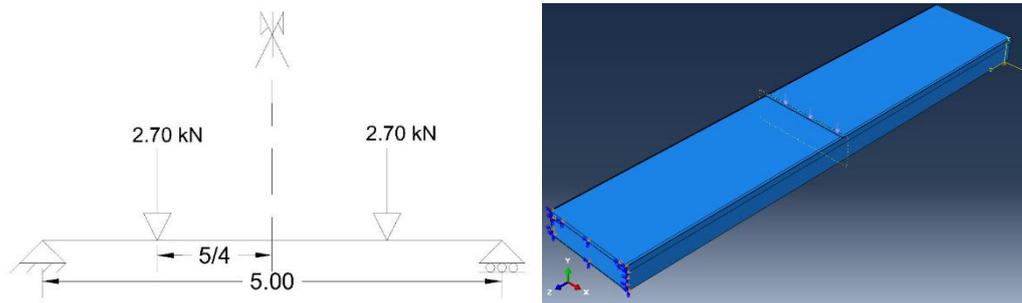


Figura 6.9 – Configuração de ensaio do Caso 3 i).

### 6.3.3.2 Caso 3 ii)

Neste caso, foi realizada a simulação da situação do cenário que será utilizado nos ensaios de fluência do projeto “Easyfloor”, seguindo a configuração de ensaio apresentada na Figura 6.10.

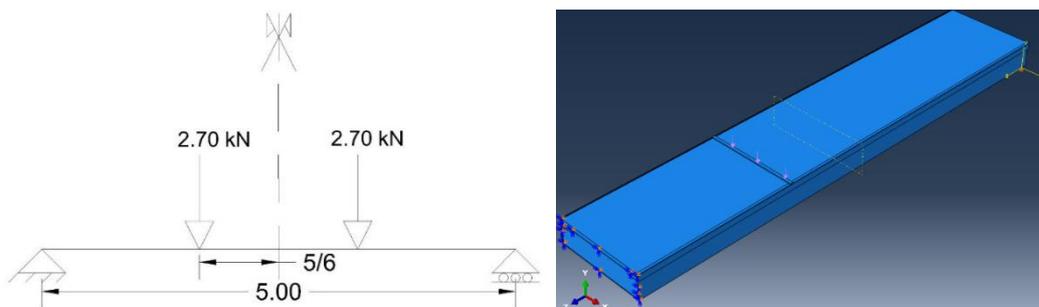


Figura 6.10 – Configuração de ensaio do Caso 3 ii).

### 6.3.3.3 Caso 3 iii)

Neste caso, foi seguida a configuração de ensaio apresentada na Figura 6.11.

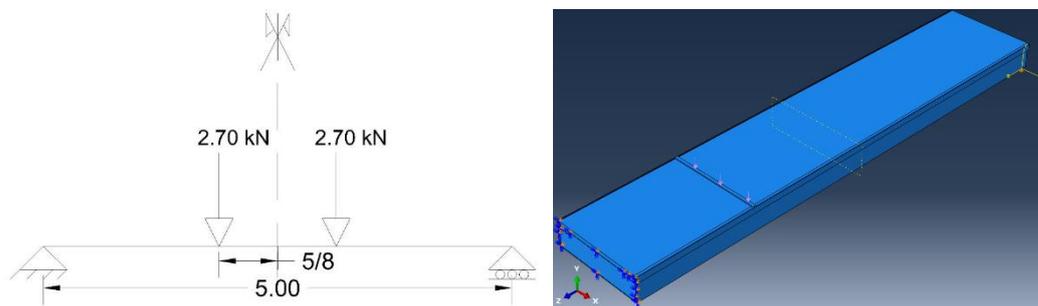


Figura 6.11 – Configuração de ensaio do Caso 3 iii).

### 6.3.3.4 Caso 3 iv)

Neste caso, foi seguida a configuração de ensaio apresentada na Figura 6.12.

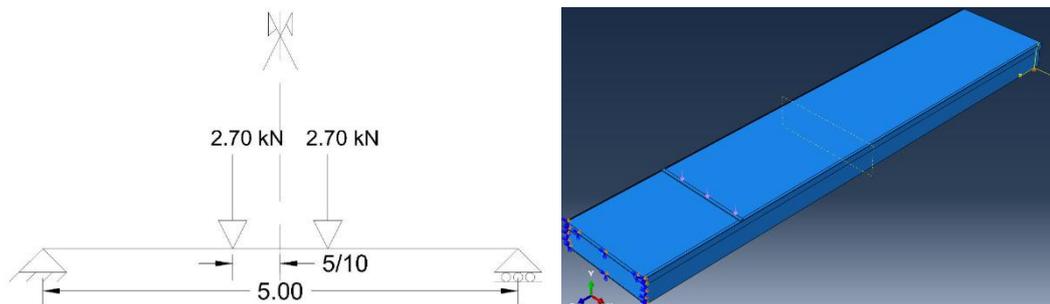


Figura 6.12 – Configuração de ensaio do Caso 3 iv).

## 6.4 Resultados e análise

### 6.4.1 Caso 1

A Tabela 6.7 resume os resultados obtidos em termos flecha a meio vão, tensões normais máximas nas camadas de SCSFRMC e GFRP e tensão máxima de corte no PIR para o caso 1.

Tabela 6.7 – Propriedades do Caso 1 determinadas através do modelo numérico.

<b>Caso 1</b>		
<b>Deslocamento máximo a meio vão</b>	-9.46	mm
<b>Relação d/L</b>	1/528.5	
<b>Tensão máxima no SCSFRMC</b>	-3.63	MPa
<b>Tensão máxima no GFRP</b>	10.38	MPa
<b>Tensão máxima de corte no PIR</b>	-2.86	kPa

A Figura 6.13 apresenta a evolução dos deslocamentos verticais (na direção Y) do painel sanduíche. Tal como esperado, os deslocamentos são uniformes na espessura e crescem na direção longitudinal do painel, crescendo dos apoios para o meio vão. O valor máximo observado foi de 9.46 mm.

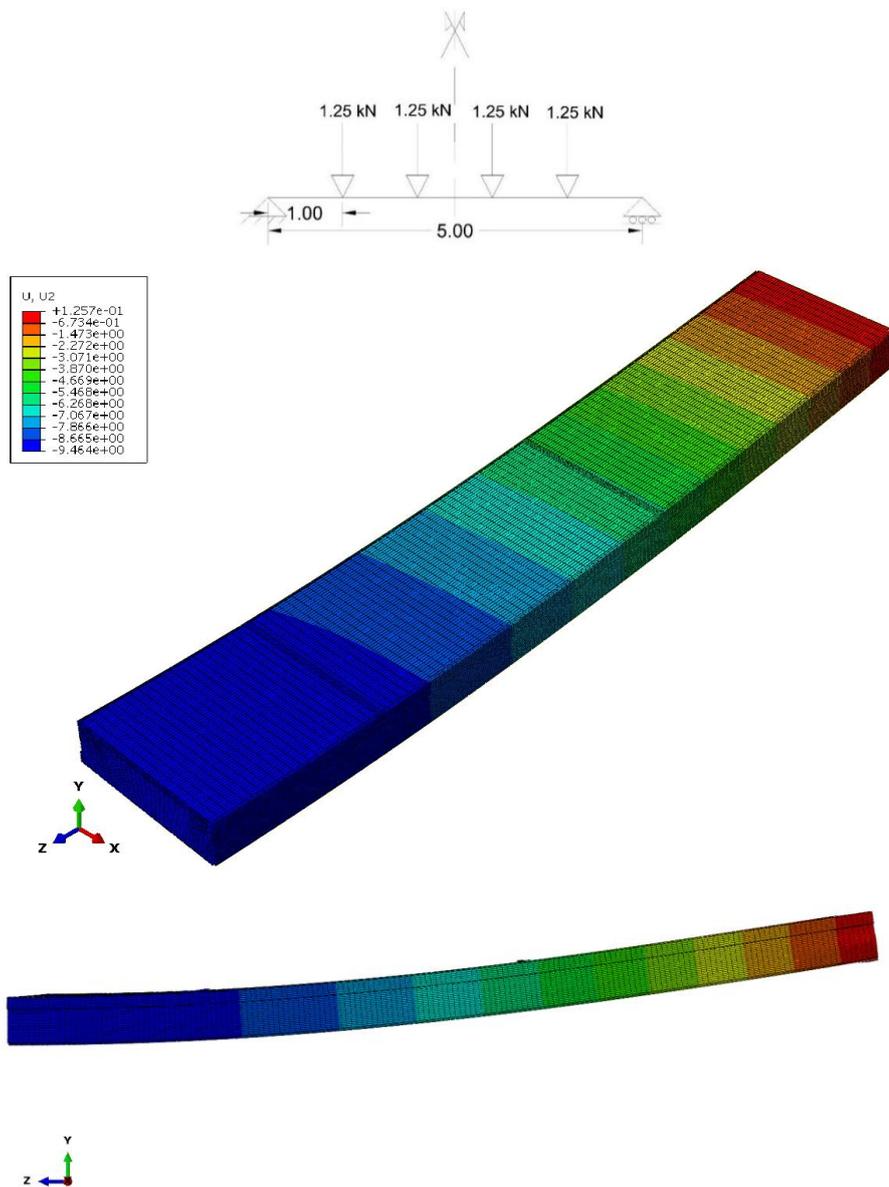


Figura 6.13 – Deformada do Caso 1 e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm].

A Figura 6.14 e Figura 6.15 apresentam as tensões normais na direção longitudinal no SCSFRMC e GFRP, respetivamente.

No que respeita ao SCSFRMC observa-se que a tensão máxima ocorre junto dos pontos de aplicação da carga mais próximos do meio vão, na fibra mais comprimida, tendo-se obtido um valor de 3.63 MPa (compressão). Este valor é significativamente baixo quando comparado com a resistência máxima à compressão do SCSFRMC (41.38 MPa). Observa-se que os resultados não são simétricos em relação ao eixo X, porque o painel sanduíche estudado não é totalmente simétrico em relação ao eixo X (devido ao sistema de ligação por encaixe entre painéis adjacentes) conduzindo a uma ligeira torção do painel, o que se verificou também na deformada.

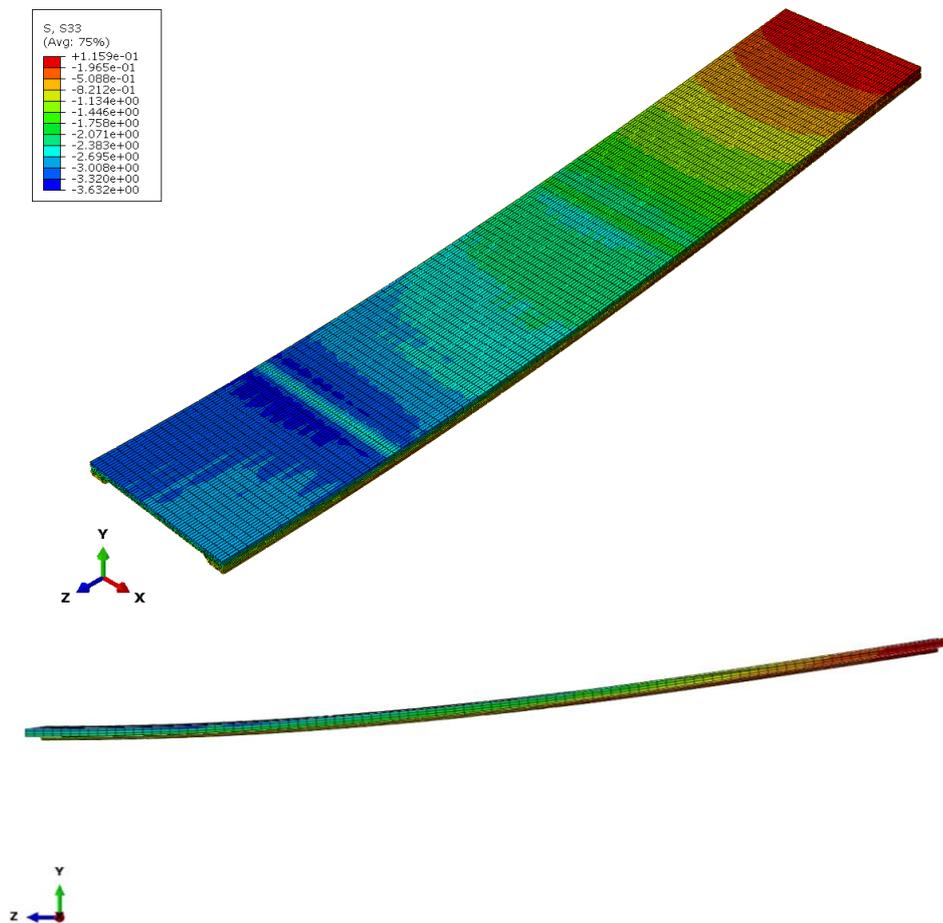


Figura 6.14 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

No que respeita à distribuição de tensões normais no GFRP, verificando-se que a tensão máxima ocorre na zona de meio vão, onde o momento fletor é máximo, sendo o valor obtido de 10.38 MPa (tração). Comparando este valor com o relativo à resistência máxima à tração do GFRP (310.42 MPa), concluí-se que este valor é bastante baixo.

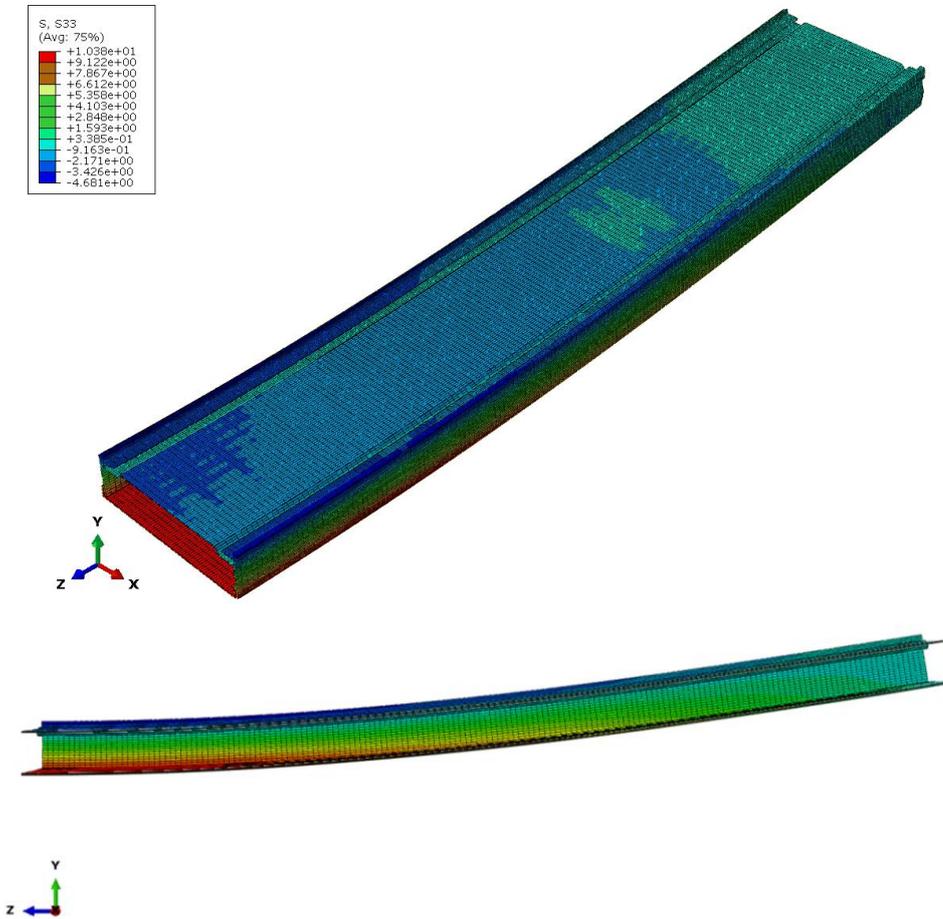


Figura 6.15 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

A Figura 6.16 apresenta a distribuição de tensões de corte (YZ) no PIR. Observa-se que a máxima tensão de corte ocorre junto ao apoio para um valor de 2.86 kPa. Comparando com o relativo à resistência máxima ao corte do PIR (190 kPa), concluí-se que este valor é bastante baixo. Pela observação das tensões no modelo numérico, verifica-se que as tensões de corte no núcleo não são uniformes ao longo da altura do painel, nem ao longo da largura, apresentando valores inferiores junto aos bordos.

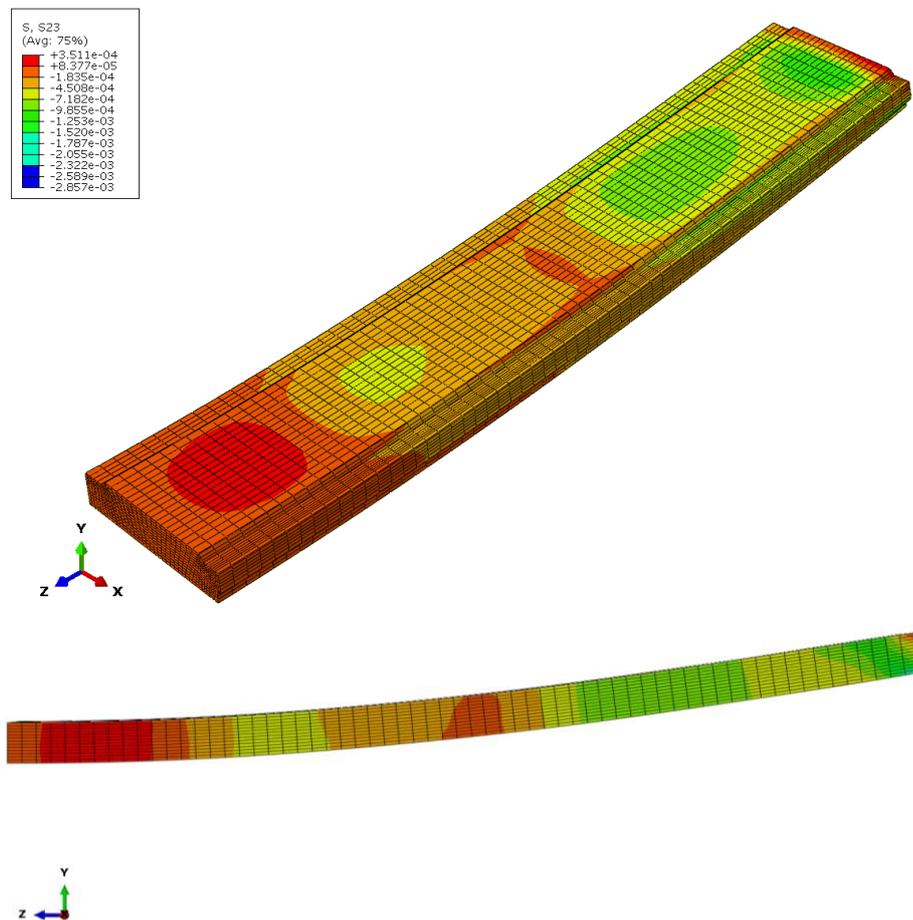


Figura 6.16 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

## 6.4.2 Caso 2

A Tabela 6.8 resume os resultados obtidos em termos flecha a meio vão, tensões normais máximas no SCSFRMC e GFRP e tensão máxima de corte no PIR para o caso 2.

Tabela 6.8 – Propriedades do Caso 2 determinadas através do modelo numérico.

<b>Caso 2</b>	
<b>Deslocamento máximo na secção S2</b>	-0.54 mm
<b>Relação d/L</b>	1/4629.6
<b>Tensão máxima no SCSFRMC:</b>	
- Secção S2	-1.94 MPa
- Secção S1	2.09 MPa
<b>Tensão máxima no GFRP:</b>	
- Secção S2	4.51 MPa
- Secção S1	-6.21 MPa
<b>Tensão máxima de corte no PIR:</b>	
- Apoio AP1	-0.716 kPa
- Apoio AP2	0.617 kPa

A Figura 6.17 apresenta a evolução dos deslocamentos verticais (na direção Y) do painel sanduíche. Tal como esperado, os deslocamentos são uniformes na espessura e crescem na direção longitudinal do painel, crescendo dos apoios para o meio vão. O máximo é verificado a meio vão na secção S2, tal como espectável, conduzindo a um valor de 0.54 mm. É de realçar que no Caso 2 foi colocado um apoio simples na zona central do painel, logo os valores de deslocamentos obtidos para este caso, foram bastante inferiores aos obtidos para o Caso 1, em cerca de 94%.

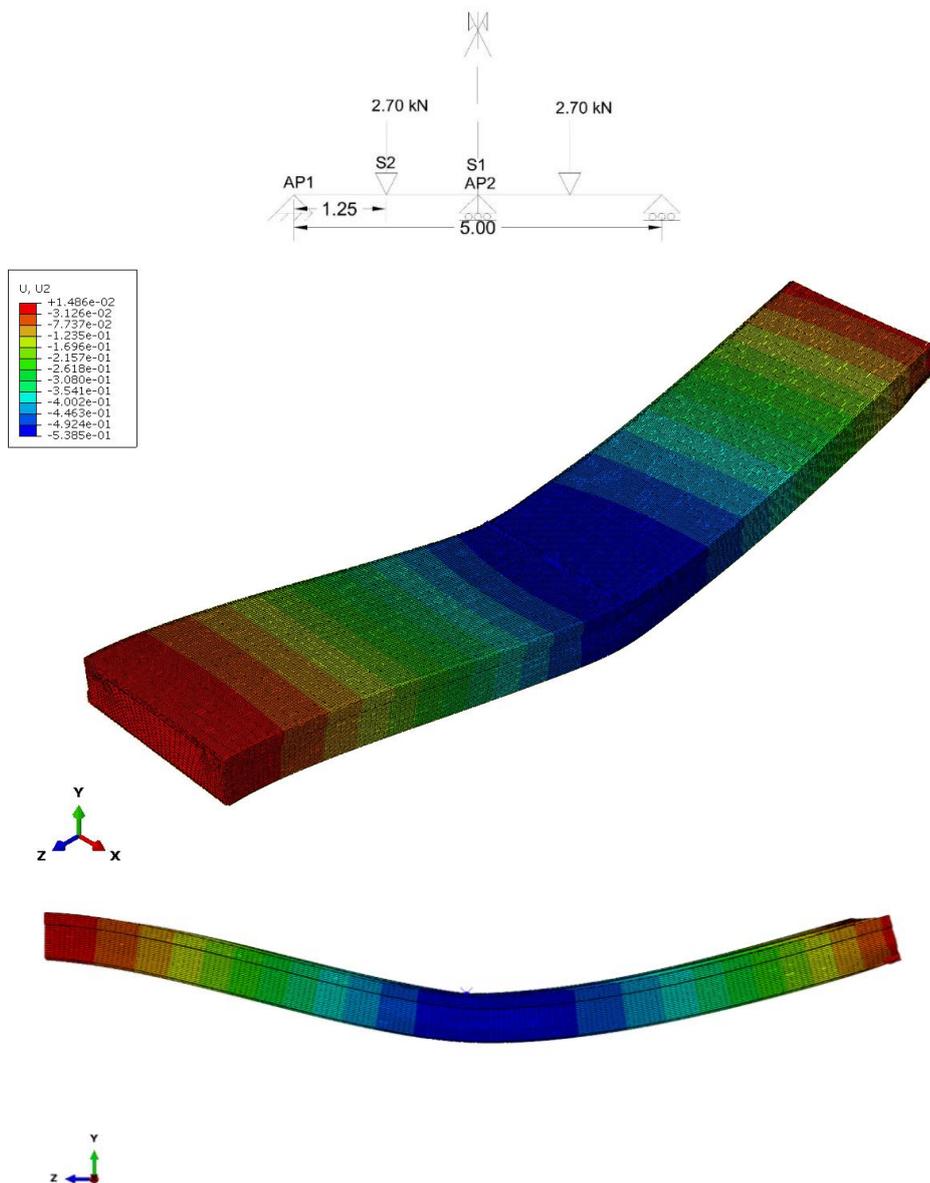


Figura 6.17 – Deformada do Caso 2 e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples correspondente ao final do painel corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm].

A Figura 6.18 e Figura 6.19 apresentam as tensões normais máximas na direção longitudinal, direção principal do painel, nos materiais de SCSFRMC e GFRP constituintes do painel sanduíche híbrido, sendo os valores máximos de 2.09 MPa (tração) e -6.21 MPa (compressão), respectivamente.

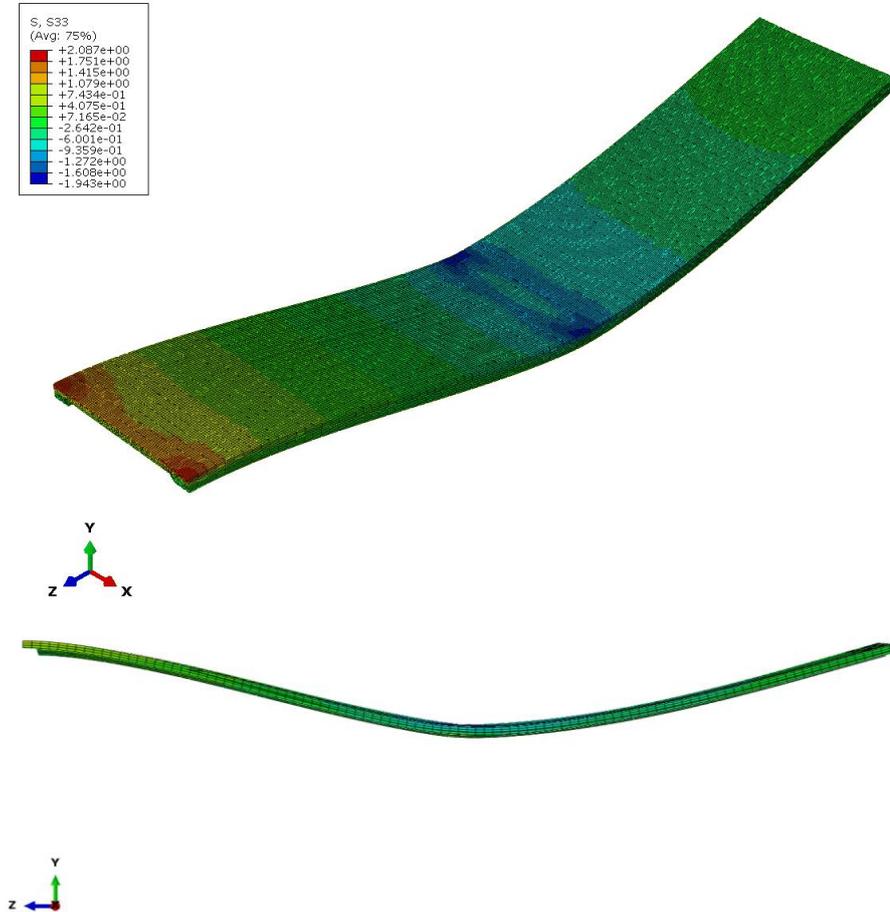


Figura 6.18 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC. Nota: a zona de apoio simples correspondente ao final do painel corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

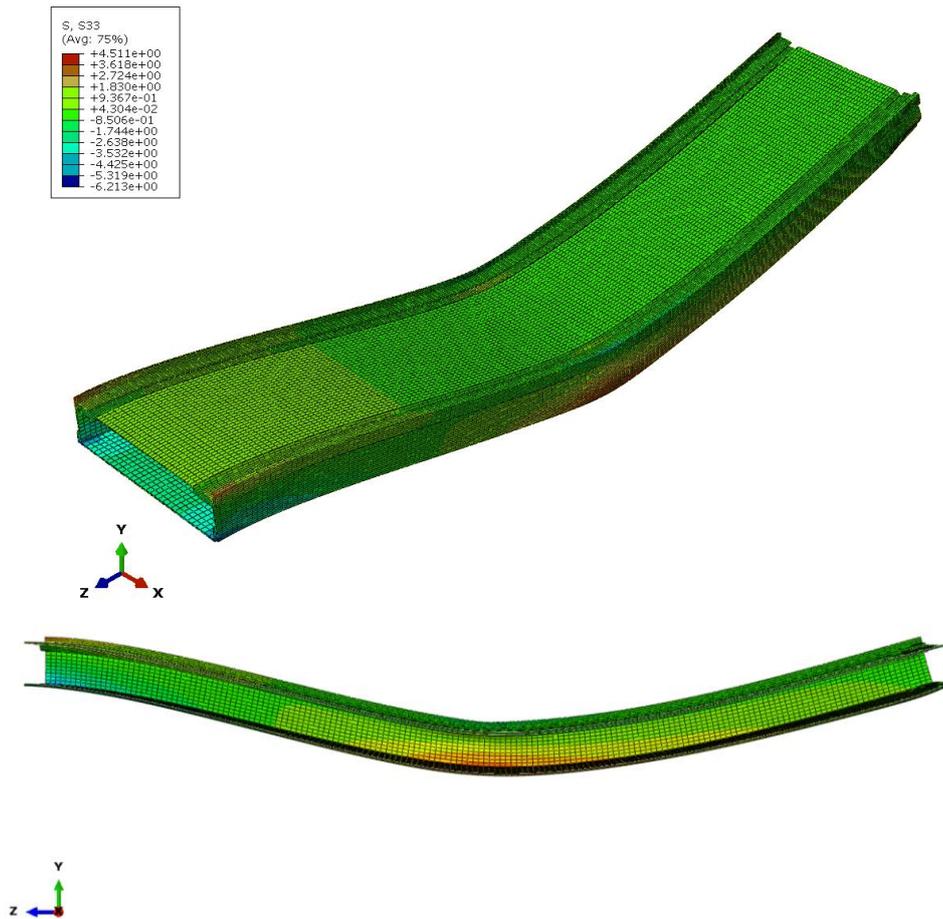


Figura 6.19 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP. Nota: a zona de apoio simples correspondente ao final do painel corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

A Figura 6.20 apresenta a distribuição de tensões de corte no PIR. Observa-se que as máximas tensões de corte ocorrem junto aos apoios. Pela observação das tensões no modelo numérico, verifica-se que as tensões de corte no núcleo não são uniformes ao longo da altura do painel, nem ao longo da largura, apresentando valores inferiores junto aos bordos. Verifica-se um comportamento de corte positivo entre a zona de aplicação de carga e a zona do apoio central e um corte negativo entre a zona de aplicação de carga e a zona do apoio de bordo.

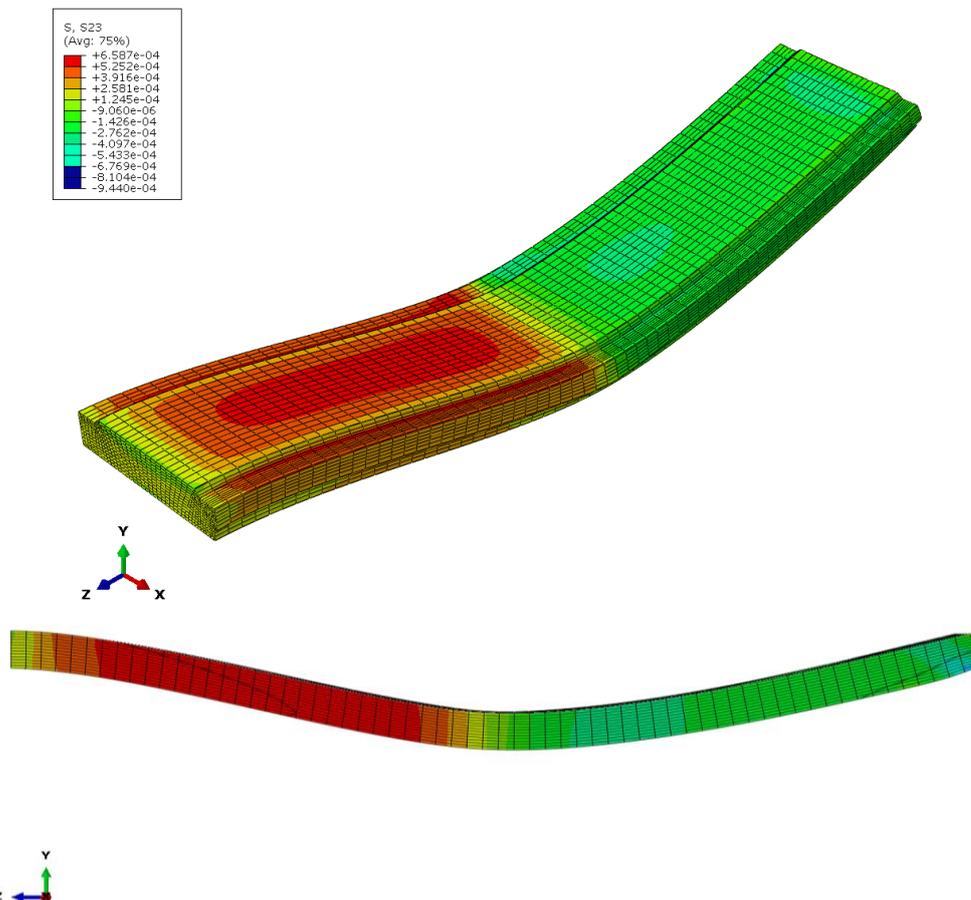


Figura 6.20 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR. Nota: a zona de apoio simples correspondente ao final do painel corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

A não uniformização de tensões ao longo da largura do painel nos elementos constituintes, deve-se principalmente às características geométricas deste, tendo em conta que o painel sanduíche não é simétrico, onde a principal assimetria é apresentada no GFRP nas ligações por encaixe entre painéis adjacentes.

Na Figura 6.21 observa-se que a tensão máxima do SCSFRMC ocorre na secção S1, sendo o valor de 2.09 MPa (tração), no entanto o valor obtido na secção S2 é semelhante e foi de 1.94 MPa (compressão). Estes valores são significativamente baixos quando comparados com a resistência máxima à tração (6.17 MPa) e compressão (41.38 MPa) do SCSFRMC.

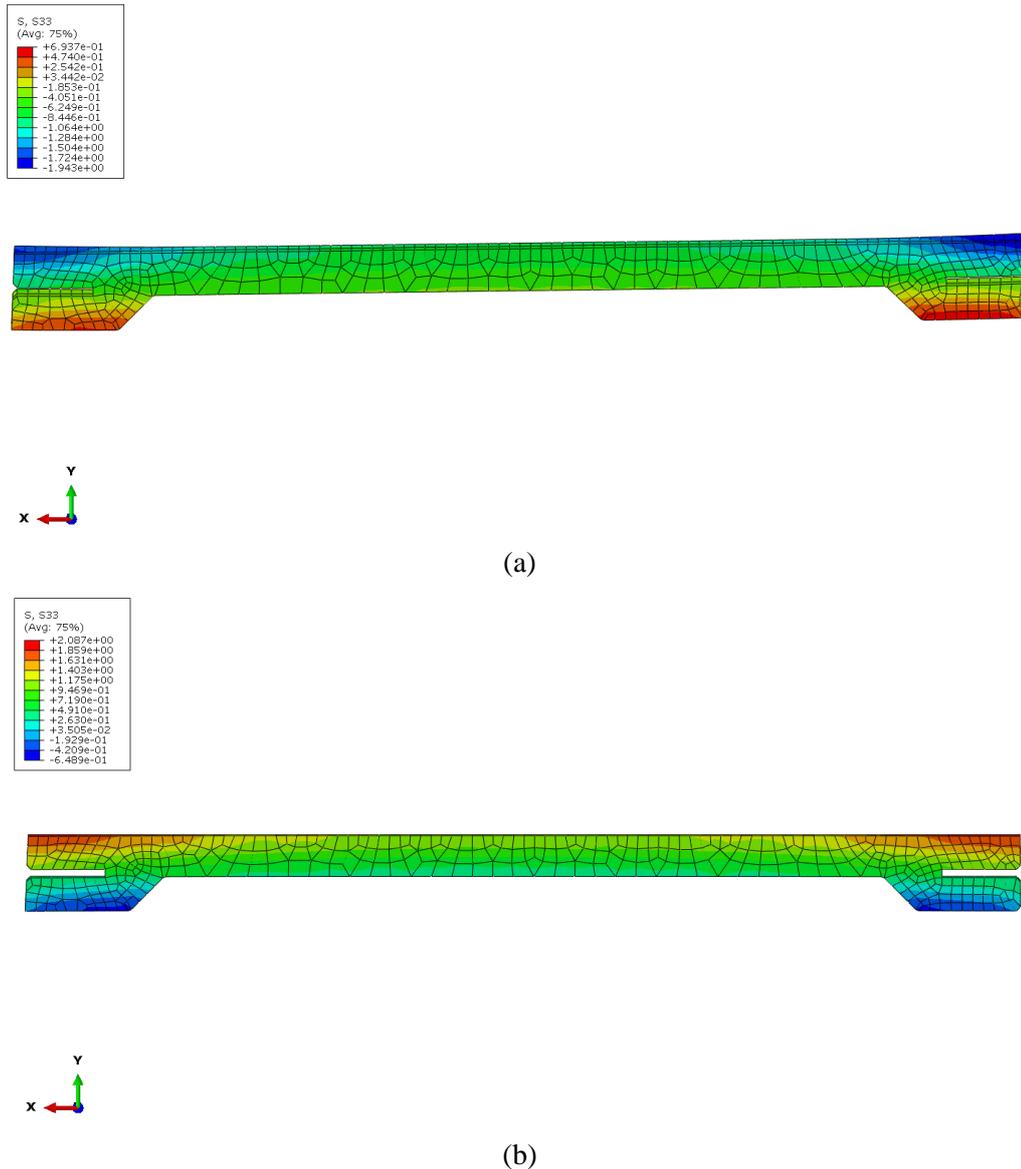


Figura 6.21 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC: (a) Secção S2 e (b) Secção S1; Nota: valores na escala encontram-se em [MPa].

A Figura 6.22 apresenta a distribuição de tensões normais no GFRP, quer na secção S2 como na secção S1. A tensão máxima ocorre em S1 e é igual a -6.21 MPa (compressão) e em S2 o valor da tensão máxima é igual a 4.51 MPa (tração). As zonas de ligação entre painéis consecutivos são os locais onde ocorrem maiores esforços no GFRP. Estes valores são significativamente baixos quando comparados com a resistência máxima à compressão e à tração (310.42 MPa) do GFRP.

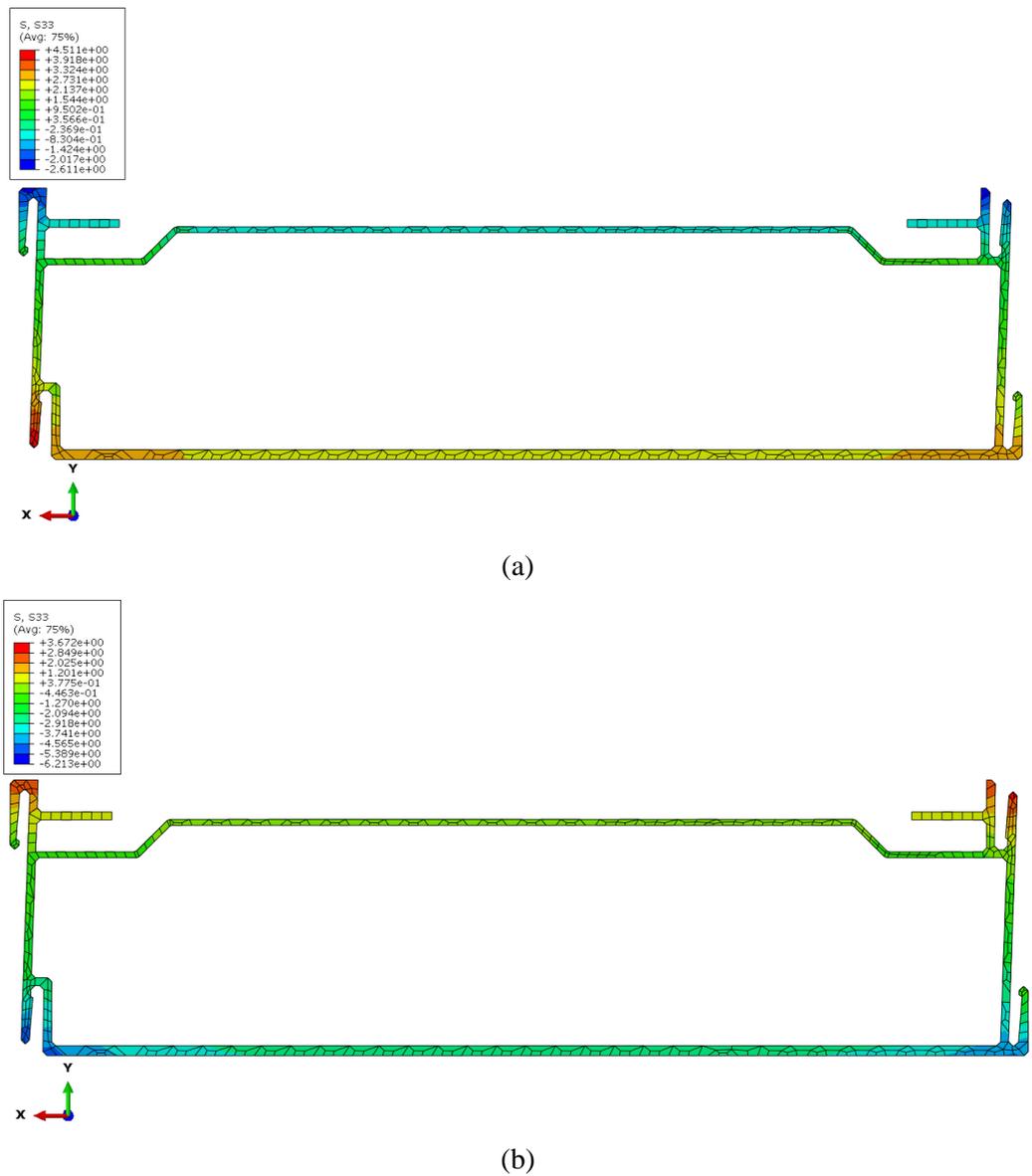
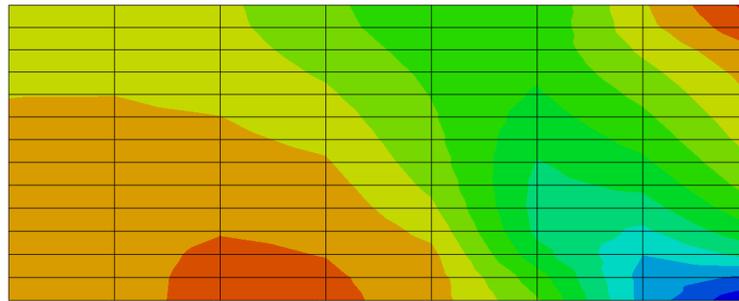
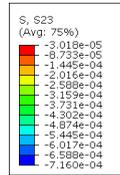
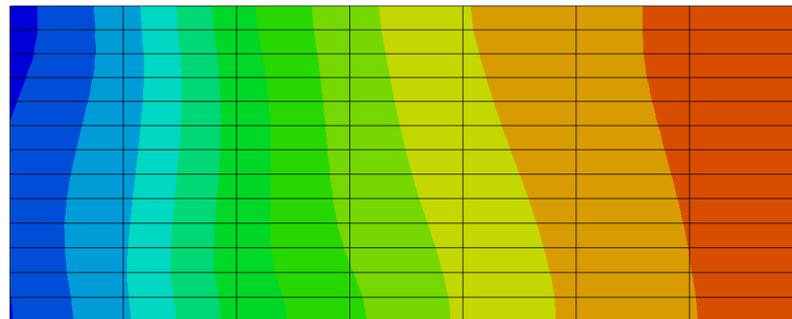
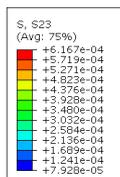


Figura 6.22 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP: (a) Secção S2 e (b) Secção S1; Nota: valores na escala encontram-se em [MPa].

A Figura 6.23 apresenta a distribuição de tensões de corte no núcleo (PIR). Junto ao apoio AP1 a tensão de corte máxima foi igual a -0.716 kPa e junto ao apoio AP2 foi igual a 0.617 kPa. Comparando estes valores com os relativos à resistência máxima ao corte do PIR (190 kPa), conclui-se que estes valores são bastante baixos.



(a)



(b)

Figura 6.23 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR: (a) apoio AP1 e (b) apoio AP2. Nota: valores na escala encontram-se em [MPa].

### 6.4.3 Caso 3

#### 6.4.3.1 Caso 3 i)

A Tabela 6.9 resume os resultados obtidos em termos flecha a meio vão, tensões normais máximas no SCSFRMC e GFRP e tensão máxima de corte no PIR para o caso 3 i).

Tabela 6.9 – Propriedades do Caso 3 i) determinadas através do modelo numérico.

<b>Caso 3 i)</b>	
<b>Deslocamento máximo</b>	-9.46 mm
<b>Relação d/L</b>	1/528.5
<b>Tensão máxima no SCSFRMC</b>	-4.18 MPa
<b>Tensão máxima no GFRP</b>	9.95 MPa
<b>Tensão máxima de corte no PIR</b>	-3.30 kPa

A Figura 6.24 apresenta a evolução dos deslocamentos verticais (na direção Y) do painel sanduíche. Tal como esperado, os deslocamentos são uniformes na espessura e crescem na direção longitudinal do painel, crescendo dos apoios para o meio vão. O máximo é verificado a meio vão conduzindo a um valor de 9.46 mm.

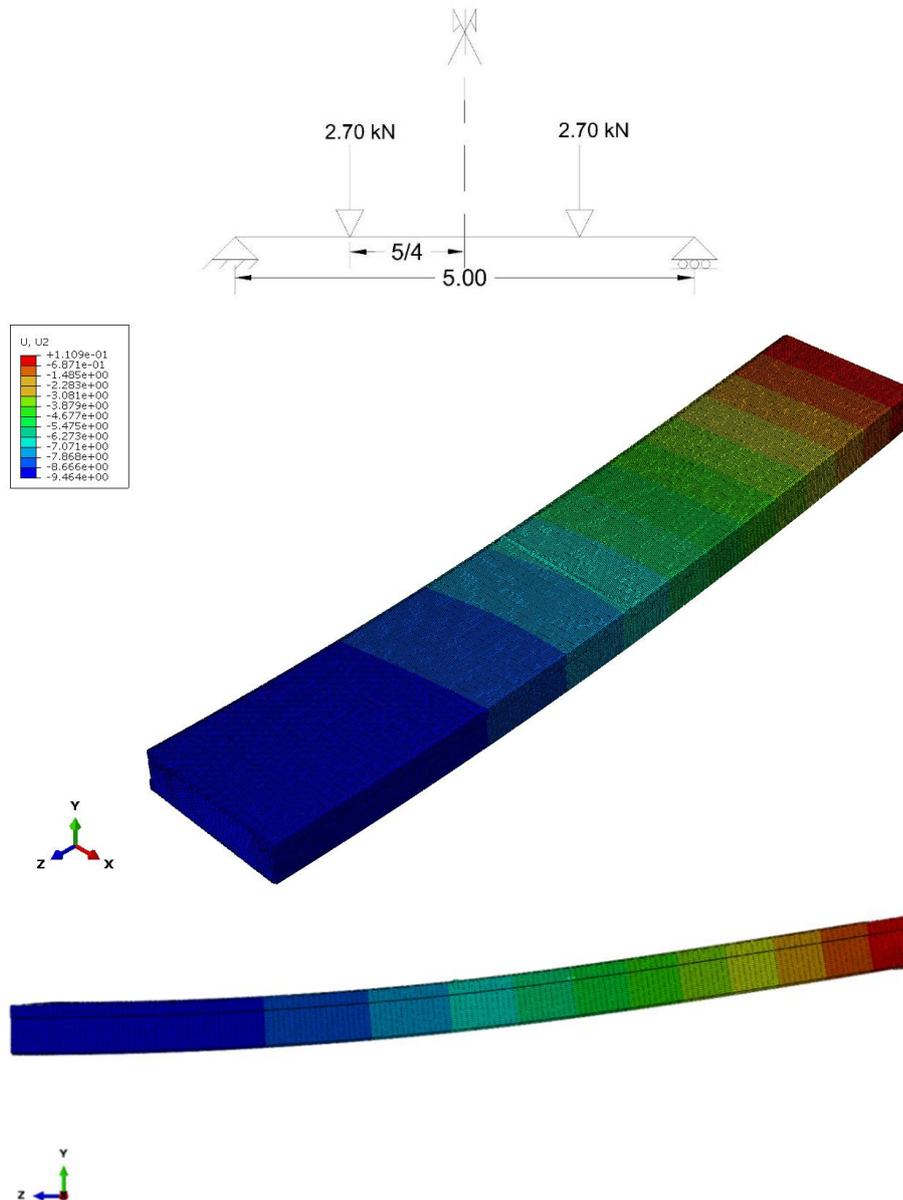


Figura 6.24 – Deformada do Caso 3 i) e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm].

A Figura 6.25 e Figura 6.26 apresentam as tensões normais na direção longitudinal no SCSFRMC e GFRP constituintes do painel sanduíche híbrido, sendo os valores máximos de -4.18 MPa (compressão) e 9.95 MPa (tração), respetivamente. Analisando as tensões instaladas no SCSFRMC e no GFRP pode concluir-se que existe uma concentração localizada de tensões junto às zonas de aplicação de carga, o que se verifica igualmente para os restantes estudos paramétricos do Caso 3. Estes valores são significativamente baixos quando comparados com a resistência máxima à compressão do SCSFRMC (41.38 MPa) e resistência máxima à tração do GFRP (310.42 MPa).

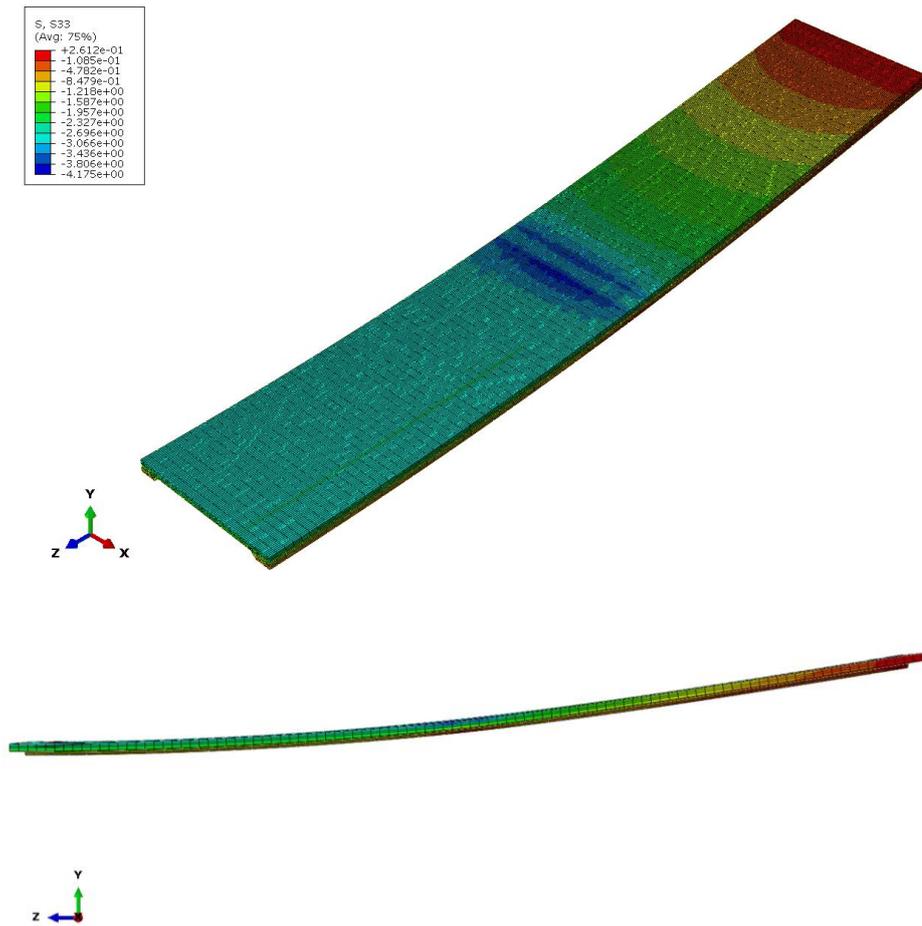
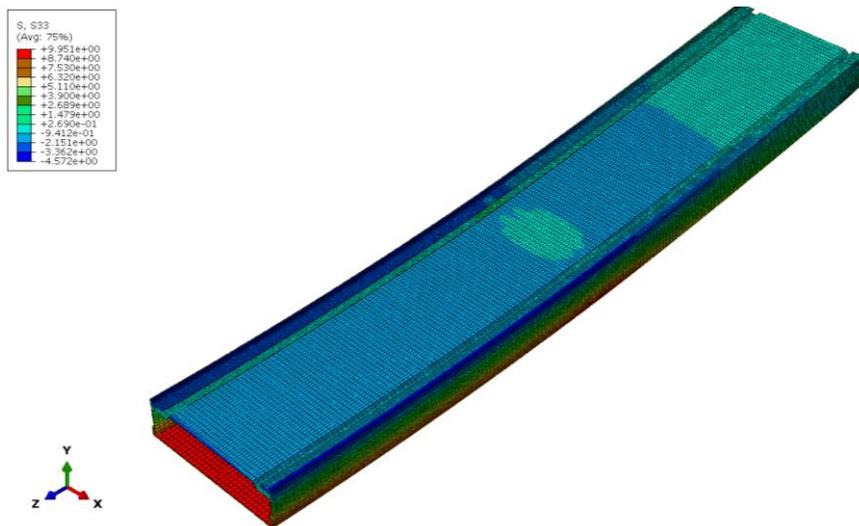


Figura 6.25 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].



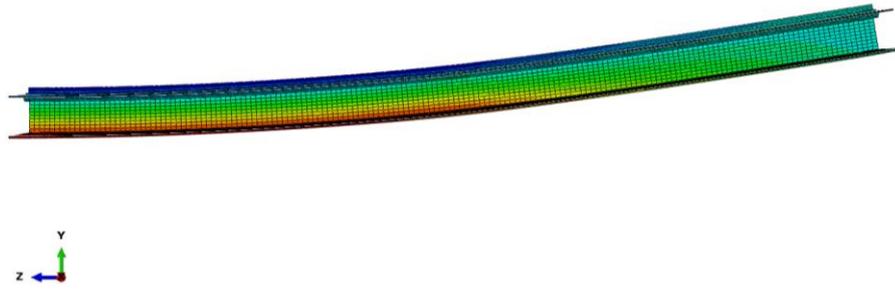


Figura 6.26 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

A Figura 6.27 apresenta a distribuição de tensões de corte no PIR. Observa-se que a máxima tensão de corte ocorre para o valor de  $-3.30 \text{ kPa}$ . Comparando este valor com o relativo à resistência máxima ao corte do PIR ( $190 \text{ kPa}$ ), conclui-se que este valor é bastante baixo. Pela observação das tensões no modelo numérico, verifica-se que as tensões de corte no núcleo são aproximadamente uniformes ao longo da altura do painel. Analisando o comportamento, conclui-se qual a zona onde foi aplicada a carga, devido à concentração de tensões apresentada. Os reforços laterais (GFRP) absorvem uma parte significativa dos esforços de corte, sendo estes inferiores junto aos bordos do núcleo. Este comportamento foi observado nos restantes estudos paramétricos do Caso 3.

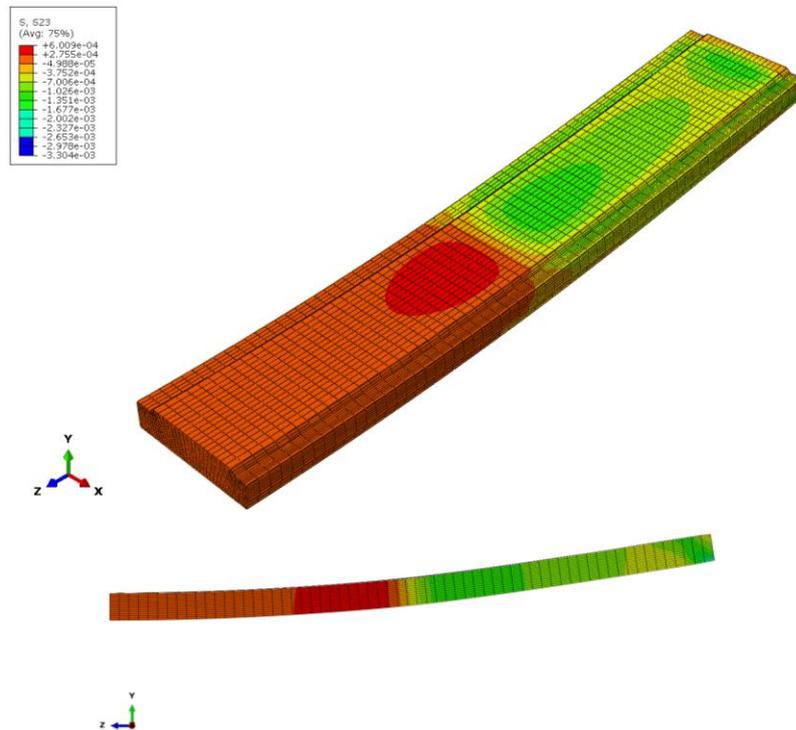


Figura 6.27 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

### 6.4.3.2 Caso 3 ii)

A Tabela 6.10 resume os resultados obtidos em termos flecha a meio vão, tensões normais máximas no SCSFRMC e GFRP e tensão máxima de corte no PIR para o caso 3 ii).

Tabela 6.10 – Propriedades do Caso 3 ii) determinadas através do modelo numérico.

<b>Caso 3 ii)</b>	
<b>Deslocamento máximo</b>	-11.73 mm
<b>Relação d/L</b>	1/426.3
<b>Tensão máxima no SCSFRMC</b>	-5.13 MPa
<b>Tensão máxima no GFRP</b>	12.83 MPa
<b>Tensão máxima de corte no PIR</b>	-3.30 kPa

A Figura 6.28 apresenta a evolução dos deslocamentos verticais (na direção Y) do painel sanduíche. Tal como esperado, os deslocamentos são uniformes na espessura e crescem na direção longitudinal do painel, crescendo dos apoios para o meio vão. O máximo é verificado a meio vão tal, conduzindo a um valor de 11.73 mm superior ao Caso 3 i) cerca de 19.32 %.

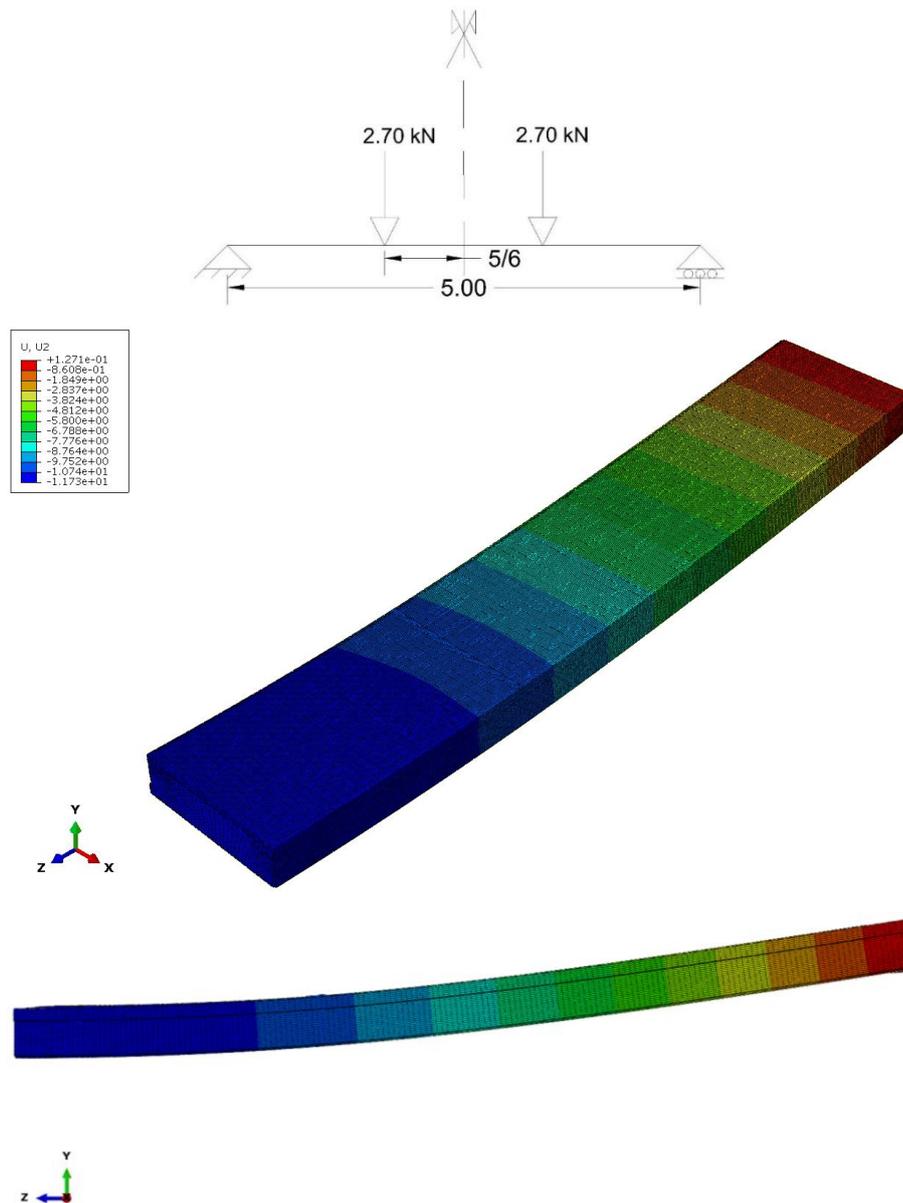


Figura 6.28 – Deformada do Caso 3 ii) e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm].

A Figura 6.29 e Figura 6.30 apresentam as tensões normais na direção longitudinal, nos materiais de SCSFRMC e GFRP constituintes do painel sanduíche híbrido, sendo os valores máximos de -5.13 MPa (compressão) e 12.83 MPa (tração), respetivamente. Estes valores são significativamente baixos quando comparados com a resistência máxima à compressão do SCSFRMC (41.38 MPa) e resistência máxima à tração do GFRP (310.42 MPa).

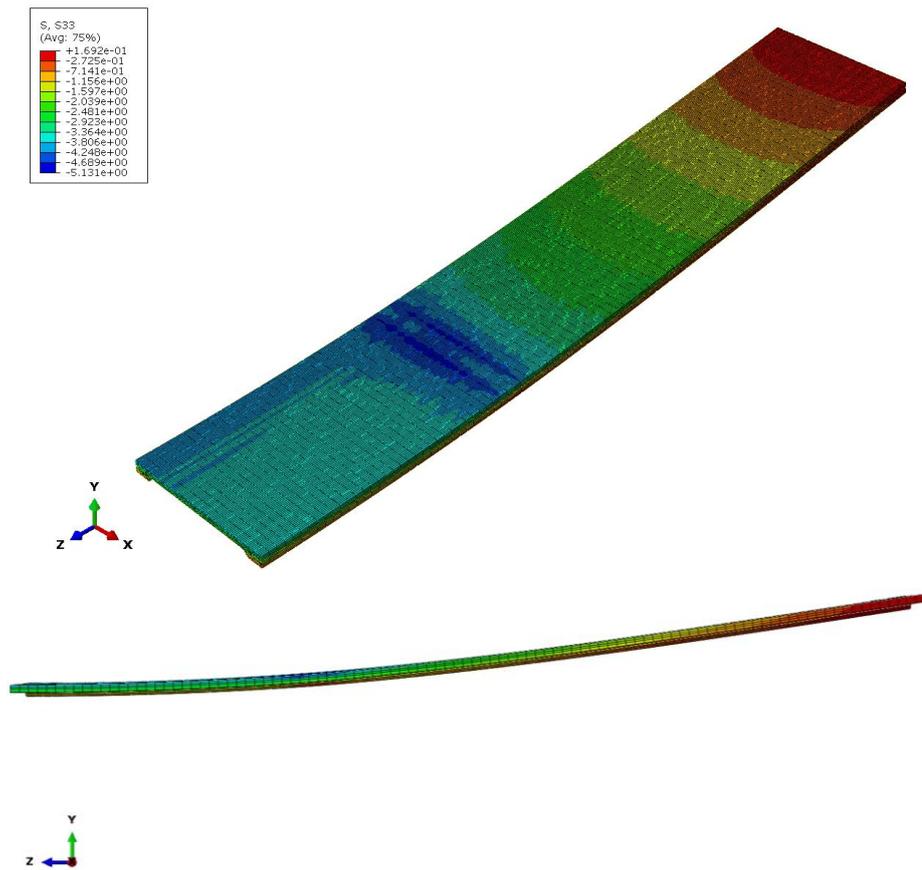
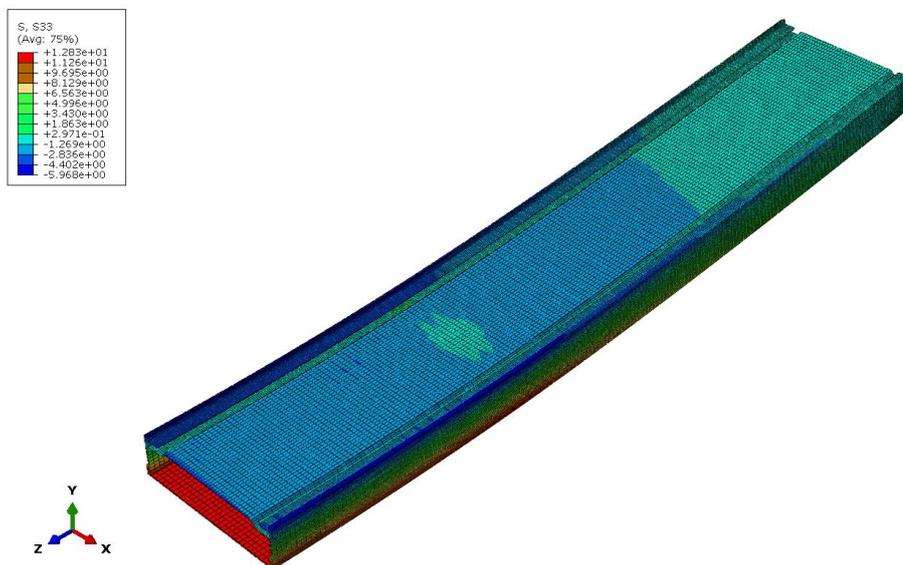


Figura 6.29 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].



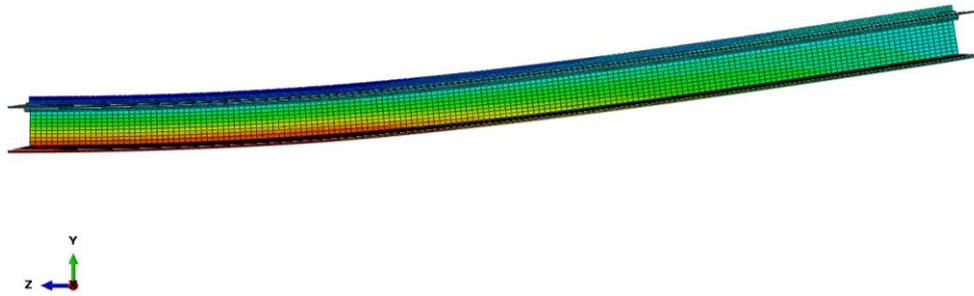


Figura 6.30 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

A Figura 6.31 apresenta a distribuição de tensões de corte no PIR. Observa-se que a máxima tensão de corte ocorre para o valor de -3.30 kPa. Comparando este valor com o relativo à resistência máxima ao corte do PIR (190 kPa), concluí-se que este valor é bastante baixo.

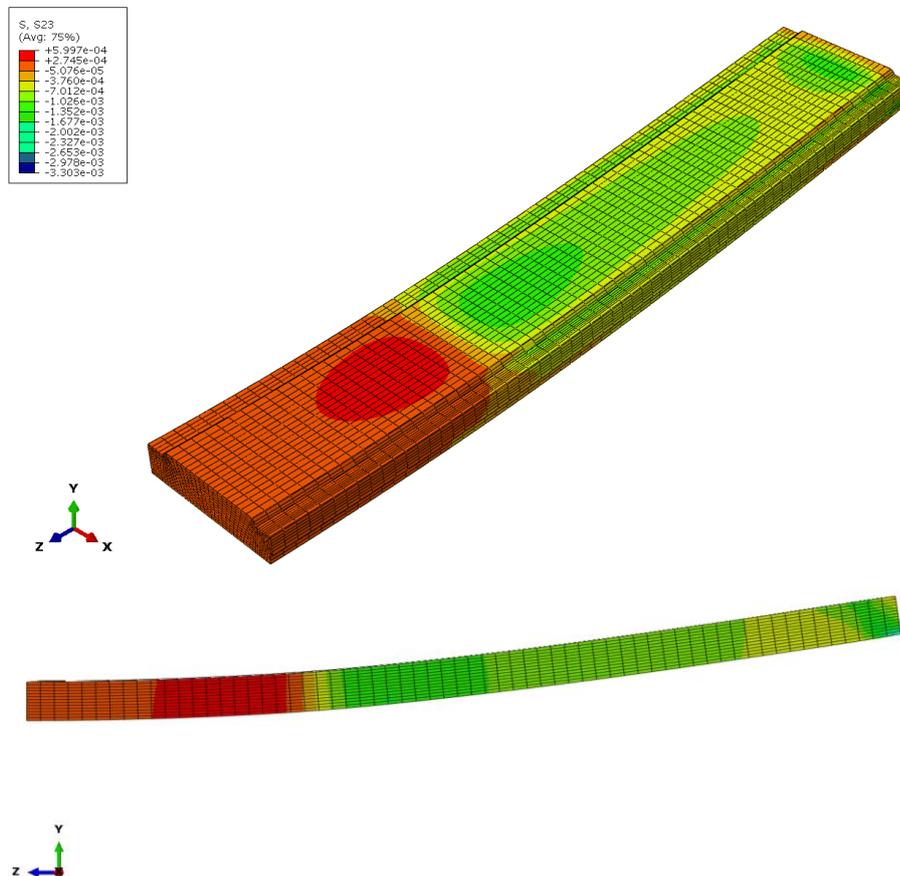


Figura 6.31 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

### 6.4.3.3 Caso 3 iii)

A Tabela 6.11 resume os resultados obtidos em termos flecha a meio vão, tensões normais máximas no SCSFRMC e GFRP e tensão máxima de corte no PIR para o caso 3 iii).

Tabela 6.11 – Propriedades do Caso 3 iii) determinadas através do modelo numérico.

<b>Caso 3 iii)</b>	
<b>Deslocamento máximo</b>	-12.59 mm
<b>Relação d/L</b>	1/397.1
<b>Tensão máxima no SCSFRMC</b>	-5.49 MPa
<b>Tensão máxima no GFRP</b>	14.22 MPa
<b>Tensão máxima de corte no PIR</b>	-3.30 kPa

A Figura 6.32 apresenta a evolução dos deslocamentos verticais (na direção Y) do painel sanduíche. Tal como esperado, os deslocamentos são uniformes na espessura e crescem na direção longitudinal do painel, crescendo dos apoios para o meio vão. O máximo é verificado a meio vão tal, conduzindo a um valor de 12.59 mm superior ao Caso 3 ii) cerca de 6.83 %.

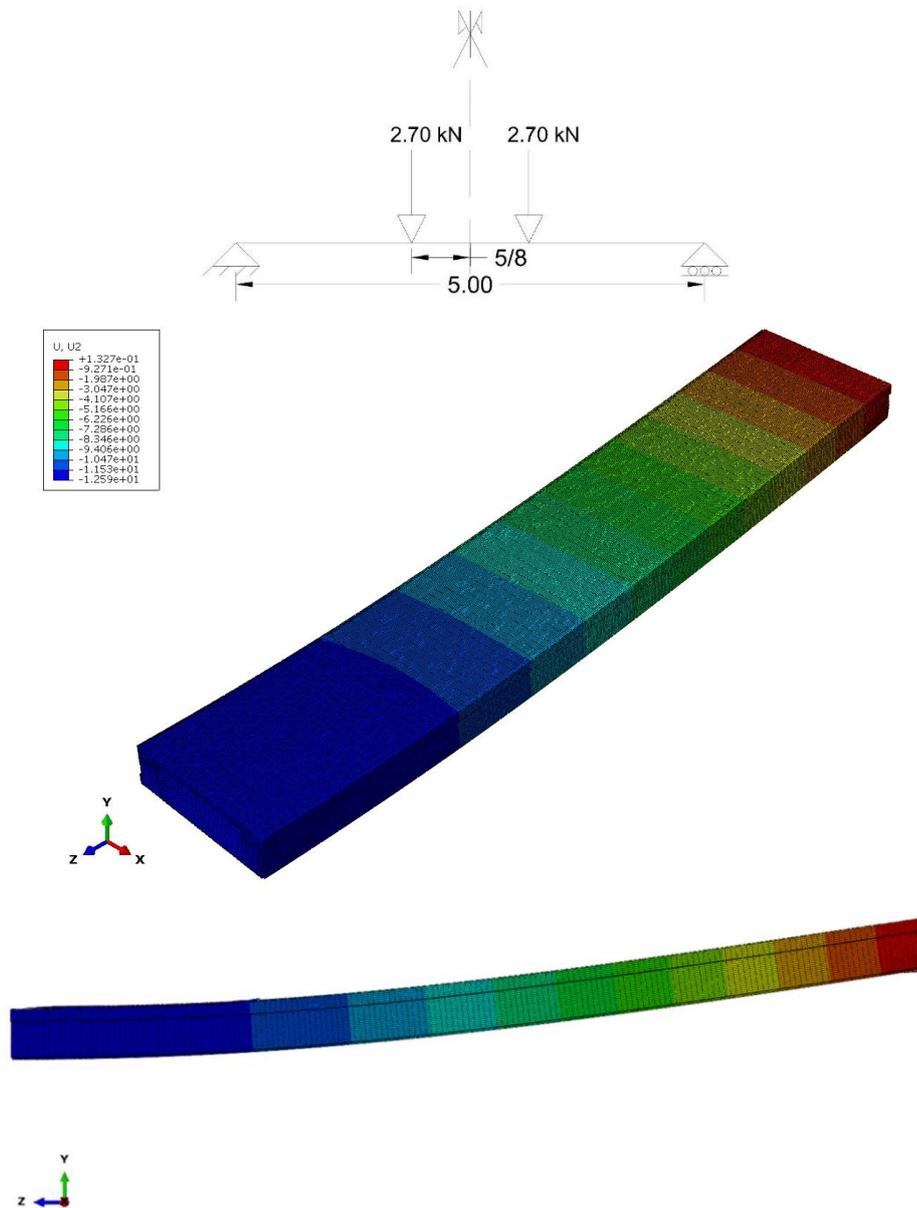


Figura 6.32 – Deformada do Caso 3 iii) e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm].

A Figura 6.33 e Figura 6.34 apresentam as tensões normais máximas na direção longitudinal no SCSFRMC e GFRP constituintes do painel sanduíche híbrido, sendo os valores máximos de -5.49 MPa (compressão) e 14.22 MPa (tração), respetivamente. Estes valores são significativamente baixos quando comparados com a resistência máxima à compressão do SCSFRMC (41.38 MPa) e resistência máxima à tração do GFRP (310.42 MPa).

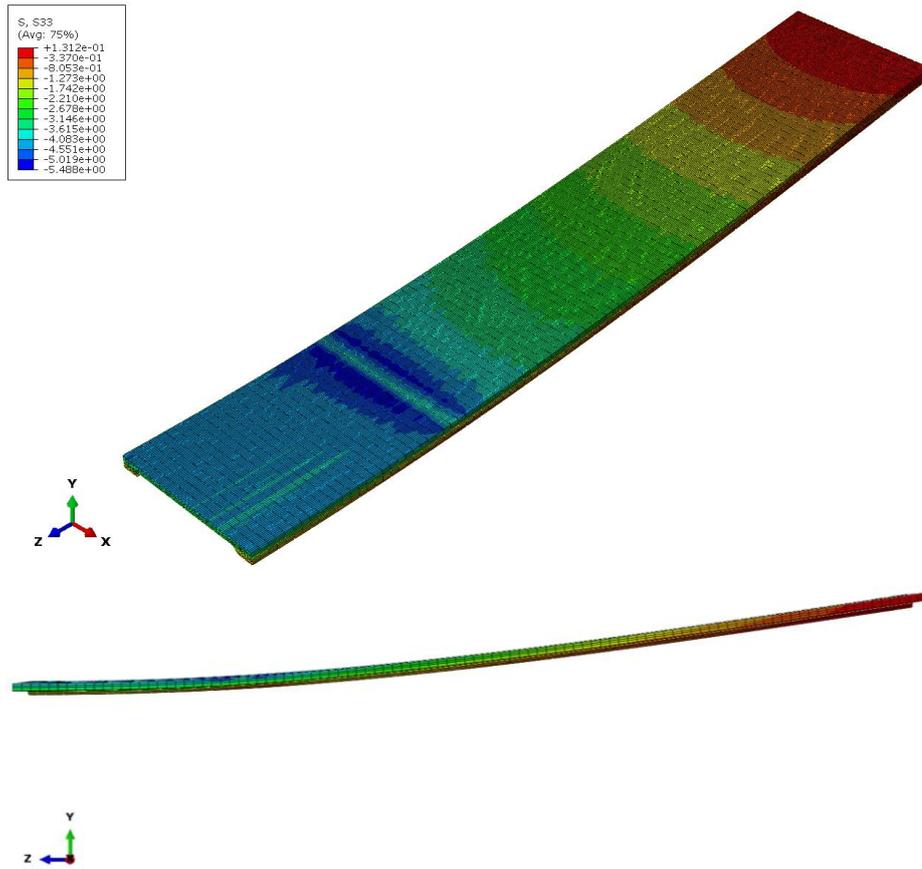
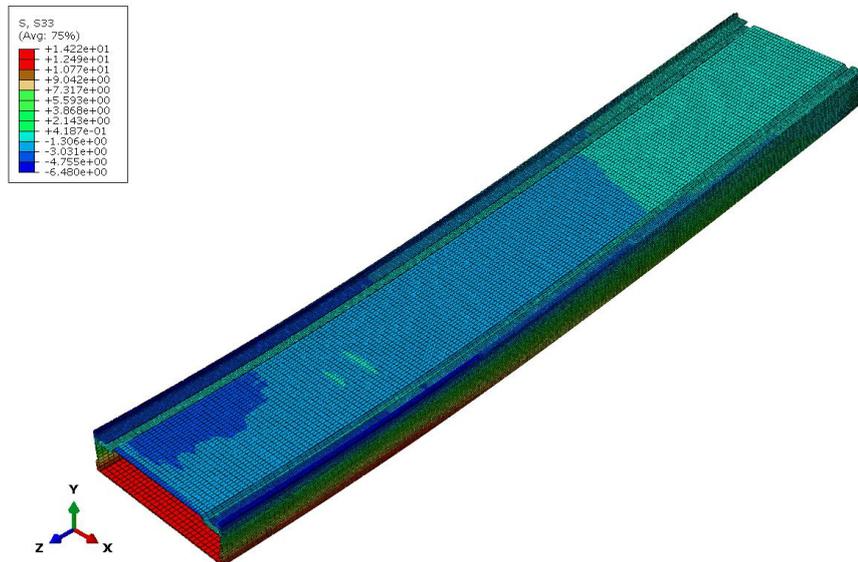


Figura 6.33 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].



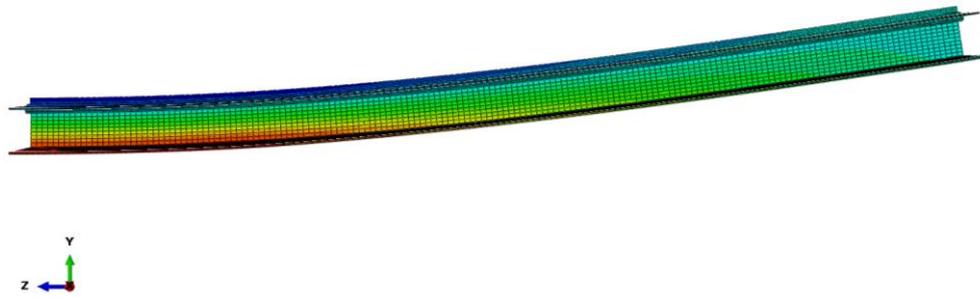


Figura 6.34 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

A Figura 6.35 apresenta a distribuição de tensões de corte no PIR. Observa-se que a máxima tensão de corte ocorre para o valor de -3.30 kPa. Comparando este valor com o relativo à resistência máxima ao corte do PIR (190 kPa), conclui-se que este valor é bastante baixo.

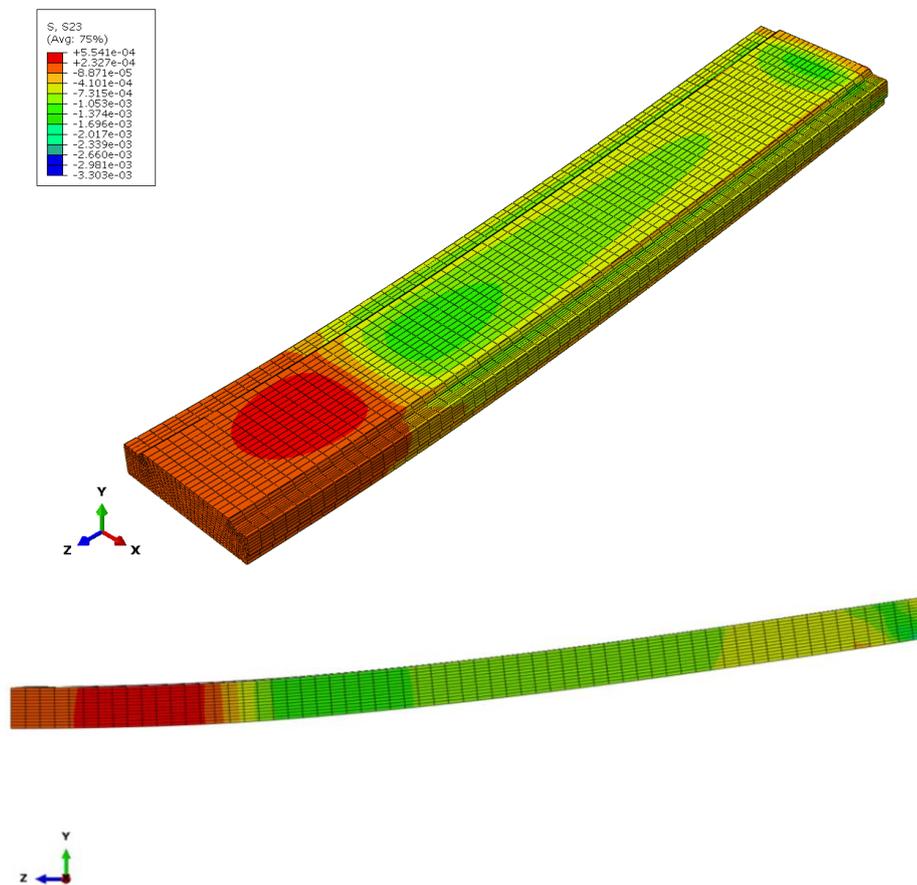


Figura 6.35 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

#### 6.4.3.4 Caso 3 iv)

A Tabela 6.12 resume os resultados obtidos em termos flecha a meio vão, tensões normais máximas no SCSFRMC e GFRP e tensão máxima de corte no PIR para o caso 3 iv).

Tabela 6.12 – Propriedades do Caso 3 iv) determinadas através do modelo numérico.

<b>Caso 3 iv)</b>	
<b>Deslocamento máximo</b>	-13.00 mm
<b>Relação d/L</b>	1/384.6
<b>Tensão máxima no SCSFRMC</b>	-5.81 MPa
<b>Tensão máxima no GFRP</b>	15.14 MPa
<b>Tensão máxima de corte no PIR</b>	-3.30 kPa

A Figura 6.36 apresenta a evolução dos deslocamentos verticais (na direção Y) do painel sanduíche. Tal como esperado, os deslocamentos são uniformes na espessura e crescem na direção longitudinal do painel, crescendo dos apoios para o meio vão. O máximo é verificado a meio vão conduzindo a um valor de 13.00 mm superior ao Caso 3 iii) cerca de 3.15 %.

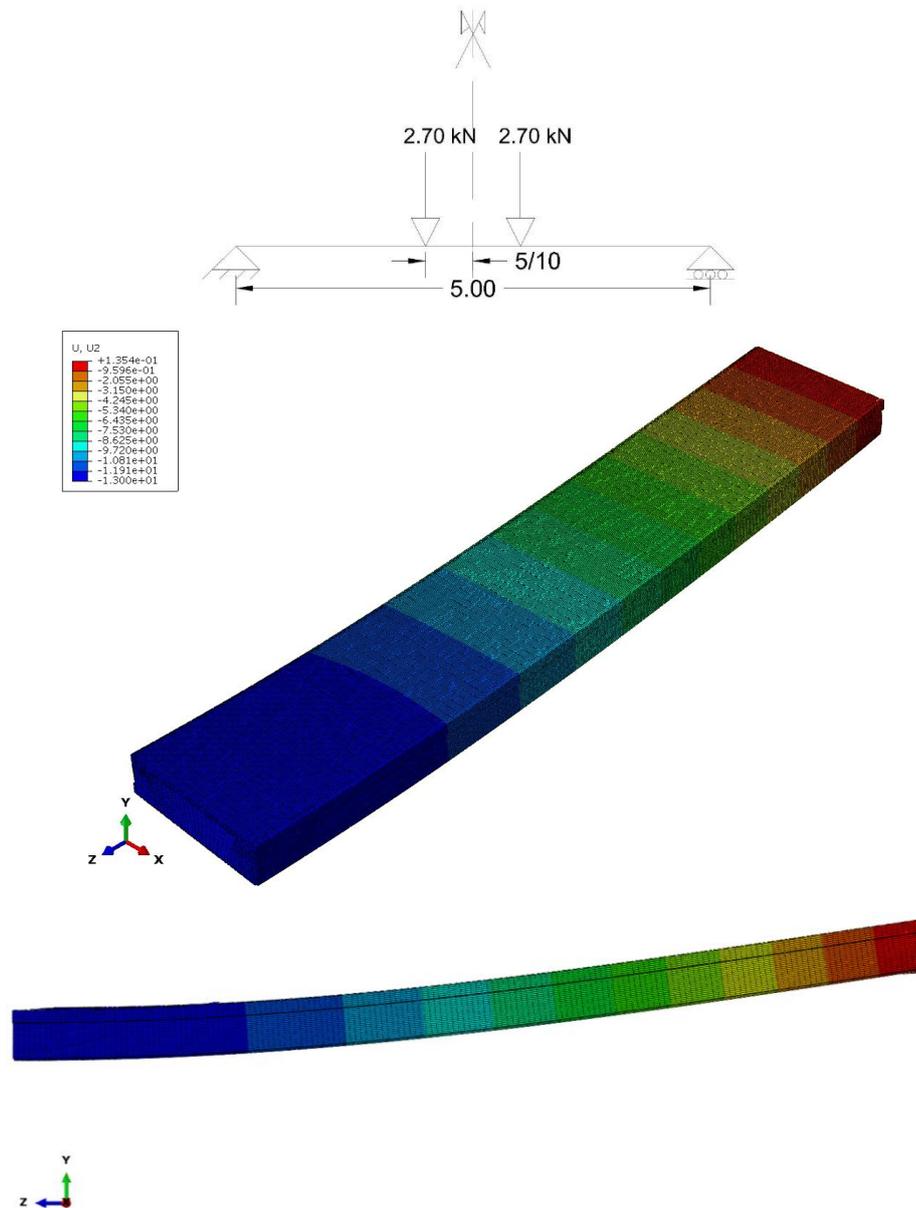


Figura 6.36 – Deformada do Caso 3 iv) e deslocamentos na direção Y. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [mm].

A Figura 6.37 e Figura 6.38 apresentam as tensões normais máximas na direção longitudinal, direção principal do painel, nos materiais de SCSFRMC e GFRP constituintes do painel sanduíche híbrido, sendo os valores máximos de -5.81 MPa (compressão) e 15.14 MPa (tração), respetivamente. Estes valores são significativamente baixos quando comparados com a resistência máxima à compressão do SCSFRMC (41.38 MPa) e resistência máxima à tração do GFRP (310.42 MPa).

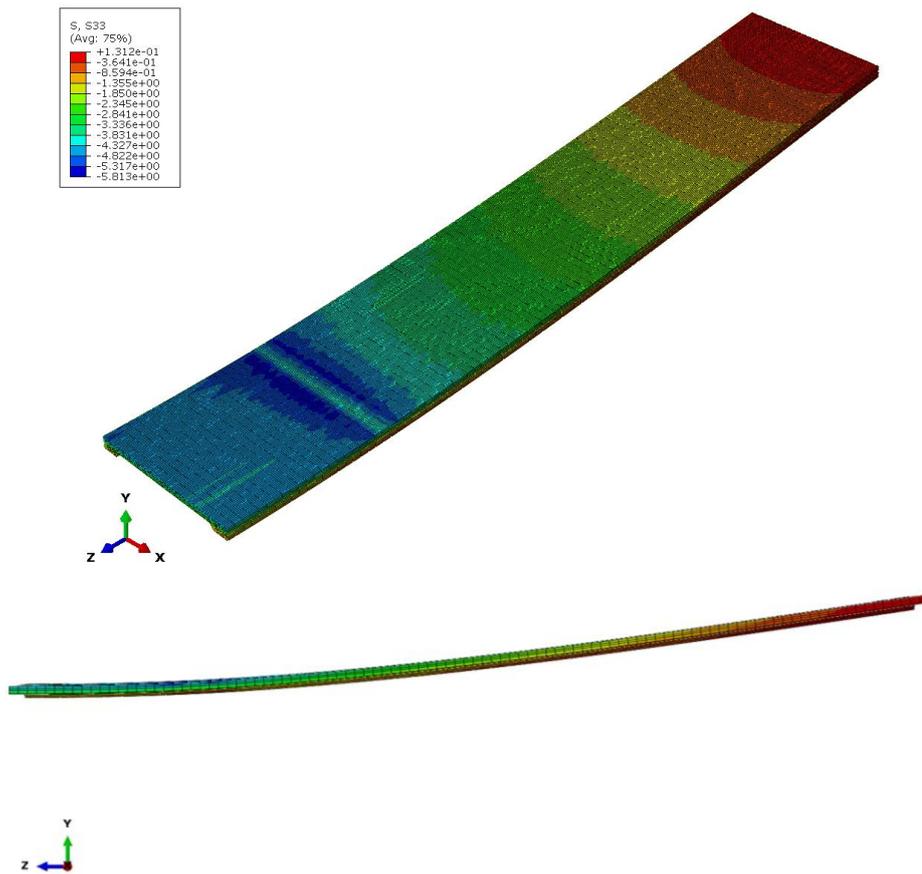
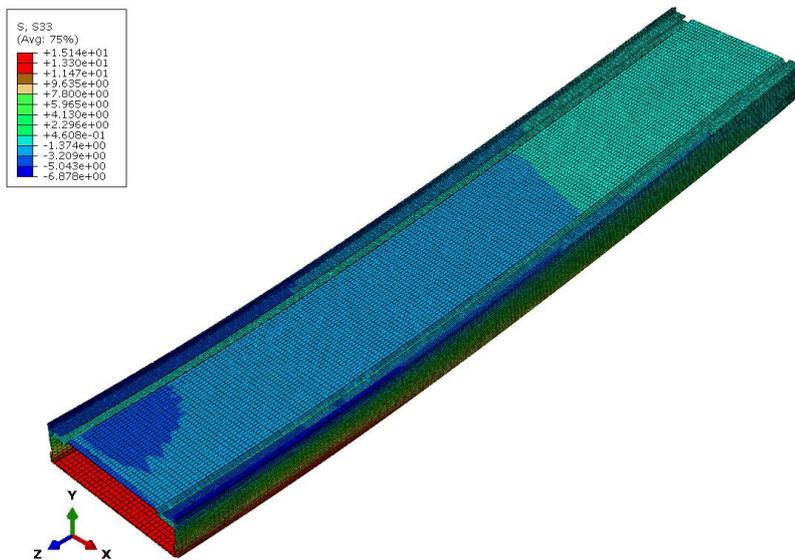


Figura 6.37 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no SCSFRMC. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].



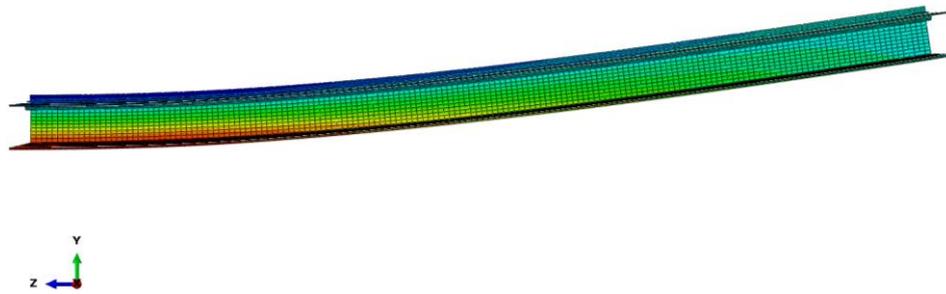


Figura 6.38 – Distribuição das tensões normais na direção Z, no GFRP. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

A Figura 6.39 apresenta a distribuição de tensões de corte no PIR. Observa-se que a máxima tensão de corte ocorre para o valor de -3.30 kPa. Comparando este valor com o relativo à resistência máxima ao corte do PIR (190 kPa), conclui-se que este valor é bastante baixo.

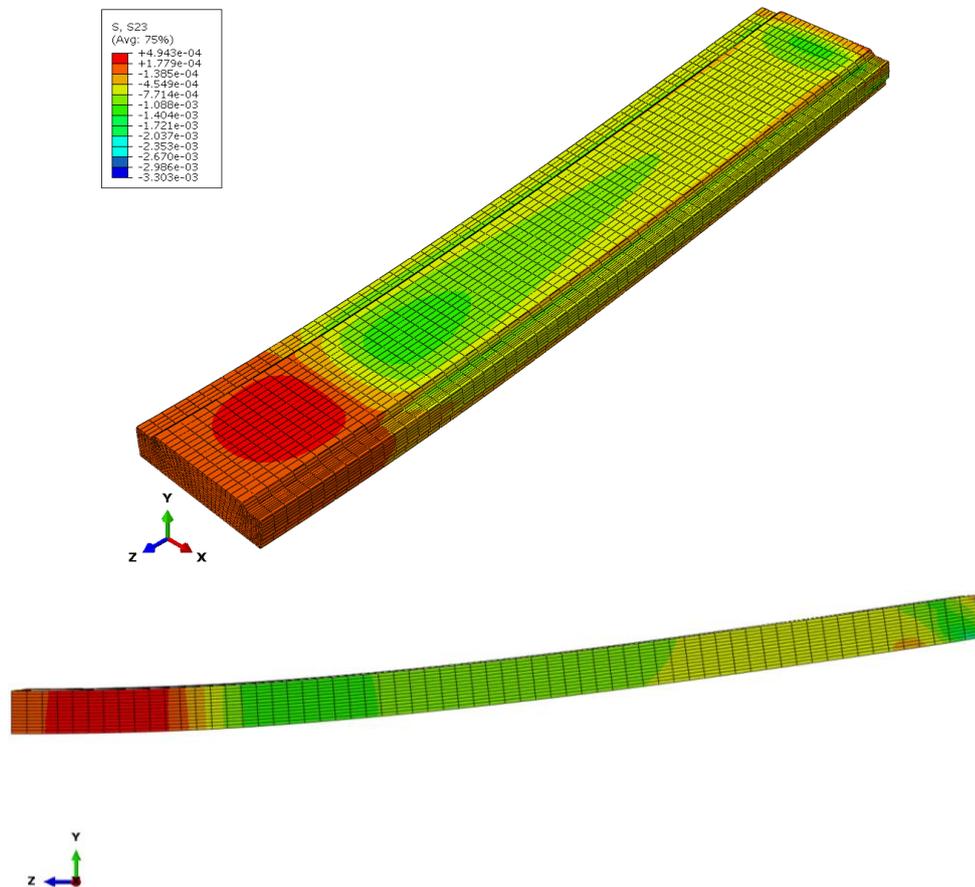


Figura 6.39 – Distribuição das tensões de corte no plano YZ, no PIR. Nota: a zona de apoio simples corresponde ao lado direito e os valores na escala encontram-se em [MPa].

### 6.4.3.5 Análise comparativa

A Figura 6.40 apresenta a comparação dos resultados obtidos nos estudos paramétricos do Caso 3, sendo analisados: (i) deslocamento máximo vertical (na direção Y) do painel sanduíche; (ii) tensão normal máxima na direção longitudinal, na camada superior de SCSFRMC; (iii) tensão normal máxima na direção longitudinal, no GFRP e (iv) tensão máxima de corte no PIR. Como se pode observar nas três primeiras comparações efetuadas a variação em termos percentuais de resultados obtidos na modelação numérica está entre os 18.63% e os 34.27%, existindo em todos os casos um aumento de valores obtidos do caso i) para os casos posteriores. No caso da tensão máxima de corte a variação em termos percentuais entre os diferentes casos é quase nula, concluindo-se assim que a variação da posição da aplicação de carga para este sistema de ensaio não influencia significativamente o resultado da tensão máxima de corte no PIR.

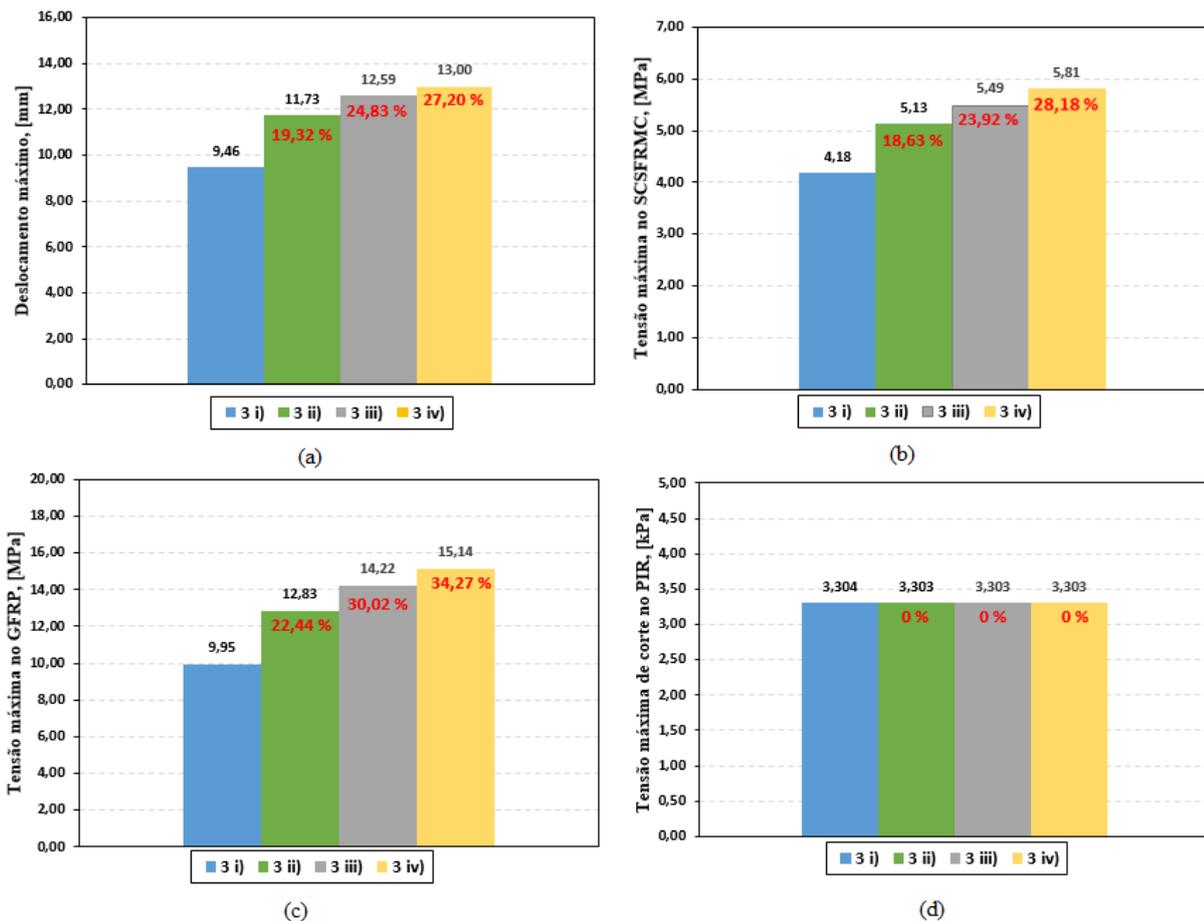


Figura 6.40 – Comparação dos resultados obtidos nos estudos paramétricos do Caso 3. Nota: A variação apresentada em termos percentuais é determinada em relação ao Caso 3 i).

## 6.5 Conclusões

A partir da geometria do painel sanduíche híbrido do projeto “EasyFloor”, sua configuração e dados relativos à caracterização dos materiais, anteriormente apresentados na dissertação, foram desenvolvidos, neste capítulo, modelos numéricos que permitem simular o comportamento elástico dos modelos experimentais a serem futuramente testados. Os resultados obtidos com os modelos numéricos são comparados com os resultados obtidos através de modelos analíticos. Para isso, recorreu-se a diferentes casos de ensaio com diversas configurações de carregamento e condições fronteira.

Tendo em conta a bibliografia e os ensaios de caracterização realizados ao longo da dissertação aos materiais utilizados na constituição do painel híbrido, SCSFRMC, GFRP e PIR, sujeitos a diferentes tipos de esforços, verificou-se, para os diferentes casos de ensaio, que os valores a que se encontravam sujeitos os materiais são, de facto, extremamente baixos.

No caso da combinação quase-permanente, o critério de deformação máxima ( $\delta_{max}$ ) varia entre  $L/500$  (mais restrita) e  $L/250$ , onde  $L$  é o vão do painel, dependendo do tipo de edifício. Analisando a relação deslocamento/vão ( $d/L$ ) apresentada em cada um dos casos dos estudos paramétricos realizados constata-se que o deslocamento máximo obtido em cada um dos casos foi bastante inferior ao que é exigido cumprir pelos regulamentos, mesmo atendendo ao facto dos efeitos diferidos (fluência) não terem sido considerados.

Portanto, é de salientar que todos os materiais intervenientes do painel sanduíche se encontram dentro dos valores admissíveis para um dimensionamento em segurança, quando se verifica que o critério condicionante para o dimensionamento dos painéis são os estados limite de serviço.



# CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

---

### 7.1 Conclusões

O objetivo principal da presente dissertação foi o de contribuir para a caracterização de painéis sanduíche híbridos para a reabilitação de pisos de edifícios. Os painéis são constituídos por uma lâmina inferior em G/CFRP (*glass/carbon fiber reinforced polymer*), duas almas laterais também em G/CFRP, uma lâmina superior em SCSFRMC (*self-compacting steel fiber reinforced micro concrete*) e um núcleo em PIR (*Polyisocyanurate*). Por razões técnicas, entre o SCSFRMC e o núcleo existirá uma lâmina de GFRP. Efetuaram-se estudos experimentais de modo a caracterizar mecanicamente os materiais intervenientes no painel sanduíche, em particular o SCSFRMC, as lâminas de GFRP e as espumas de PIR e PUR. De modo a assegurar uma adequada ligação entre a lâmina de GFRP e a camada de SCSFRMC foi avaliada a influência do tipo de preparação da superfície e o tipo de adesivo, por intermédio de ensaios de “*pull-off*”. Por fim, avaliou-se a resposta estrutural destes painéis para diferentes configurações de carregamento e diferentes condições fronteira previstas no âmbito da caracterização experimental incluída no projeto “EasyFloor”.

A revisão da literatura disponível permitiu adquirir conhecimentos acerca de soluções existentes, dos materiais e arquiteturas usuais e dos processos de fabrico inerentes aos painéis sanduíche de foro estrutural. Esta fase foi importante, porque permitiu perceber a configuração e o comportamento da solução proposta, bem como, o papel que cada componente do painel desempenha na solução global. Nesta fase, também foi muito importante desenvolver competências em processos associados à análise experimental e em ferramentas de análise numérica, que depois foram utilizadas no desenvolvimento do presente trabalho.

Realizou-se um programa experimental baseado em ensaios de tipo “*pull-off*” efetuado de modo a ser possível caracterizar a aderência da ligação entre o GFRP e o SCSFRMC, quando são

utilizados diferentes tratamentos de superfície para o GFRP e distintos adesivos de ligação. Um dos objetivos foi investigar o efeito da rugosidade da superfície de GFRP na resistência da ligação e, para isso, diferentes metodologias de tratamento foram utilizadas: tratamento com lixa 24, lixa 80 e sem tratamento de superfície. Complementarmente, no âmbito deste estudo experimental foi também efetuada a caracterização mecânica (compressão e flexão) do SCSFRMC a utilizar nos painéis sanduíche híbridos do presente projeto.

A partir dos resultados obtidos dos ensaios de “*pull-off*” realizados, as seguintes conclusões foram retiradas:

- O perfil de rugosidade do GFRP e sua limpeza contribuiu para o aumento da tensão de arrancamento entre o GFRP e o SCSFRMC;
- Das diferentes metodologias de preparação da superfície, resultaram em diferentes valores de resistência da ligação, devido aos diferentes níveis e rugosidade que proporcionam;
- A força adesiva proporcionada pelo adesivo teve influência significativa na tensão de arrancamento ao nível da interface GFRP/SCSFRMC, sendo que para alguns dos adesivos foi possível obter aderência perfeita (sem ausência de rotura ao nível da dita interface).

No âmbito do presente projeto, o SCSFRMC tinha como requisitos, para os ensaios de compressão, a obtenção de uma resistência à compressão  $f_{cm}$  igual ou superior a 30 MPa, obteve-se 41,38 MPa em provetes cilíndricos, e um módulo de elasticidade,  $E_{cm}$ , entre os 23 e os 25 GPa, obteve-se 23,01 GPa. Portanto, o SCSFRMC desenvolvido cumpriu os requisitos perseguidos. A partir dos ensaios de flexão obteve-se uma tensão limite de proporcionalidade igual a 6,17 MPa.

Procedeu-se à caracterização do comportamento mecânico (flexão e tração direta) de provetes de laminados em GFRP fabricados propositadamente para este projeto, orientados na direção de pultrusão, considerada como direção longitudinal, e na direção perpendicular à direção de pultrusão, aqui considerada como direção transversal. Para esta análise experimental adotaram-se procedimentos documentados na literatura.

Os provetes de laminados em GFRP ensaiados à flexão, orientados na direção longitudinal ao reforço principal, o comportamento experimental de todos os provetes evidenciou um comportamento linear elástico até à rotura, sendo esta uma característica típica deste tipo de material. Além disso, a resposta após pico comprovou a rotura progressiva observada em

laboratório. Esse fenómeno deve-se essencialmente ao facto de as fibras que ainda não romperam continuarem em regime elástico. Analisando a direcção transversal às fibras de reforço principal, o material em estudo na fase inicial do carregamento o comportamento apresentado não é totalmente linear.

Os resultados máximos para a tensão de flexão foram obtidos nos provetes de V1, sendo estes iguais a 399,74 MPa na direcção longitudinal e 128,08 MPa na direcção transversal. Em relação ao maior módulo de elasticidade, este foi obtido pelos provetes de V2, sendo estes iguais a 30,89 GPa na direcção longitudinal e 12,82 GPa na direcção transversal.

A inclusão de trióxido de alumínio nos provetes de V3, enfraqueceu as propriedades mecânicas destes laminados de GFRP.

Tendo em conta os modos de rotura dos laminados em GFRP (V1, V2 e V3) estes romperam por tração em flexão por rotura das fibras inferiores, tanto na direcção longitudinal, como na direcção transversal. Observou-se também a interdelaminação entre camadas horizontais (plano perpendicular à direcção de carregamento) na região tracionada dos provetes e na zona central do vão.

Nos ensaios de tração direta, recorrendo a provetes com as mesmas dimensões, na direcção longitudinal os provetes ensaiados apresentam um comportamento linear elástico até à rotura, sendo esta uma rotura frágil. Na direcção transversal, os provetes ensaiados apresentaram um comportamento elástico não linear até à rotura.

Os resultados máximos obtidos para a tensão de tração foram obtidos nos provetes de V1, sendo estes iguais a 310,42 MPa na direcção longitudinal e 92,50 MPa na direcção transversal. Em relação ao maior módulo de elasticidade, este foi obtido pelos provetes de V2 na direcção longitudinal, sendo este igual a 26,86 GPa e na direcção transversal o maior foi obtido pelos provetes de V1, sendo este igual a 8,51MPa.

Os provetes apresentaram um modo de rotura similar entre provetes do mesmo tipo, que é caracterizado pela rotura progressiva dos fios que compõem as diversas camadas de *roving* 9600 de vidro, em vários pontos interiores do provete. Além disso, verificou-se nos provetes de V1 delaminação das camadas das extremidades.

Em suma, os resultados obtidos nos dois tipos de ensaios, flexão e tração direta, são concordantes e encontram-se em conformidade com a literatura. A partir dos valores de covariância observados ao longo do correspondente capítulo constata-se que é necessário melhorar o controlo de qualidade do processo de fabrico do material.

Efetuiu-se a caracterização do comportamento mecânico (compressão e corte) da espuma de poliuretano (PUR) e de poliisocianurato (PIR), sendo um destes posteriormente incorporado na constituição do painel sanduíche. Para esta análise experimental adotaram-se procedimentos documentados na literatura que permitiram determinar as propriedades elásticas, resistências e modos de rotura.

Quando submetidas a esforços de compressão, as espumas de poliuretano (PUR) e poliisocianurato (PIR) apresentam um comportamento inicial aproximadamente linear até se atingir a força máxima, a que se segue um decréscimo da força e uma fase onde se observa o aumento das deformações para valores de força aproximadamente constantes, sendo as deformações residuais elevadas.

A tensão de compressão máxima obtida nos provetes de PIR (0,22 MPa) foi superior cerca de 46,67% em relação aos provetes de PUR (0,15 MPa), assim como o módulo de elasticidade de compressão (5,81 MPa) que é cerca de 14,60% superior módulo de elasticidade de compressão medido nos provetes de PUR (5,07 MPa).

Os modos de rotura observados nos ensaios de compressão são semelhantes, quer entre os provetes de PUR e PIR, quer entre os provetes ensaiados de cada material.

Nos ensaios de corte em placa, observou-se inicialmente um comportamento linear elástico, seguido por um comportamento não linear até à rotura apresentando um patamar com aumento da distorção para valores de tensão de corte aproximadamente constantes. A tensão máxima de corte nos provetes de PIR foi igual à tensão máxima de corte medida nos provetes de PUR, sendo esta igual a 0,19 MPa. Relativamente ao módulo de corte obtiveram-se valores superiores para os provetes de PIR (2,73 MPa) em apenas 2,63%, comparativamente com os provetes de PUR (2,66 MPa).

Ao nível dos modos de rotura apresentados, neste tipo de ensaio ocorreu excepcionalmente em alguns provetes um destacamento prematuro do provete em relação aos pratos de ensaio devido à rotura na interface adesivo/PUR ou adesivo/PIR. Este destacamento prematuro pode ter resultado da incorreta aplicação do adesivo ou da quantidade do adesivo aplicado não ter sido a suficiente para evitar o destacamento.

Como resultado da avaliação realizada e tendo em conta o comportamento melhorado ao fogo do PIR, tomou-se a opção de adotar PIR na realização do núcleo do painel sanduíche híbrido proposto no presente projeto “EasyFloor”.

A construção de modelos numéricos representativos, realizados a partir de software de cálculo que tem como base o Método dos Elementos Finitos (MEF) permitiu obter a resposta estrutural do painel sanduíche híbrido para diferentes configurações de ensaio e diferentes condições fronteira. Tendo em conta a bibliografia e os ensaios de caracterização realizados ao longo da dissertação aos materiais utilizados na constituição do painel híbrido, SCSFRMC, GFRP e PIR, sujeitos a diferentes tipos de esforços, verificou-se, para os diferentes casos de ensaio, que os valores a que se encontravam sujeitos os materiais é, de facto, extremamente reduzido.

Constatou-se que o deslocamento máximo obtido em cada um dos casos foi bastante inferior ao que é exigido cumprir pelos regulamentos, mesmo atendendo ao facto dos efeitos diferidos (fluência) não terem sido considerados.

Portanto, é de salientar que todos os materiais intervenientes do painel sanduíche se encontram dentro dos valores admissíveis para um dimensionamento em segurança, quando se verifica que o critério condicionante para o dimensionamento dos painéis são os estados limite de serviço.

## 7.2 Perspetivas de desenvolvimentos futuros

Os painéis sanduíche híbridos são uma solução para a reabilitação de pisos de edifícios relativamente recente e inovadora comparativamente com as soluções tradicionais em betão armado e aço. Nesse contexto e no âmbito dos assuntos abordados nesta dissertação considera-se que seria muito relevante realizarem-se estudos adicionais e mais aprofundados, nomeadamente quanto à viabilidade da aplicação em estudo, de modo a complementar e alargar as conclusões já estabelecidas. Apresentam-se, de seguida os trabalhos a desenvolver:

- Caracterização exaustiva das propriedades físicas e mecânicas dos diferentes intervenientes que compõem o painel sanduíche híbrido à rotura (continuação);
- Estudos paramétricos: com base no modelo numérico desenvolvido, avaliar as condições de aplicabilidade das soluções estudadas em pisos de edifícios (considerando um vão de referência de 5 m), tendo em conta a necessidade de cumprir os requisitos regulamentares para essas utilizações (ações, requisitos de desempenho em serviço e em estado limite último). Com isto, poder-se-ão determinar valores mínimos ou combinações de valores, nomeadamente para propriedades físicas e mecânicas de cada um dos elementos constituintes do painel (continuação);
- Desenvolvimento e calibração de modelos numéricos para a previsão do comportamento em serviço e à rotura das ligações entre painéis sanduíche, com recurso a software de elementos finitos;
- Estudo do comportamento bidirecional dos painéis sanduíche híbridos;
- Estudar a influência da temperatura nas propriedades dos materiais que constituem o painel sanduíche híbrido;
- Estudo do efeito da fluência e da resistência à fadiga dos painéis sanduíche híbridos;
- Avaliação do comportamento dos painéis sanduíche quando sujeitos a cargas concentradas (continuação);
- Caracterização do comportamento estrutural a curto prazo e a longo prazo dos painéis sanduíche híbridos;
- Ensaio de caracterização do comportamento de ligação (painel-painel e painel-apoios);
- Estudos mais aprofundados dos diferentes modos de rotura, em especial com diferentes tipos de ligação entre o SCSFRMC e o GFRP, avaliando a influência do tipo de preparação da superfície (continuação);

- Estudos mais aprofundados dos diferentes modos de rotura, e desenvolvimento de expressões numéricas capazes de estimar com precisão razoável o surgimento dos mesmos;
- Estudo do comportamento em serviço e dos parâmetros de conforto de painéis sanduíche aplicados como pisos de edifícios, considerando o seu comportamento térmico e acústico;
- Estudos experimentais e numéricos do comportamento dos painéis sanduíche híbridos em situação 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”, em comparação com uma solução tradicional;
- Preparação de um manual com regras de dimensionamento e especificações técnicas para a produção, montagem e utilização do sistema em desenvolvimento.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAQUS *Theory Manual & Users Manuals* (2010). Version 6.9-3, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. USA.
- ACI 544 – *State-of-the-art report on fiber reinforced concrete* (ACI 544.1R). (1996). American Concrete Institute. USA.
- 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.
- 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.
- ASTM C 273-00 (2000). "*Standard test method for shear properties of sandwich core materials*", ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM C 365/C 365M – 05 (2005). "*Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sanduíche Cores*". ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM C 1583-04 (2004). "*Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension ("pull-off" Method)*". ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D 3039/D 3039M – 00 (2000). "*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*", ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D 4541-02 (2002). "*Standard Test Method for "pull-off" Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*". ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D 7264/D7264M – 07 (2007). "*Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*" ASTM International, West Conshohocken.
- Bank, L.C., (2006). *Composites for construction: Structural design with FRP materials*, John Wiley & Sons, New Jersey, 551p.
- Barros *et al.* (2005). "*Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits*", *Journal Cement and Concrete Composites*.
- Barros *et al.* (2009). *Experimental characterization of the flexural behaviour of steel fibre reinforced concrete according to RILEM TC 162-TDF recommendations*.
- Barros *et al.* (2011). *Caracterização do comportamento à flexão do betão reforçado com fibras segundo a proposta do RILEM*.

- 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.
- Barros, J. (2011). *Technology, design and applications of steel fibre reinforced selfcompacting concrete*, 6<sup>th</sup> International Conference Fibre Concrete, Prague.
- Barros J. A. O., Lourenço L., Oliveira L., Silva S. M., Lopes (2015). P. LEGOUSE – Habitação modular pré-fabricada: conceito, construção e ensaios, IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável – BAC2015, pp. 561 – 570, 978-972-752-179-1.
- C. J. Constante (2014). Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais, Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto – Tese de Mestrado.
- Canning, L., Hollaway, L. C. and Thorne, A. M. (1999). *Manufacture, tenting and numerical analysis of an innovative polymer composite/concrete structural unit*. Proc Instn Eng Struct Bids, 134:231-41.
- Code, (2010). M. First complete draft. *Bulletin*, 55. In: Comité Euro-International du Béton. Secretariat Permanent, Lausanne, Suíça.
- 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 57<sup>th</sup> Meeting of the European Council of Civil Engineers (ECCE) Ordem dos Engenheiros, Lisboa.
- Correia, L., Teixeira, T., Michels, J., Almeida, J. A. P. P. & Sena-Cruz, J. (2015). – *Flexural behaviour of RC slabs strengthened with prestressed CFRP strips using different anchorage systems*. Composites Part B: Engineering, 81, 158-170.
- Davies, J. M. (2001). *Lightweight sandwich construction*. Osney Mead, Oxford: Blackwell Science Ltd, 370.
- Denarié E. (2005). *Structural rehabilitations with Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes (UHPFRC)*, Keynote lecture, Proceedings International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting – ICCRRR 2005, 21-23, November 2005, Cape Town, South Africa.
- Deskovic, N., Triantafillou, T and Meier, U. (1995). *Innovative design of FRP combined with concrete: Short-term behaviour*. Journal of Structural Engineering: ASCE, 121(7): 1069-1078.

- E. M. Petrie (2000). *Handbook of adhesives and Sealants*, USA: McGraw-Hill.
- Eduardo N. B. Pereira *et al.* (2006). *Steel fiber reinforced self-compacting concrete – experimental research and numerical simulation*.
- Fábio Quintas Cruz (2017). Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíche híbridos para a reabilitação de pisos de edifícios, Universidade do Minho – Escola de Engenharia. Tese de Mestrado.
- Feng CW. *et al.* (2005). *Modeling of long-term creep behavior of structural epoxy adhesives. International Journal of Adhesion and Adhesives*; 25(5):427-436.
- 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.
- Gonçalo Escusa *et al.* (2015). Influência do efeito de exposições ambientais no comportamento pós-fissurado de um BAC reforçado com fibras de aço.
- Habel K. (2004). *Structural Behaviour of Elements Combining Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes (UHPFRC) and Reinforced Concrete*, Doctoral thesis n° 3036, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.
- Hullat, J., H. (2000). *Characteristics of composite concrete beams*. M. J. Ryall, G.A.R. Pake e J.E. Harding. *Bridge management-4, inspection, maintenance, assessment and repair*. Thomas Telford.
- ISO 527-4:1997 (1997). *Plastics – Determination of tensile properties – Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*. ISO, Geneva, Switzerland.
- J. C. S. Azevedo (2014). Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF), Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto – Tese de Mestrado.
- J.P. Busel, J.D., Lockwood (eds.) (2000). *Product selection guide: FRP composite products for bridge applications*, Market Development Alliance, Harrison, New York.
- J. P. Charron, E. Denarié and E. Brühwiler (2006). *Transport properties of Water and Glycol in an Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) under high tensile deformation*. Submitted to Cement and Concrete Research.
- 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.
- José A. Gonilha *et al.* (2014). *Static, dynamic and creep behaviour of a full-scale GFRP-SFRSCC hybrid footbridge*.

- Karbhari, V.M., Seible, F. (1999), “*Fiber-Reinforced Polymer Composites for Civil Infrastructure in the USA*”, Structural Engineering International, Vol. 9, No. 4, 274-277.
- Keller, T., Schaumann, E., & Vallée, T. (2007). *Flexural behavior of a hybrid FRP and lightweight concrete sanduíche bridge deck*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 38(3), 879-889.
- L. F. M. da Silva, A. G. de Magalhães e M. F. S. F. de Moura (2007). Juntas Adesivas Estruturais, Porto: Publindustria.
- L. F. M. da Silva A. Ochsner e R. D. Adams (2011). *Handbook of Adhesion Technology*, Porto: Springer.
- Lameiras, M.R.; Santos T.; Azenha, M.A.D.; Barros, J.A.O. (2010) “Comportamento térmico de painéis sanduíche constituídos por lâminas em betão e conectores de compósito de polímero reforçado com fibras”, Technical report 10-DEC/E-27, Dep. Civil Eng., School Eng. University of Minho, 73 pp.
- 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 5<sup>th</sup> International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010), Beijing, China, September 27-29. (pp. 197-201). n.d: Springer & Tsinghua University Press.
- M. G. Pinto (2007). Ligações Adesivas entre Materiais Poliméricos com e sem Alteração Superficial dos Substratos, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Tese de Doutoramento.
- MORTENSEN, F. (1998). *Development of tools for engineering analysis and design of high-performance FRP-composite structural elements*. Tese (Doutoramento) – Institute of Mechanical Engineering, Aalborg University, Aalborg, 1998.
- N. F. Ribeiro (2012). Efeito de alterações geométricas na resistência de juntas de sobreposição, Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto – Tese de Mestrado.
- N. Roux, C. Andrade and M.A. Sanjuan (1995). *Etude Expérimentale sur la durabilité des Bétons de Poudres Réactives*, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics (ITBTP), Les Bétons de Poudres Réactives (BPR) à Ultra Haute Résistance (200 a 800 MPa), 532, Série Béton 320: 133-141 (in French).
- Nordin, H., T. (2004). *Testing of hybrid FRP composite beams in bending*. Composites Part B: Engineering, 35: 27-33.
- 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.
- P. Cognard (2005). *Handbook of Adhesives and Sealants*, França: Elsevier.

- Parant, E. (2003). *Mécanismes d'endommagement et comportements mécaniques d'un composite cimentaire fibré multi-échelles sous sollicitations sévères: fatigue, choc, corrosion*. Ph.D. thesis of Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Paris (in French).
- Peters, S. T. (1998). *Handbook of composites (2<sup>nd</sup> ed)*. London: Chapman & Hall.
- Patrícia Silva *et al.* (2015). Efeitos da fluência num adesivo epóxi: investigação experimental.
- R. J. C. Carbas (2008). Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Tese de Mestrado.
- R. M. Fernandes (2012). Definição de uma lei coesiva para juntas coladas em Carbono-Epóxico solicitadas em Modo II, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Tese de Mestrado.
- Reis, E. M. (2005). *Characteristics of innovative 3D FRP sandwich panels [Phd. thesis]*. USA: North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Reis, Engin M., Rizkalla Sami H. (2008). *Material characteristics of 3D FRP sandwich panels*. Journal of Construction and Building Material, Vol. 22, pp. 1009-1018.
- RILEM TC 162-TDF (2002). *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – bending test (final recommendation)*. Journal of Materials and Structures. 35:253. pp. 579-582.
- Russo, B. and Zuccarello, A. (2007). *Experimental and numerical evaluation of the mechanical behaviour of GFRP sandwich panels*. Composite Structures, vol. 81, no. 4, pp. 575-586.
- SAMARIS D25b (2006). *Guidelines for the use of UHPFRC for rehabilitation of concrete highway structures*, European project 5<sup>th</sup> FWP / SAMARIS – Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructures – WP 14: HPFRCC, <http://samaris.zag.si/>.
- Seible F., K., B. (2004). *Kings Stormwater Channel and I-5/Gilman Bridges*, USA. Structural Engineering Internacional, IABSE 1999; 9(4): 250-253.
- Simon Austin, Peter Robins, Youguang Pan (1995). *Tensile bond testing of concrete repairs*, Materials and Structures.
- Stähli, P. (2008). *“Ultra-fluid, oriented hybrid-fibre-concrete”*, PhD Thesis, ETH, Zürich, Switzerland.
- Site do fabricante Strongwell: [www.strongwell.com](http://www.strongwell.com).
- T. Sharaf, W. (2010). *Structural performance of sandwich wall panels with different foam core densities in one-way bending*. Journal of Composite Materials, vol. 44, no. 19, pp. 478-487.
- Thomsen, O. T., Bozhevolnaya, E., & Lyckegaard, A. (2006). *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International

Conference on Sandwich Structures, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 29-31 August 2005: Springer Science & Business Media.

- VAYSBURD, A. M.; MACDONALD, J. E. (1999). *An evaluation of equipment and procedures for tensile bond testing of concrete repairs*, Technical Report REMR-CS-61, US Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- 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.
- Vítor M. C. F. Cunha (2010). Comportamento em Tracção Uniaxial e Flexão de Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço. BAC2010 - 2º Congresso Ibérico sobre betão auto-compactável, Guimarães.
- 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 – Fichas técnicas dos adesivos seleccionadas para os ensaios de “pull-off”

Construction

**Ficha de Produto**  
 Edição de Abril de 2011  
 Nº de identificação:03.101  
 Versão nº 1  
 SikaTop® Armatec®-110 EpoCem®

CE

## SikaTop® Armatec® -110 EpoCem®

Agente de aderência e revestimento anticorrosivo para armaduras

---

<b>Descrição do produto</b>	SikaTop® Armatec® -110 EpoCem® é um revestimento, à base de cimento e resina de epoxi modificada, fornecido em três componentes e utilizado como agente de aderência e como protecção anticorrosiva. SikaTop® Armatec® -110 EpoCem® cumpre os requisitos da NP EN 1504-7.
<b>Utilizações</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Adequado para o controlo de protecção anódica (Princípio 11, método 11.1 da NP EN 1504-9).</li> <li>■ Adequado para reparações de betão armado, como revestimento de protecção anticorrosiva das armaduras.</li> <li>■ Adequado para aplicar como agente de aderência em betão ou argamassa.</li> </ul>
<b>Características/ Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Contém tecnologia EpoCem® - agente de aderência melhorado.</li> <li>■ Elevado “tempo aberto” para argamassas de reparação.</li> <li>■ Compatível com a maioria dos sistemas de reparação com argamassas prontas Sika® Monotop®.</li> <li>■ Excelente aderência ao aço e a betão.</li> <li>■ Contém inibidores de corrosão.</li> <li>■ Aprovado para aplicação sob cargas dinâmicas.</li> <li>■ Boa resistência à penetração da água e cloretos.</li> <li>■ Elevada resistência a esforços de corte.</li> <li>■ Elevado tempo de vida útil (<i>potlife</i>).</li> <li>■ Fácil de misturar.</li> <li>■ Pode ser aplicado à trincha ou à pistola.</li> </ul>
<b>Certificados/ Boletins de Ensaio</b>	<p>Cumprir com os requisitos da norma NP EN 1504-7.</p> <p><i>BAM, Federal Institute for Material Research and Testing, Berlin, Germany – Relatório de Ensaio do Tipo Inicial de acordo com a EN 1504-7, Nr. BAM VI.1 / 14574-2, de 13 de Maio de 2009.</i></p> <p><i>BAM, Federal Institute for Material Research and Testing, Berlin, Germany - Aplicação sob cargas dinâmicas – Nr VII.1 / 128904/1, de 1 de Julho de 2008.</i></p> <p><i>Polymer Institute, Flörsheim, Germany – Determinação da resistência a esforços de corte entre betão novo e betão velho, Nr. P 2965, de 30 de Setembro de 2002.</i></p>
<b>Dados do produto</b>	
<b>Aspecto / Cor</b>	Mistura : Cinzento escuro. Componente A: Líquido branco. Componente B: Líquido incolor. Componente C: Pó cinzento escuro.
<b>Fornecimento</b>	Kits de 4 kg (A+B+C).
<b>Armazenagem e conservação</b>	O produto conserva-se durante 12 meses a partir da data de fabrico, na embalagem original não encetada, a temperaturas entre +5 e +25 °C. Armazenar em local seco e ao abrigo da luz solar directa.



SikaTop® Armatec®-110 EpoCem® 1/4

## Dados técnicos

Base química	Cimento Portland melhorado com resinas epoxi, agregados seleccionados e aditivos.
Massa volúmica	Aprox. 2 kg/dm <sup>3</sup> (A+B+C) a +23 °C.
Coefficiente de expansão térmica	18 x 10 <sup>-5</sup> m/(m x °C). (EN 1770)
Resistência à difusão de dióxido de carbono, μCO <sub>2</sub>	μCO <sub>2</sub> ~ 40'000.
Resistência à difusão de vapor de água, μH <sub>2</sub> O	μH <sub>2</sub> O ~ 700.
Propriedades físicas / Mecânicas	(Ensaio efectuados a + 20 °C em condições de laboratório)
Tensão de aderência	> 1.5 N/mm <sup>2</sup> aos 28 dias.
Resistência ao corte	Aprox. 16 N/mm <sup>2</sup> (após 2 horas).
Módulo de elasticidade, E	Aprox. 16,400 N/mm <sup>2</sup> (estático).

Requisitos	(NP EN 1504-7)		
	Norma de ensaio	Resultados (ITT)	Requisitos
Protecção anticorrosiva	EN 15183	Aprovado	As zonas protegidas do aço estão isentas de corrosão e pequenos detritos de ferrugem em torno do bordo da base <1mm.

## Informação sobre o sistema

Estrutura do sistema	SikaTop® Armatec® -110 EpoCem® faz parte do sistema de reparação de betão Sika® conforme a Norma Europeia NP EN 1504 e é composto por: ■ SikaTop® Armatec® -110 EpoCem®: Aderência e revestimento anticorrosivo ■ SikaTop® ou Sika® MonoTop®: Argamassas de reparação estrutural. ■ SikaTop® ou Sika® MonoTop®: Revestimentos finos. ■ Sika® Ferrogard® 903: Inibidor de corrosão.
----------------------	--

## Pormenores de aplicação

Consumo/ Dosagem	Quando usado como revestimento de protecção anticorrosivo de armaduras: Aprox. 2 kg por m <sup>2</sup> / camada (aprox. 1mm de espessura). Aplicar no mínimo duas camadas (aprox. 2mm de espessura). Quando usado como agente de aderência: >1,5 a 2 kg por m <sup>2</sup> / mm dependendo do estado da base.
------------------	---

Qualidade da base	<b>Betão:</b> A base deve estar isenta de poeiras, partículas mal aderentes, contaminantes superficiais e eventuais materiais que possam diminuir a aderência, impedir sucção assim como a "molhagem" provocada por outros produtos de reparação. <b>Armaduras:</b> Devem ser removidos todos os detritos de oxidação, escamas, pó e outros materiais que possam prejudicar a aderência ou contribuir para a corrosão.
-------------------	---

<b>Preparação da base</b>	<p><b>Betão:</b> Deve ser removido todo o betão laminado, fraco, danificado e deteriorado. Caso necessário o betão em bom estado aparente deve também ser removido com meios adequados.</p> <p>A base deve ser previamente humedecida e não se deve apresentar seca aquando aplicação da argamassa de reparação. A base deve apresentar um aspecto mate sem brilho aparente e deve também estar garantido que todos os poros e vazios não possuem água empogada no seu interior.</p> <p><b>Armaduras:</b> Devem ser preparadas utilizando técnicas adequadas, como jacto abrasivo ou jacto de água de alta pressão.</p>
<b>Condições de aplicação/ Limitações</b>	
<b>Temperatura da base</b>	Mínima: +5 °C. / Máxima: +30 °C.
<b>Temperatura ambiente</b>	Mínima: +5 °C. / Máxima: +30 °C.
<b>Instruções de aplicação</b>	
<b>Mistura</b>	<p>SikaTop® Armatec® -110 EpoCem® deve ser misturado com misturador eléctrico a baixa velocidade (&lt;250 rpm).</p> <p>Agitar os componentes A e B cuidadosamente antes de abrir as embalagens. Vazar ambos os líquidos num balde apropriado e misturar durante 30 segundos. Enquanto se agita a mistura (A+B) adicionar o componente C lentamente, mexendo sempre com um misturador eléctrico durante 3 minutos, até se obter uma argamassa homogénea.</p> <p>Deixar repousar a mistura durante cerca de 5 a 10 minutos, até o produto ganhar uma consistência semi-viscosa apropriada para aplicação à trincha.</p> <p><b>NÃO ADICIONAR ÁGUA!</b></p>
<b>Aplicação</b>	<p><b>Revestimento anticorrosivo:</b> Aplicar uma primeira camada de aprox. 1mm de espessura, com trincha de dureza média / alta, ou com pistola de bico largo, nas armaduras previamente limpas. Aplicar a segunda camada assim que a primeira se apresente suficientemente resistente à penetração de uma unha (aprox. 2 - 3 horas a +20 °C).</p> <p><b>Agente de aderência:</b> Aplicar com trincha de dureza média/ alta ou pistola de bico largo, na base previamente limpa. Para obter a máxima aderência, SikaTop® Armatec® -110 EpoCem® deve ser bem impregnado na base, cobrindo todos os poros existentes. SikaTop® Armatec® -110 EpoCem® em fresco deve ser protegido de contaminações, da chuva até à aplicação das argamassas de reparação.</p> <p><b>Aplicação sob cargas dinâmicas:</b> SikaTop® Armatec® -110 EpoCem® foi testado de acordo com o seguinte sistema Sika® de argamassas de reparação, e foi certificado para aplicação sob cargas dinâmicas. Consultar as Fichas de Produto para mais informações.</p> <p><b>Projeção por via seca:</b> Revestimento anticorrosivo: SikaTop® Armatec® -110 EpoCem®. Reparação e acabamento: SikaCem® -Gunitite 133.</p> <p><b>Projeção por via húmida:</b> Revestimento anticorrosivo/ agente aderência: SikaTop® Armatec® -110 EpoCem®. Reparação e acabamento: Sika® MonoTop® -412 S.</p>
<b>Limpeza de ferramentas</b>	Limpar todas as ferramentas e equipamento com água imediatamente após a utilização. Material curado/endurecido só pode ser removido mecanicamente.

<b>Tempo de vida útil da mistura (potlife)</b>	Aprox. 3 horas (a +20 °C).										
<b>Intervalo entre camadas</b>	Tempo máximo de espera antes da aplicação da argamassa de reparação. As argamassas de reparação Sika®, assim como betões de cura normal devem ser aplicados sobre SikaTop® Amatec®-110 EpoCem® no prazo de:										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Temperatura</th> <th>Tempo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+30 °C</td> <td>6 horas</td> </tr> <tr> <td>+20 °C</td> <td>5 horas</td> </tr> <tr> <td>+10 °C</td> <td>2 horas</td> </tr> <tr> <td>+5 °C</td> <td>1 hora</td> </tr> </tbody> </table>	Temperatura	Tempo	+30 °C	6 horas	+20 °C	5 horas	+10 °C	2 horas	+5 °C	1 hora
Temperatura	Tempo										
+30 °C	6 horas										
+20 °C	5 horas										
+10 °C	2 horas										
+5 °C	1 hora										
<b>Importante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Consultar o Guia de Aplicação de Sistemas de Reparação com Sika® MonoTop® para mais informações relativas a preparação da base, consultar as recomendações presentes na NP EN 1504-10.</li> <li>■ Evitar aplicar o produto em zonas de vento e/ou chuva e/ou forte incidência solar.</li> <li>■ Aplicar apenas em bases devidamente preparadas.</li> <li>■ NÃO é recomendada para utilizar em conjunto com argamassas de cura rápida, ex.: Sika® Monotop®-211 FG.</li> </ul>										
<b>Cura</b>	Proteger a argamassa fresca da chuva até cura do material.										
<b>Nota</b>	Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.										
<b>Risco e segurança</b>											
<b>Medidas de segurança</b>	Para informações complementares sobre o manuseamento, armazenagem e eliminação de resíduos do produto consultar a respectiva Ficha de Dados de Segurança e o rótulo da embalagem.										
	<p>*O produto está seguro na Cº Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nºCH00003018U05A), a título de responsabilidade civil do fabricante*.</p> <p>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 no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão 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 fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites 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 específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que solicitada.</p>										
<b>Marcação CE</b>	<p>A Norma Europeia EN 1504-7 "Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas em betão — Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 7: Protecção contra a corrosão das armaduras" especifica os requisitos necessários para os revestimentos para protecção e reparação de varões em aço e de reparação de varões de aço selados em estruturas de betão.</p> <p>Os produtos que se encontram abrangidos por esta especificação necessitam de ter marcação CE, de acordo com o Anexo ZA.2, Tabela ZA.2 e, conformidade 2+ ,de acordo com o âmbito e cláusulas relevantes aí indicadas, e cumprir os requisitos do mandato da Directiva de Produtos da Construção (89/106/CEE).</p>										



Sika Portugal, SA  
R. de Santarém, 113  
4400-292 V. N. Gaia  
Portugal  
Tel. +351 22 377 69 00  
Fax +351 22 370 20 12  
www.sika.pt



Ficha de Produto  
Edição de agosto de 2014  
Nº de identificação: 04.112  
Versão nº 1  
Sikadur®-32 EF



## Sikadur®-32 EF

Cola à base de resinas epoxi, em dois componentes

<b>Descrição do produto</b>	Sikadur®-32 EF é um adesivo estrutural em dois componentes, tolerante à humidade, baseado numa combinação de resinas epóxi e cargas especiais, para uso a temperaturas entre +10 °C e +30 °C.
<b>Utilizações</b>	Como cola estrutural para: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Elementos de betão (incluindo a união entre betão fresco e endurecido).</li> <li>■ Pedra natural.</li> <li>■ Cerâmica, fibrocimento.</li> <li>■ Argamassa, alvenaria de tijolo.</li> <li>■ Aço, ferro, alumínio.</li> <li>■ Madeira.</li> <li>■ Poliéster/materiais de fibra de vidro e resina epóxi.</li> <li>■ Cristal.</li> </ul>
<b>Características/Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fácil de misturar e aplicar.</li> <li>■ Muito boa aderência à maioria dos materiais de construção.</li> <li>■ Adesivo de alta resistência.</li> <li>■ Endurece sem retração.</li> <li>■ Componentes de cores distintas (para controlo da mistura).</li> <li>■ Não necessita de primário.</li> <li>■ Elevadas resistências mecânicas iniciais e finais.</li> <li>■ Impermeável aos líquidos e ao vapor de água.</li> <li>■ Boa resistência química.</li> </ul>
<b>Certificados/Boletins de Ensaio</b>	Produto de aderência estrutural para a colagem de betão ou argamassa segundo a EN 1504-4:2004 com declaração de desempenho 01 04 02 03 001 0000145 1053, com certificado de produção em fábrica segundo o organismo notificado nº 0099-CPR-B15-0008, com marcação CE.
<b>Dados do produto</b>	
<b>Aspecto / Cor</b>	Componente A: Cinzento claro. Componente B: Cinzento escuro. Mistura A+B: Cinzento.
<b>Fornecimento</b>	Embalagens pré-doseadas de 1 kg e 4,5 kg.
<b>Armazenagem e conservação</b>	O produto conserva-se durante 12 meses a partir da data de fabrico, na embalagem original não encoetada, a temperaturas entre +5 °C e +30 °C. Armazenar em local seco e ao abrigo da luz solar directa.
<b>Dados técnicos</b>	
<b>Base química</b>	Resina epoxi.
<b>Massa volúmica</b>	Mistura A+B: 1,5 ± 0,1 kg/dm <sup>3</sup> , a +23 °C.
<b>Fluência</b>	Não escorre em superfícies verticais até aprox. 1 mm de espessura. (EN 1799)



<b>Espessura da camada</b>	Máx. 1 mm.																							
<b>Variação volumétrica</b>	Retração: endurece sem retração.																							
<b>Coefficiente de expansão térmica</b>	Coefficiente W: $8,7 \times 10^{-5}$ por °C (gama de temperatura +23 °C a +60 °C). (EN 1770)																							
<b>Estabilidade térmica</b>	Temperatura de transição vítrea (TH): HDT= +47 °C (aos 7 dias e +23 °C). (ASTM D 648)																							
<b>Propriedades físicas / Mecânicas</b>																								
<b>Resistência à compressão</b>	(ASTM D 695-95)																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tempo de cura</th> <th colspan="3">Temperatura de cura</th> </tr> <tr> <th>+10 °C</th> <th>+23 °C</th> <th>+30 °C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 dia</td> <td>Aprox. 5 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 35 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 49 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>3 dias</td> <td>Aprox. 40 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 42 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 55 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>7 dias</td> <td>Aprox. 45 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 48 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 57 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>14 dias</td> <td>Aprox. 51 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 52 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 58 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> </tbody> </table>	Tempo de cura	Temperatura de cura			+10 °C	+23 °C	+30 °C	1 dia	Aprox. 5 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 35 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 49 N/mm <sup>2</sup>	3 dias	Aprox. 40 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 42 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 55 N/mm <sup>2</sup>	7 dias	Aprox. 45 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 48 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 57 N/mm <sup>2</sup>	14 dias	Aprox. 51 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 52 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 58 N/mm <sup>2</sup>
Tempo de cura	Temperatura de cura																							
	+10 °C	+23 °C	+30 °C																					
1 dia	Aprox. 5 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 35 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 49 N/mm <sup>2</sup>																					
3 dias	Aprox. 40 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 42 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 55 N/mm <sup>2</sup>																					
7 dias	Aprox. 45 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 48 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 57 N/mm <sup>2</sup>																					
14 dias	Aprox. 51 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 52 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 58 N/mm <sup>2</sup>																					
<b>Resistência à compressão</b>	(DIN EN 53452)																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tempo de cura</th> <th colspan="3">Temperatura de cura</th> </tr> <tr> <th>+10 °C</th> <th>+23 °C</th> <th>+30 °C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 dia</td> <td>Aprox. 13 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 18 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 31 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>3 dias</td> <td>Aprox. 35 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 37 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 36 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>7 dias</td> <td>Aprox. 41 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 40 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 39 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>14 dias</td> <td>Aprox. 50 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 42 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 40 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> </tbody> </table>	Tempo de cura	Temperatura de cura			+10 °C	+23 °C	+30 °C	1 dia	Aprox. 13 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 18 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 31 N/mm <sup>2</sup>	3 dias	Aprox. 35 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 37 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 36 N/mm <sup>2</sup>	7 dias	Aprox. 41 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 40 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 39 N/mm <sup>2</sup>	14 dias	Aprox. 50 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 42 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 40 N/mm <sup>2</sup>
Tempo de cura	Temperatura de cura																							
	+10 °C	+23 °C	+30 °C																					
1 dia	Aprox. 13 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 18 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 31 N/mm <sup>2</sup>																					
3 dias	Aprox. 35 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 37 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 36 N/mm <sup>2</sup>																					
7 dias	Aprox. 41 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 40 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 39 N/mm <sup>2</sup>																					
14 dias	Aprox. 50 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 42 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 40 N/mm <sup>2</sup>																					
<b>Resistência à tração</b>	(ISO 527)																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tempo de cura</th> <th colspan="3">Temperatura de cura</th> </tr> <tr> <th>+10 °C</th> <th>+23 °C</th> <th>+30 °C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 dia</td> <td>Aprox. 10 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 16 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 18 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>3 dias</td> <td>Aprox. 28 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 30 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 31 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>7 dias</td> <td>Aprox. 34 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 36 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 30 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>14 dias</td> <td>Aprox. 38 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 35 N/mm<sup>2</sup></td> <td>Aprox. 32 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> </tbody> </table>	Tempo de cura	Temperatura de cura			+10 °C	+23 °C	+30 °C	1 dia	Aprox. 10 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 16 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 18 N/mm <sup>2</sup>	3 dias	Aprox. 28 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 30 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 31 N/mm <sup>2</sup>	7 dias	Aprox. 34 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 36 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 30 N/mm <sup>2</sup>	14 dias	Aprox. 38 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 35 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 32 N/mm <sup>2</sup>
Tempo de cura	Temperatura de cura																							
	+10 °C	+23 °C	+30 °C																					
1 dia	Aprox. 10 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 16 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 18 N/mm <sup>2</sup>																					
3 dias	Aprox. 28 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 30 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 31 N/mm <sup>2</sup>																					
7 dias	Aprox. 34 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 36 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 30 N/mm <sup>2</sup>																					
14 dias	Aprox. 38 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 35 N/mm <sup>2</sup>	Aprox. 32 N/mm <sup>2</sup>																					
<b>Aderência</b>	(EN ISO 4624, EN 1542 e EN 12188)																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tempo</th> <th>Temperatura</th> <th>Base</th> <th>Aderência</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7 dias</td> <td>+10 °C</td> <td>Betão seco</td> <td>&gt; 3 N/mm<sup>2</sup>(1)</td> </tr> <tr> <td>7 dias</td> <td>+10 °C</td> <td>Betão húmido</td> <td>&gt; 3 N/mm<sup>2</sup>(1)</td> </tr> <tr> <td>7 dias</td> <td>+25 °C</td> <td>Aço</td> <td>Aprox. 20 N/mm<sup>2</sup></td> </tr> </tbody> </table>	Tempo	Temperatura	Base	Aderência	7 dias	+10 °C	Betão seco	> 3 N/mm <sup>2</sup> (1)	7 dias	+10 °C	Betão húmido	> 3 N/mm <sup>2</sup> (1)	7 dias	+25 °C	Aço	Aprox. 20 N/mm <sup>2</sup>							
Tempo	Temperatura	Base	Aderência																					
7 dias	+10 °C	Betão seco	> 3 N/mm <sup>2</sup> (1)																					
7 dias	+10 °C	Betão húmido	> 3 N/mm <sup>2</sup> (1)																					
7 dias	+25 °C	Aço	Aprox. 20 N/mm <sup>2</sup>																					
	(1) 100% falha do betão																							
<b>Módulo elástico</b>	Tração: ~ 3800 N/mm <sup>2</sup> (14 dias a +23 °C). (ISO 527) Flexão: ~ 3700 N/mm <sup>2</sup> (14 dias a +23 °C). (DIN EN 53452) Compressão: ~ 3300 N/mm <sup>2</sup> (14 dias a +23 °C). (ASTM D 695-95)																							
<b>Alongamento à ruptura</b>	1,3 ± 0,1 % (14 dias a +23 °C). (ISSO 527)																							
<b>Informação sobre o sistema</b>																								
<b>Pormenores de aplicação</b>																								
<b>Consumo / Dosagem</b>	Aprox. 1,2 – 1,4 kg/m <sup>2</sup> por mm de espessura.																							

<b>Qualidade da base</b>	<p>Argamassa e betão devem ter mais de 28 dias (dependendo dos requisitos mínimos de resistência). Verificar a resistência do suporte (betão, alvenaria de tijolo ou pedra natural).</p> <p>A superfície deve estar limpa, seca e livre de contaminantes, como sujidade, óleo, gordura, tratamentos ou revestimentos existentes, etc.</p> <p>O aço deve estar isento de ferrugem e limpo ao grau Sa 2,5.</p> <p>O substrato deve estar sólido e livre de partículas soltas que devem ser removidas.</p>
<b>Preparação da base</b>	<p><i>Suportes em betão, argamassa, pedra ou tijolo:</i></p> <p>O betão e outros suportes minerais devem ser convenientemente preparados através de meios como jacto de água ou de areia de alta pressão, para obter superfícies sólidas, limpas, secas ou ligeiramente húmidas (sem água visível) e sem leitança cimento, gelo, água, gordura, óleo, tintas ou outros revestimentos antigos. As partículas soltas devem ser também removidas para obter uma superfície sem contaminantes e de poro aberto.</p> <p><i>Aço:</i></p> <p>A superfície do aço deve ser limpa e preparada adequadamente ao grau Sa 2,5, por exemplo, por jacto de areia, removendo toda a poeira.</p> <p>Ter atenção à condensação de água (ponto de orvalho).</p>
<b>Condições de aplicação / Limitações</b>	
<b>Temperatura da base</b>	Mínima: +10 °C. / Máxima: +30 °C.
<b>Temperatura ambiente</b>	Mínima: +10 °C. / Máxima: +30 °C.
<b>Temperatura do material</b>	Sikadur <sup>®</sup> -32 EF deve aplicar-se a temperaturas entre +10 °C e +30 °C.
<b>Humidade da base</b>	A base deve estar seca ou húmida com aspecto mate (sem água visível). Neste caso aplicar com brocha fazendo o material impregnar bem a base.
<b>Ponto de orvalho</b>	Ter atenção à condensação! A temperatura ambiente durante a aplicação deve estar pelo menos 3 °C acima do ponto de orvalho.
<b>Instruções de aplicação</b>	
<b>Relação de mistura</b>	Componente A : componente B = 1:2 (partes em peso ou volume).
<b>Mistura</b>	 <p>Misturar os componentes A e B durante pelo menos 3 minutos com um misturador eléctrico de baixa rotação (máx. 600 rpm) até o material se apresentar com uma consistência cremosa e uma cor uniforme. Evitar a introdução de ar durante a mistura. Transferir a mistura para um recipiente limpo e misturar novamente durante cerca de 1 minuto. Misturar apenas a quantidade que vai ser utilizada dentro do tempo de vida útil do produto.</p>
<b>Aplicação</b>	<p>Aplicar o produto sobre o suporte preparado através da utilização de trincha, rolo, espátula de borracha, etc. garantindo uma boa impregnação completa e uniforme.</p> <p>Sobre betão preparado mecanicamente para receber betão fresco, aplicar com trincha, impregnando bem a primeira camada.</p> <p>Colocar o betão fresco enquanto o produto ainda está colativo. Se o material começar a brilhar e perder aderência, aplicar uma nova camada de produto.</p>
<b>Limpeza de ferramentas</b>	Limpar todas as ferramentas e equipamento com Solutol de Limpeza Colma imediatamente após a utilização. Material curado/endurecido só pode ser removido mecanicamente.

**Tempo aberto** Tempo aberto (200g) (ISO 9514)

Temperatura	+10 °C	+23 °C	+30 °C
Tempo aberto	~160 minutos	~45 minutos	~34 minutos

O tempo de vida útil começa quando os dois componentes são misturados e é mais curto a temperaturas mais elevadas e mais longo a baixas temperaturas. Quanto maior a quantidade de mistura, menor a sua vida útil. Para aumentar a vida da mistura a altas temperaturas, arrefecer os componentes antes da mistura (nunca abaixo de +5 °C).

**Vida da mistura** Tempo para aplicar: 60 minutos (a +20 °C).

**Importante** As resinas Sikadur<sup>®</sup> são formuladas para ter pouco fluência sob cargas permanentes. No entanto, devido à fluência que todos os materiais poliméricos apresentam sob carga, o projecto de cargas a longo prazo deve levar em conta este efeito. Geralmente, as cargas de projecto a longo prazo devem ser inferiores em 20-25% da resistência do adesivo. Consultar um projectista de estruturas para cálculo de carga para a situação concreta.

**Nota** Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.

## Risco e segurança

**Medidas de segurança** Para informações complementares sobre o manuseamento, armazenagem e eliminação de resíduos do produto consultar a respectiva Ficha de Dados de Segurança e o rótulo da embalagem.

*\*O produto está seguro na C\* Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nºCH00003018LI05A), a título de responsabilidade civil do fabricante.*  
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 no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão 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 fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites 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 específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que solicitada.



Sika Portugal, SA  
R. de Santarém, 113 Tel: +351 22 377 69 00  
4400-292 V. N. Gaia Fax: +351 22 370 20 12  
Portugal prt.sika.com



Sikadur-32 EF 4/4



# Eporip

**Adesivo epoxídico bicomponente, isento de solventes, para a ligação entre juntas de betonagem e para a selagem monolítica de fissuras em massames**



#### **CAMPOS DE APLICAÇÃO**

- Ligação entre juntas de betonagem de betão fresco e betão antigo.
- Colagem de elementos prefabricados em betão.
- Colagem mista de betão e aço.
- Enchimento de fissuras no betão.

#### **Alguns exemplos de aplicação**

- Ligação entre juntas de betonagem para reforço estrutural de travessas e pilares.
- Ligação entre juntas de betonagem sobre pavimentos industriais degradados.
- Ligação entre juntas de betonagem em junções rígidas impermeáveis (por exemplo, placa-muro de elevação de tanques).
- Reforço de travessas através da técnica do beton-plaquê.
- Selagem de fissuras ou fendas de massames cimentícios.

#### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

O **Eporip** é um adesivo epoxídico isento de solventes, constituído por dois componentes predoseados (componente A = resina e componente B = endurecedor) que têm de ser misturados antes da utilização.

O **Eporip** tem a consistência de uma pasta ligeiramente tixotrópica que pode ser aplicada com pincel, quer em superfícies horizontais quer verticais.

O **Eporip** polimeriza sem retração, sendo impermeável à água após o endurecimento total; possui excelentes propriedades dieléctricas e características mecânicas elevadas, para além de aderir ao betão e ao aço.

#### **RECOMENDAÇÕES**

- Não aplicar o **Eporip** a temperaturas inferiores a +5°C.
- Não aplica o **Eporip** em superfícies molhadas (no entanto, tolera uma ligeira humidade).
- Não lançar betão fresco sobre **Eporip** endurecido.
- Não aplicar o **Eporip** sobre suportes com pó, fráveis e inconsistentes.

#### **MODO DE APLICAÇÃO**

##### **Preparação dos suportes**

A superfície do betão, antes da aplicação do **Eporip**, deve estar perfeitamente limpa e sólida. Partes fráveis ou em fase de desagregação, pó, crostas de cimento, resíduos de óleo descofrante, verniz ou pinturas anteriormente aplicadas devem ser eliminados por meio de cuidadosa decapagem com jacto de areia ou escovagem.

Para aplicações sobre metal, remover previamente eventuais resíduos de ferrugem e gorduras. O jacto de areia é muito indicado para esta finalidade; recomenda-se repetir a operação até que o metal fique branco.

##### **Preparação do empaste**

As duas partes que compõem o **Eporip** devem ser misturadas entre si.

Verter o componente B (branco) no componente A (preto) e misturar à mão com uma espátula para



# Eporip



Aplicação do Eporip com pincel para represa de lançamento



Reparação de fissura em massa de cimento com Eporip

DADOS TÉCNICOS (valores típicos)		
<b>ELEMENTOS IDENTIFICATIVOS DO PRODUTO</b>		
	componente A	componente B
Consistência:	pasta fluida	pasta fluida
Cor:	preto	branco
Massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> ):	1,45	1,02
Viscosidade Brookfield (mPa·s):	18000 (rotor 6 - 10 rotações)	1500 (rotor 2 - 10 rotações)
Conservação:	24 meses na embalagem original fechada a uma temperatura entre +5°C e +30°C	
Classificação de perigo segundo a Directiva 99/45/CE:	Irritante, perigoso para o ambiente Consultar, antes da utilização, o parágrafo "Instruções de Segurança para a preparação e a aplicação em obra" e as informações mencionadas na embalagem e na Ficha de Segurança	
Classificação aduaneira:	3506 99 90	
<b>DADOS DE APLICAÇÃO a +23°C e 50% H.R.</b>		
Relação da mistura:	componente A : componente B = 3 : 1	
Consistência da mistura:	pasta fluida	
Cor da mistura:	cinzento	
Massa volúmica da mistura (kg/m <sup>3</sup> ):	1350	
Viscosidade Brookfield (mPa·s):	4500 (rotor 5 - 20 rotações)	
Tempo de trabalhabilidade (min.):		
- a +10°C:	90	
- a +23°C:	60	
- a +30°C:	40	
Tempo aberto (horas):		
- a +10°C:	5-6	
- a +23°C:	3-4	
- a +30°C:	1,5-2,5	
Temperatura mínima de aplicação:	+5°C	
Endurecimento completo:	7 dias	
<b>PRESTAÇÕES FINAIS</b>		
Aderência ao betão (N/mm <sup>2</sup> ):	3,0 (rotura do betão)	
Resistência à compressão (N/mm <sup>2</sup> ) (ASTM C 579):	50	
Resistência à flexão (N/mm <sup>2</sup> ) (ISO 178):	35	
Módulo elástico de compressão (N/mm <sup>2</sup> ) (ASTM C 579):	3500	
Módulo elástico de flexão (N/mm <sup>2</sup> ) (ISO 178):	2500	

pequenas embalagens ou com berbequim dotado de agitador de baixas rotações para embalagens grandes, até atingir uma homogeneização perfeita (cor cinzenta uniforme).

Não retirar quantidades parciais das embalagens, para evitar erros de proporção que provocariam o endurecimento incompleto do **Eporip**.

#### Aplicação do empaste

O **Eporip** pode ser aplicado sobre betão seco ou ligeiramente húmido e sobre metal com um pincel ou uma espátula. Recomenda-se deixar penetrar muito bem o produto em zonas particularmente irregulares e porosas, de modo a assegurar a perfeita aderência à totalidade da superfície a colar. O escoamento posterior de betão fresco deverá ser efectuado dentro do tempo aberto relativo às várias temperaturas indicadas nos dados técnicos.

No caso de selagens de fissuras com amplitude superior a 0,5 mm, o **Eporip** pode ser aplicado por simples derrame. Neste caso, aconselha-se polvilhar a superfície do **Eporip** com areia para favorecer a aderência dos produtos a aplicar posteriormente. As fissuras de amplitude inferior a 0,5 mm devem ser devidamente alargadas e, em seguida, bem limpas do pó, antes de se proceder à reparação com **Eporip**. Evitar utilizar o **Eporip** quando a temperatura exterior e do suporte é inferior a +5°C.

#### Limpeza

As ferramentas utilizadas na preparação e aplicação do **Eporip** devem ser limpas com solventes (álcool etílico, xileno, tolueno, etc.), imediatamente após a sua utilização.

#### CONSUMO

O consumo varia em função das irregularidades presentes no substrato e do método utilizado para a aplicação.

Indicativamente:

- juntas de trabalho de substrato rugoso: 0,5-0,7 kg/m<sup>2</sup>
- juntas de trabalho de substrato muito irregular: 1,0-2,0 kg/m<sup>2</sup>
- selagem de fissuras: 1,35 kg/dm<sup>3</sup> de cavidade a encher
- colagem de elementos prefabricados em betão ou aço-betão 1,35 kg/m<sup>2</sup> por mm de espessura

#### EMBALAGENS

Embalagens de 10 kg (componente A: 7,5 kg + componente B: 2,5 kg) e de 2 kg (componente A: 1,5 kg + componente B: 0,5 kg).

#### ARMAZENAGEM

24 meses nas embalagens originais. Manter o produto em local seco, abrigado e fresco, a temperaturas compreendidas entre +5°C e +30°C.

#### INSTRUÇÕES DE SEGURANÇA PARA A PREPARAÇÃO E A APLICAÇÃO EM OBRA

Ambos os componentes de **Eporip** são irritantes por contacto directo. Além disso, na sequência de contactos repetidos, podem manifestar-se fenómenos de sensibilização cutânea.

Usar sempre luvas durante as operações de aplicação e proteger os olhos, em particular durante a fase de mistura dos dois componentes. Em caso de contacto com a pele, lavar com bastante água e sabão. Caso se manifestem fenómenos de sensibilização, consultar um médico.

No caso de contacto com os olhos, lavar com muita água corrente e consultar um médico.

O **Eporip** componente A é tóxico para os organismos aquáticos: não dispersar no ambiente.

PRODUTO PARA PROFISSIONAIS.

#### ADVERTÊNCIA

*As indicações e prescrições acima descritas, embora correspondendo à nossa melhor experiência, devem considerar-se, em todos os casos, como puramente indicativas e devem ser confirmadas por aplicações práticas exaustivas; portanto, antes de empregar o produto, quem tencione dele fazer uso é obrigado a determinar se este é ou não adequado à utilização prevista, assumindo todavia toda a responsabilidade que possa advir do seu uso.*

**As referências relativas a este produto estão disponíveis a pedido**

# Eporip



O PARCEIRO MUNDIAL DOS CONSTRUTORES

## SISTEMAS DE GESTÃO CERTIFICADOS (Qualidade, Ambiente e Segurança) do GRUPO MAPEI



MAPEI S.p.A. - ITALY



MAPEI SUISSE SA MAPEI INC. - HUNGARY MAPEI I.L.C. - CZECH REP. MAPEI CORP. - U.S.A. MAPEI INC. - CANADA MAPEI ARGENTINA S.A.



MAPEI FRANCE RESCON MAPEI AS - NORWAY

[www.mapoi.com](http://www.mapoi.com)

PT 4.0.017A

Qualquer reprodução de texto, foto-grafia ou ilustração desde patentes e proutidas pntida nos termos da lei em vigor

366-5-2005

## Kerabuild® Eco Epoprimer

Adesivo orgânico mineral, eco-compatível, fluido, para juntas de betonagem de elementos em betão, a selagem de fissuras em betonilhas minerais ou cimentícias e ancoragens de varões de aço a betão, ideal no GreenBuilding. Isento de solventes, respeita a saúde dos aplicadores.

O Kerabuild® Eco Epoprimer está em conformidade com os requisitos de desempenho exigidos pela EN 1504-4 para colagens estruturais.



### GREENBUILDING RATING®

	Teor de minerais naturais 30%	Isento de solventes	Não tóxico ao longo da vida	Não tóxico ao longo da vida	Não tóxico ao longo da vida

SISTEMA DE MEDIÇÃO CERTIFICADO PELO ORGANISMO DE CERTIFICAÇÃO GBC

### PLUS PRODUTO

- Excelente fluidez
- Resistente às agressões químicas ambientais (EN 206)

### KERABUILD® REPAIR SYSTEM



**KERABUILD® REPAIR SYSTEM** consiste numa série de soluções de recuperação e consolidação, todas de acordo com os Princípios definidos pela EN 1504-9 (Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas em betão: definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação da conformidade. Princípios gerais para o uso de produtos e de sistemas), formuladas em relação ao elemento estrutural afectado pela intervenção e aos objectivos que se pretendem atingir. Cada uma das soluções propostas garante a obtenção de um Tempo de Vida Útil de Projecto (DWL) de 50 ou de 100 anos, de acordo com o previsto pelos Eurocódigos no âmbito europeu.

### CAMPOS DE APLICAÇÃO

#### Destinos de utilização

Juntas de betonagem no extradorso de estruturas horizontais entre betão endurecido e fresco.  
Selagem de fissuras em betonilhas cimentícias, ancoragens de varões de aço a betão.

### INDICAÇÕES DE USO

#### Preparação

O Kerabuild® Eco Epoprimer prepara-se misturando, manualmente ou com misturador mecânico com baixo número de rotações, o componente A com o componente B (relação pré-doseada 2 : 1 nas embalagens) até se obter uma pasta fluida, de cor uniforme.

A quantidade misturada, a temperatura do ambiente e do suporte podem fazer variar o tempo de trabalhabilidade: temperaturas elevadas ou grandes quantidades misturadas correspondem a um tempo de trabalhabilidade mais curto.

Para efectuar ancoragens de varões com espessuras de enchimento superiores a 10 mm pode-se misturar o Kerabuild® Eco Epoprimer com areia de quartzo na relação máxima de 2 : 1 em volume sem que seja alterada, de forma significativa, a fluidez da mistura.

#### Aplicação

Antes de aplicar o Kerabuild® Eco Epoprimer deve-se tomar áspero e limpo o substrato em betão através de escovagem ou, de preferência, através de jacto de areia, eliminando qualquer resíduo de pó, gordura, óleos e outras substâncias contaminantes, até se obter um substrato limpo e bem coeso.

O Kerabuild® Eco Epoprimer aplica-se com pincel, espátula ou por projecção com airless. A betonagem do betão fresco deve ser executada sobre a resina fresca, antes da formação da película superficial de início da polimerização.

A selagem das fissuras realiza-se pelo simples escoamento do Kerabuild® Eco Epoprimer; para a selagem de fissuras de largura inferior a 0,5 mm, é necessário alargar previamente a fissura com uma rebarbadora e remover os resíduos de pó com ar comprimido.

#### Limpeza

A limpeza das ferramentas, dos resíduos de Kerabuild® Eco Epoprimer, efectua-se com solventes (álcool etílico, tolueno, xileno).

**KERA/KOLL**  
The GreenBuilding Company

## ESPECIFICAÇÃO

Juntas de betonagem estruturais entre betão fresco e endurecido, através da aplicação com pincel ou por projecção com airless de um sistema epoxídico bicomponente, fluido (tipo Kerabuild® Eco Epoprimer da Kerakoll SpA), e selagem de fissuras em elementos horizontais de betão, através de escoamento de um sistema epoxídico bicomponente provido de marcação CE, GreenBuilding Rating Eco 3 e em conformidade com os requisitos de desempenho exigidos pela Norma EN 1504-4 para produtos para colagem estrutural.

## DADOS TÉCNICOS SEGUNDO A NORMA DE QUALIDADE KERAKOLL

Aspecto	parte A líquido verde, parte B líquido bege	
Massa volumica	parte A 1650 kg/m <sup>3</sup> – parte B 1350 kg/m <sup>3</sup>	
Conservação	≈ 12 meses na embalagem original	
Advertências	evitar o gelo, evitar exposição solar directa e fontes de calor	
Embalagem	monopack parte A 2 kg + parte B 1 kg	
Relação de mistura	parte A : parte B = 2 : 1	
Viscosidade mistura	≈ 2800 mPa·s (rotor 3 RPM 50)	método Brookfield
Fluidez da mistura	≥ 129 mm	
Massa volumica da mistura	≈ 1550 kg/m <sup>3</sup>	
Duração da mistura (1 kg):		
- a +5 °C	≥ 100 min	
- a +23 °C	≥ 45 min	
- a +30 °C	≥ 30 min	
Temperaturas de aplicação	de +5 °C a +30 °C	
Rendimento	≈ 1,6 kg/m <sup>2</sup> por mm de espessura	

## PERFORMANCE

HIGH-TECH				
Características de desempenho	Método de ensaio	Requisitos exigidos EN 1504-4		Desempenho Kerabuild® Eco Epoprimer
Aderência/resistência de colagem	EN 12636	aderência ao betão endurecido	rotura do betão no ensaio de flexão	especificação superada
Resistência ao corte	EN 12615	≥ 6 N/mm <sup>2</sup>		> 6 N/mm <sup>2</sup>
Resistência à compressão	EN 12190	≥ 30 N/mm <sup>2</sup>		> 30 N/mm <sup>2</sup>
Retração total	EN 12617-1	retração percentual	≤ 0,1%	< 0,01%
Trabalhabilidade a +20 °C	EN ISO 9514	medido com ≈ 0,5 kg de produto	–	50 min.
Sensibilidade à água	EN 12636	aderência ao betão fresco	rotura do betão no ensaio de flexão	especificação superada
Temperatura de transição vítrea	EN 12614	> 40 °C		> 40 °C
Módulo de elasticidade em compressão	EN 13412	≥ 2000 N/mm <sup>2</sup>		> 2000 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de dilatação térmica	EN 1770	medido entre -25 °C e +60 °C	≤ 100x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	< 100x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Durabilidade (resistência a ciclos de gelo-degelo)	UNI EN 13733	teste por compressão > à resistência à tracção do betão	nenhuma rotura dos provetes de aço sobre aço	especificação superada

0011 Kerabuild® Eco Epoprimer Code: E20 #12103 - PT

**KERAKOLL**  
The GreenBuilding Company

## ADVERTÊNCIAS

### - Produto para uso profissional

- respeitar eventuais normas e regulamentos nacionais
- trabalhar com temperaturas entre +5 °C e +30 °C
- aplicar sobre suportes secos
- não aplicar sobre superfícies sujas ou incoerentes
- proteger as superfícies limítrofes para evitar resíduos e manchas de remoção difícil
- limpar as ferramentas imediatamente após utilização com solventes (álcool etílico, tolueno, xileno)
- usar sempre luvas e óculos tanto durante a mistura como durante a aplicação
- evitar qualquer tipo de contacto com a pele. Usar em ambientes bem arejados
- em caso de necessidade, solicitar a ficha de segurança
- para mais informação, consultar o Kerakoll Worldwide Global Service +351 21 986 24 91 - info@kerakoll.pt

00114Kerakoll® Eco Espalhar Cód. E126 2002/07 - PT

Os dados relativos à classificação Eco e Eto são referidos no GreenBuilding Rating Manual 2011. As presentes informações foram actualizadas em Abril de 2012 (ref. GBR Data Report - 01.12), determino-se que as mesmas podem ser sujeitas a alterações e/ou variações no tempo por parte da KERAKOLL SpA, para essas eventuais actualizações, pode ser consultado o site [www.kerakoll.com](http://www.kerakoll.com). A KERAKOLL SpA responde, portanto, pela validade, actualidade e actualização das próprias informações apenas se retiradas directamente do seu site. A ficha técnica é redigida com base nos nossos melhores conhecimentos técnicos e de aplicação. Não podendo, no entanto, intervir directamente nas condições das obras e sobre a execução dos trabalhos, contém indicações de carácter geral que de modo algum vinculam a nossa Empresa. Aconselha-se, portanto, um ensaio prévio a fim de verificar a idoneidade do produto à utilização prevista.



**KERAKOLL**  
The GreenBuilding Company

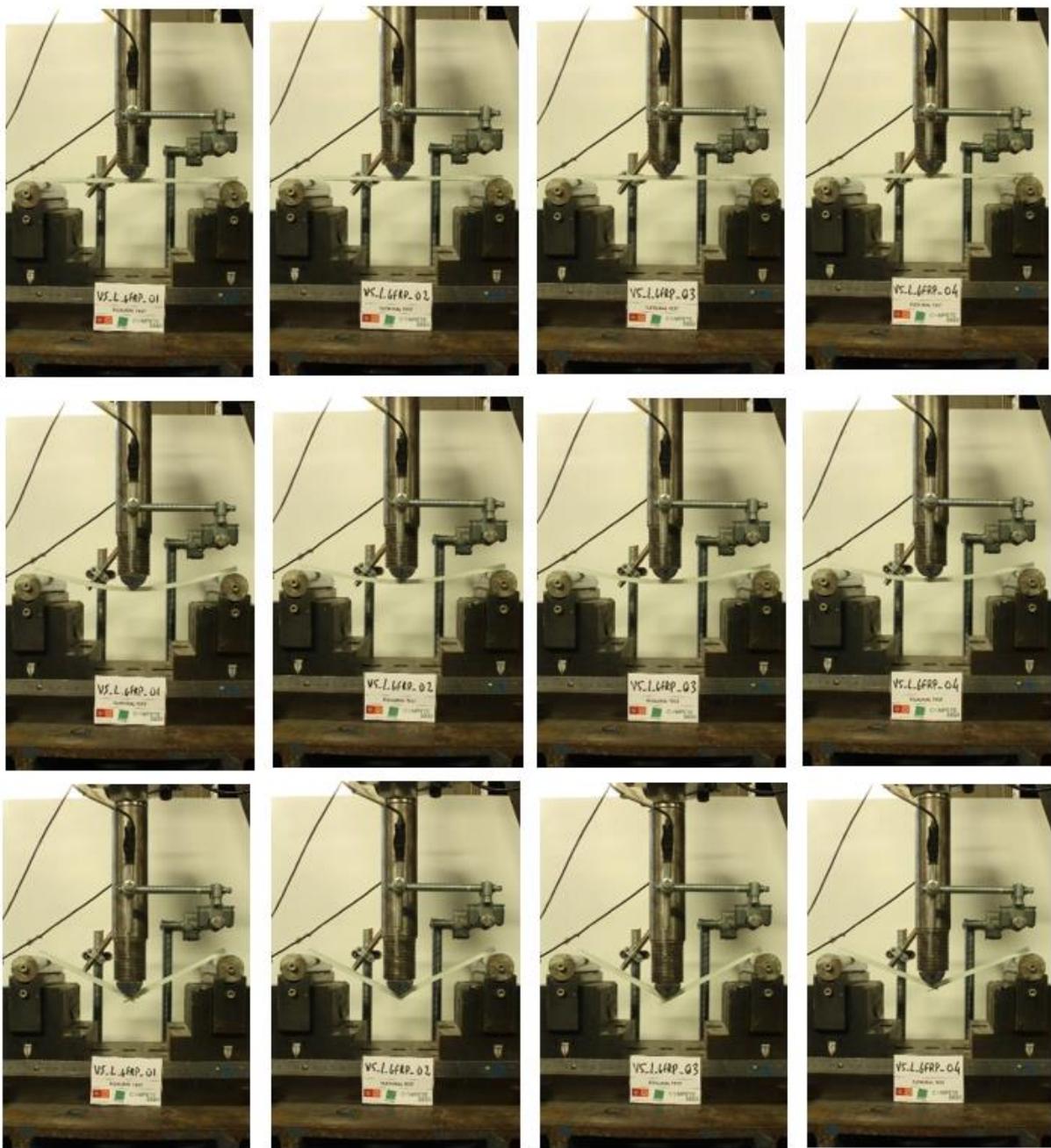
KERAKOLL PORTUGAL S.A.  
Núcleo Empresarial da Venda do Pinheiro  
Quinta dos Estrangelos, Bloco 2 - Fracção 96 e 97  
2665-602 Venda do Pinheiro MFR - Portugal  
Tel +351 21 986 24 91 - Fax +351 21 986 24 92  
Info@kerakoll.pt - [www.kerakoll.com](http://www.kerakoll.com)



## ANEXO II – Modos de rotura dos Ensaios de Flexão em provetes de GFRP



Figura II.1 – Modos de rotura: (a) V1\_GFRP\_L\_01; (b) V1\_GFRP\_L\_02; (c) V1\_GFRP\_L\_03; (d) V1\_GFRP\_L\_04.



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura II.2 – Modos de rotura: (a) V2\_GFRP\_L\_01; (b) V2\_GFRP\_L\_02; (c) V2\_GFRP\_L\_03; (d) V2\_GFRP\_L\_04.

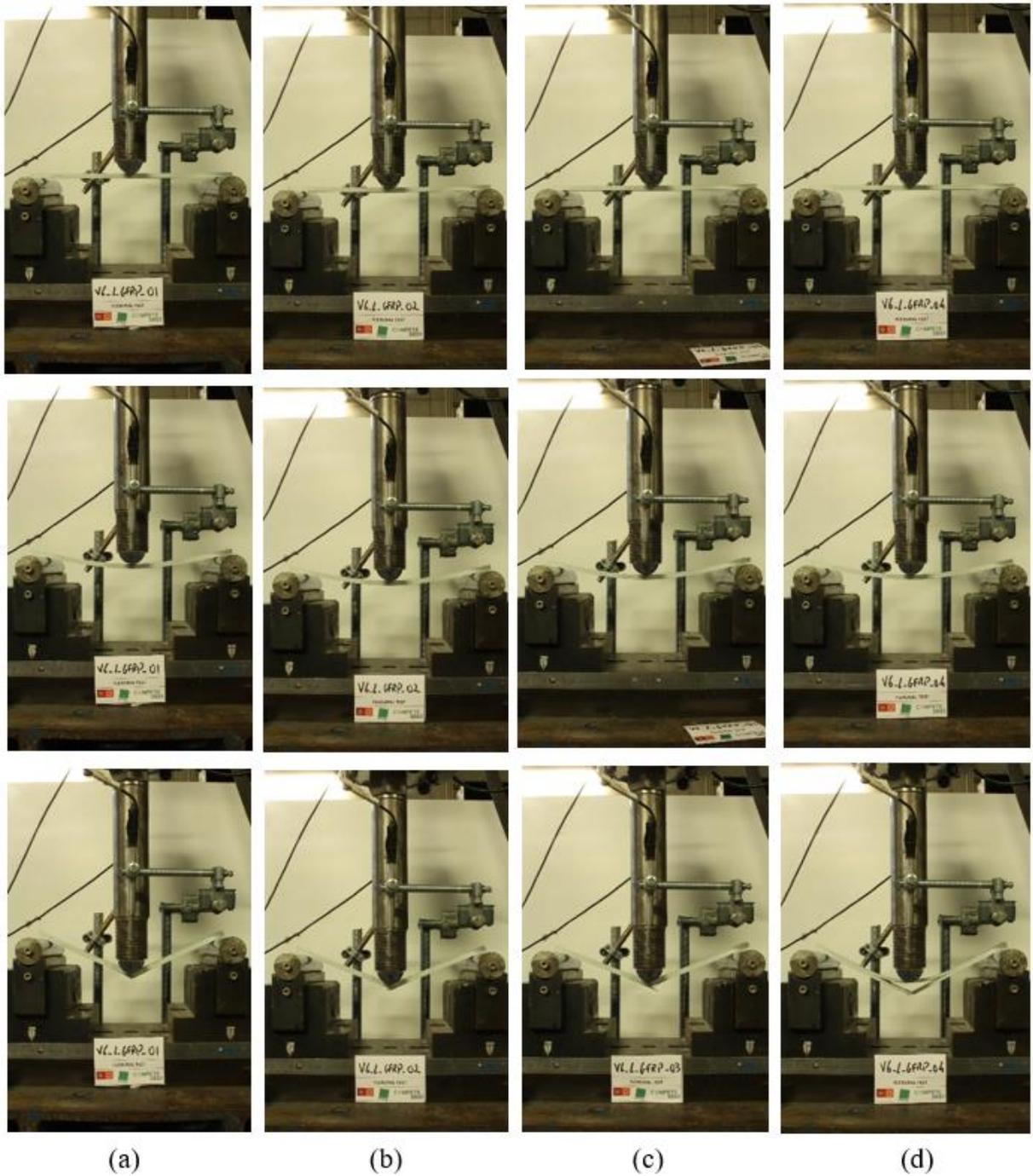


Figura II.3 – Modos de rotura: (a) V3\_GFRP\_L\_01; (b) V3\_GFRP\_L\_02; (c) V3\_GFRP\_L\_03; (d) V3\_GFRP\_L\_04.

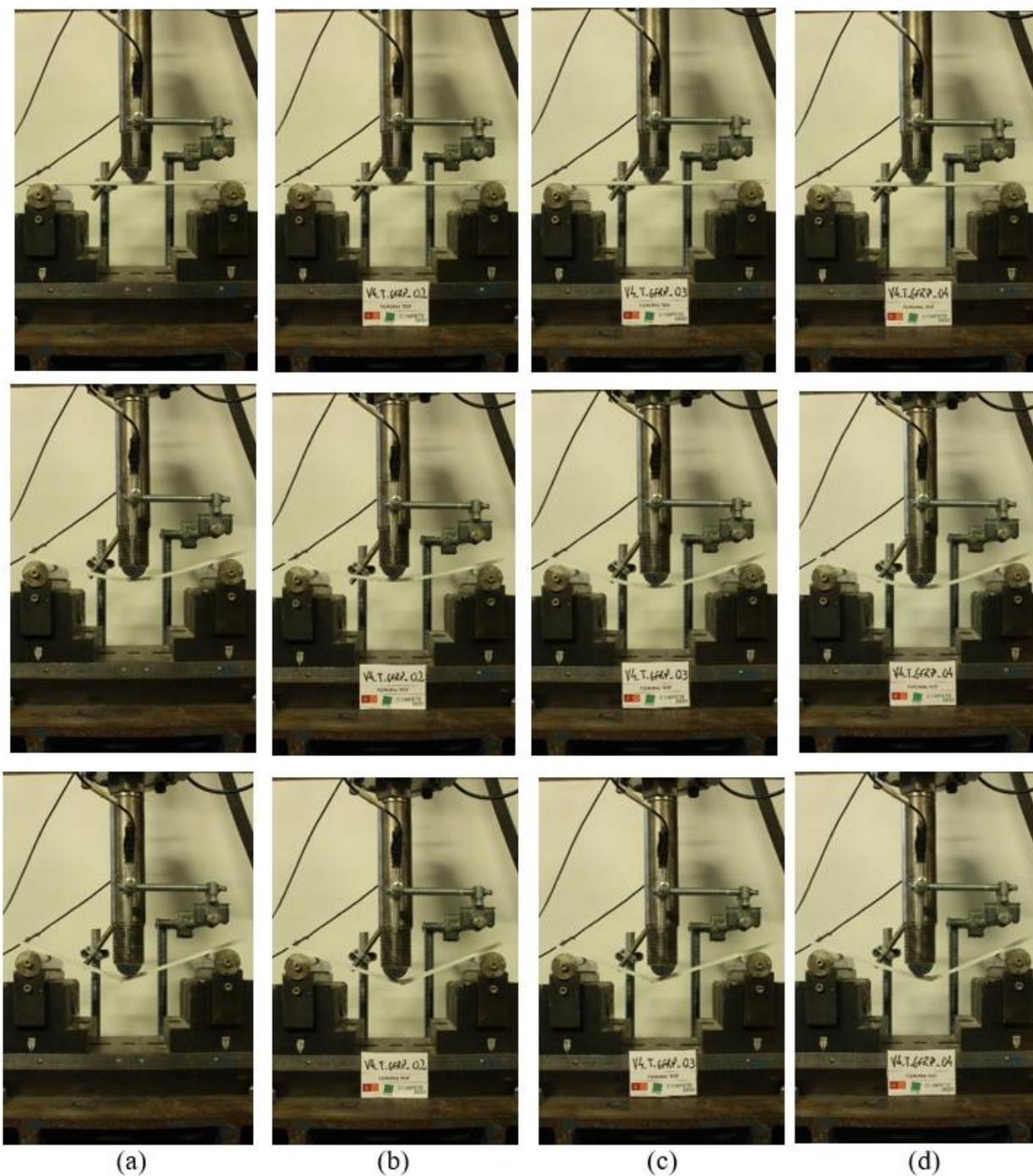


Figura II.4 – Modos de rotura: (a) V1\_GFRP\_T\_01; (b) V1\_GFRP\_T\_02; (c) V1\_GFRP\_T\_03; (d) V1\_GFRP\_T\_04.

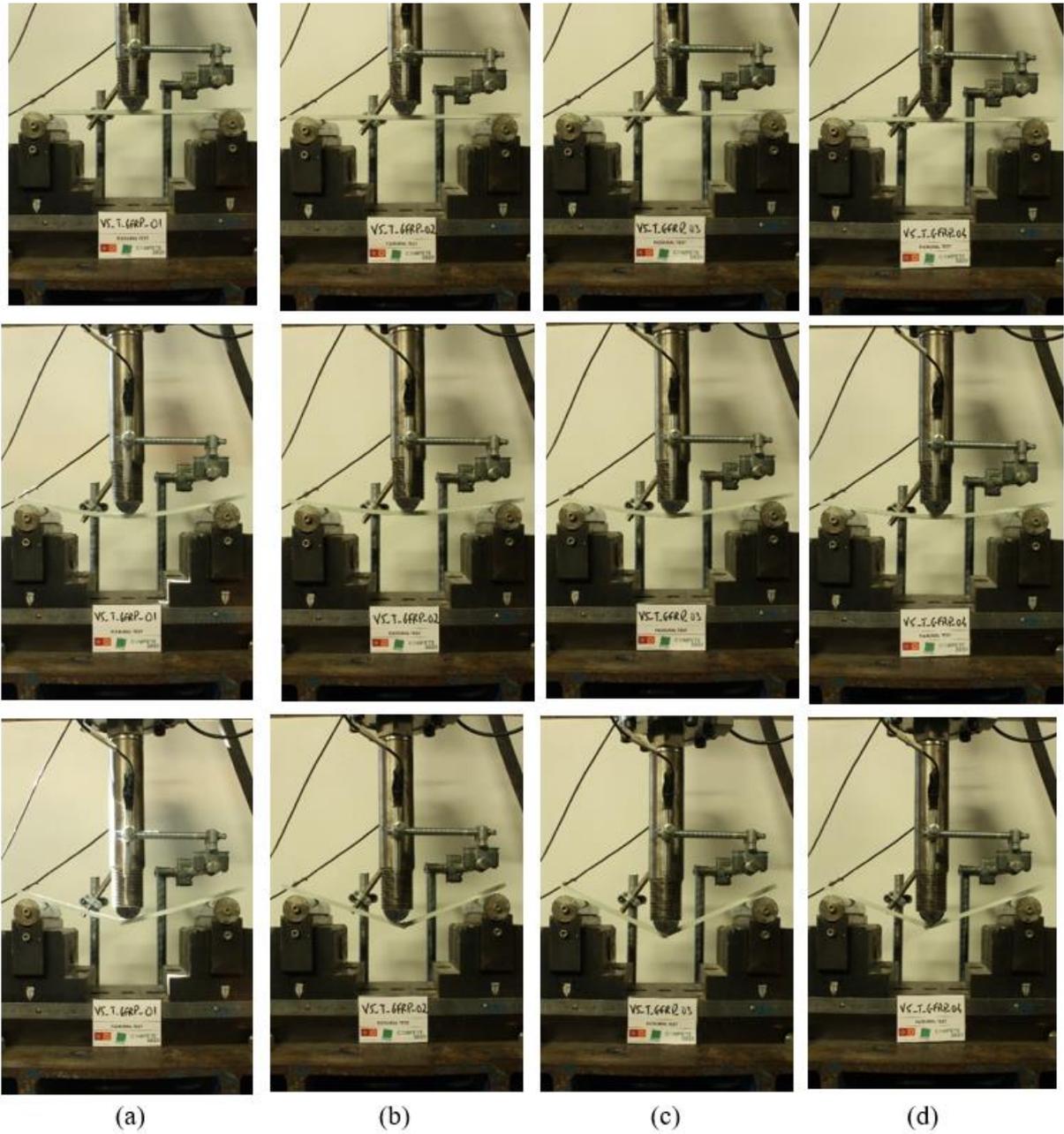


Figura II.5 – Modos de rotura: (a) V2\_GFRP\_T\_01; (b) V2\_GFRP\_T\_02; (c) V2\_GFRP\_T\_03; (d) V2\_GFRP\_T\_04.

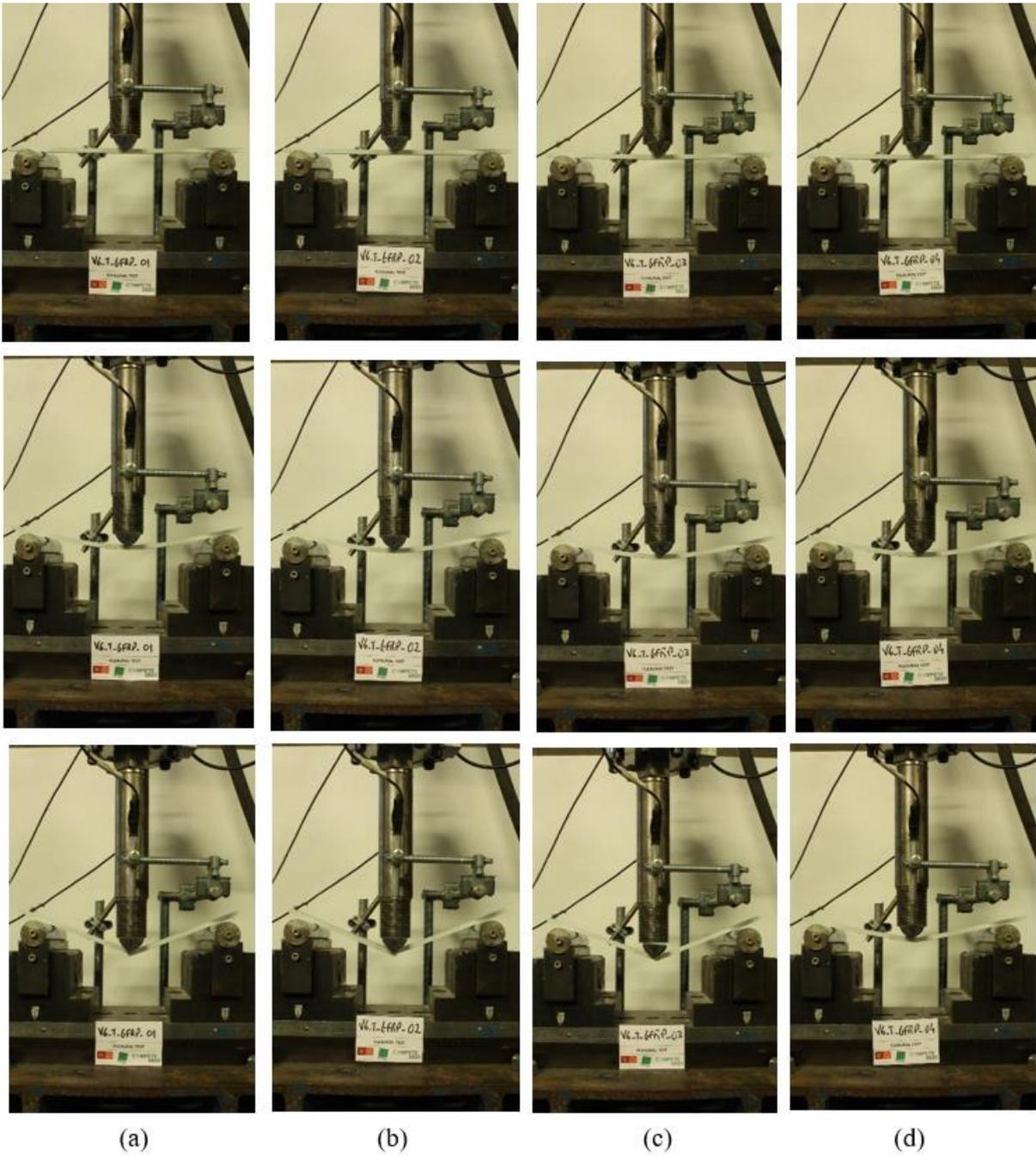


Figura II.6 – Modos de rotura: (a) V3\_GFRP\_T\_01; (b) V3\_GFRP\_T\_02; (c) V3\_GFRP\_T\_03; (d) V3\_GFRP\_T\_04.

### ANEXO III – Modos de rotura dos Ensaios de Tração Direta em provetes de GFRP



Figura III.1 – Modos de rotura: (a) V1\_GFRP\_L\_01; (b) V1\_GFRP\_L\_02; (c) V1\_GFRP\_L\_03.

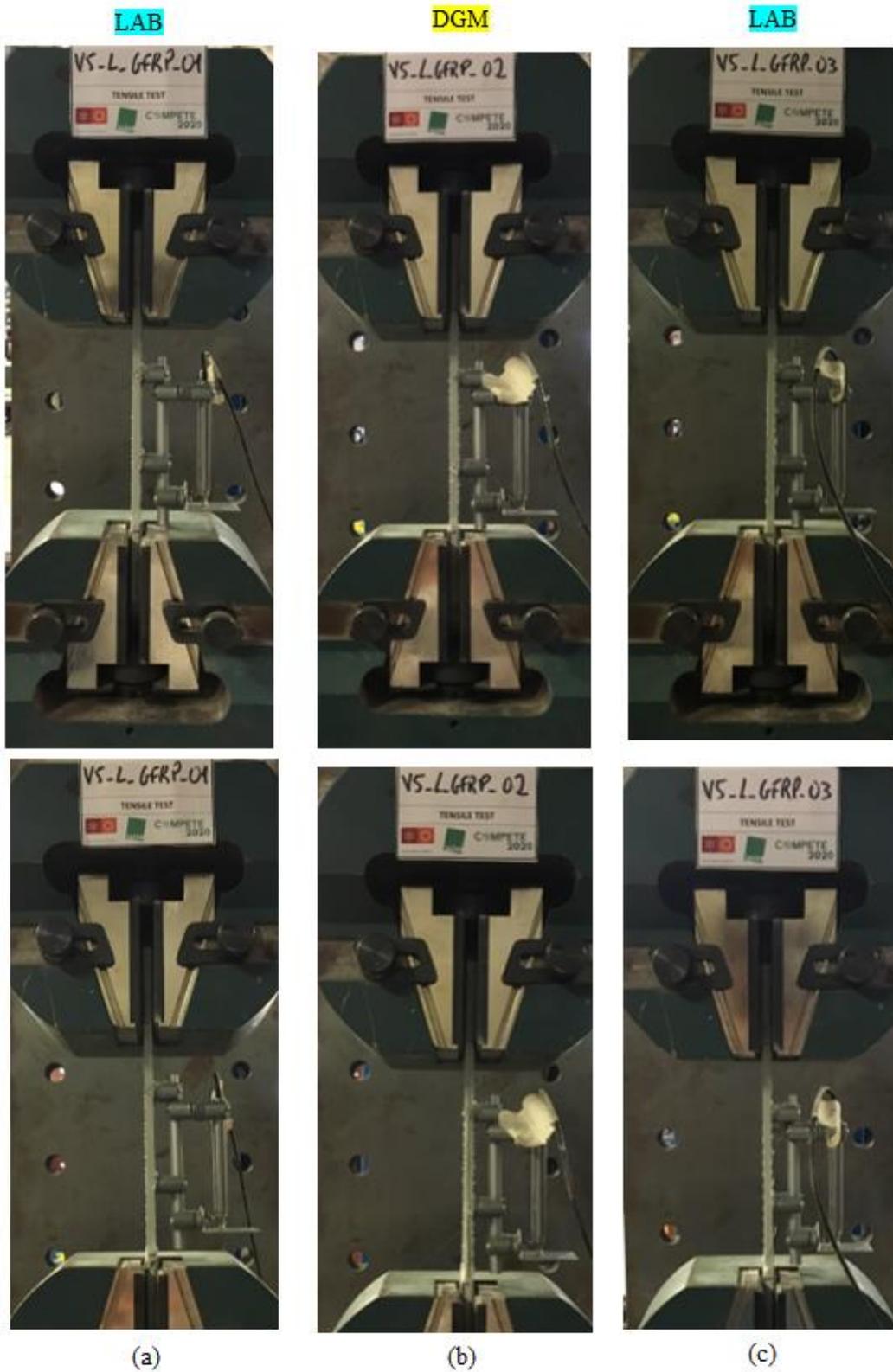


Figura III.2 – Modos de rotura: (a) V2\_GFRP\_L\_01; (b) V1\_GFRP\_L\_02; (c) V1\_GFRP\_L\_03.

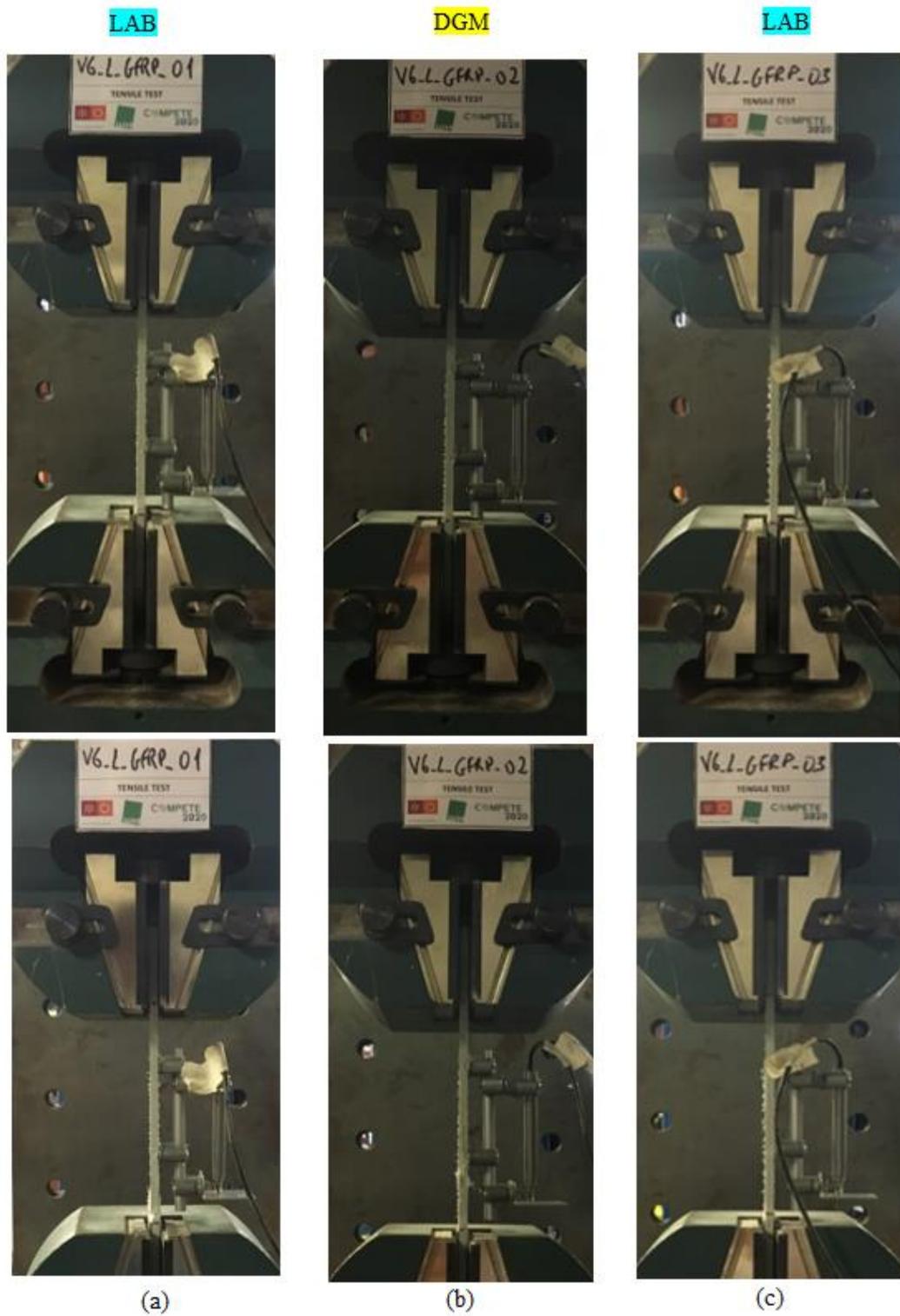


Figura III.3 – Modos de rotura: (a) V3\_GFRP\_L\_01; (b) V3\_GFRP\_L\_02; (c) V3\_GFRP\_L\_03.

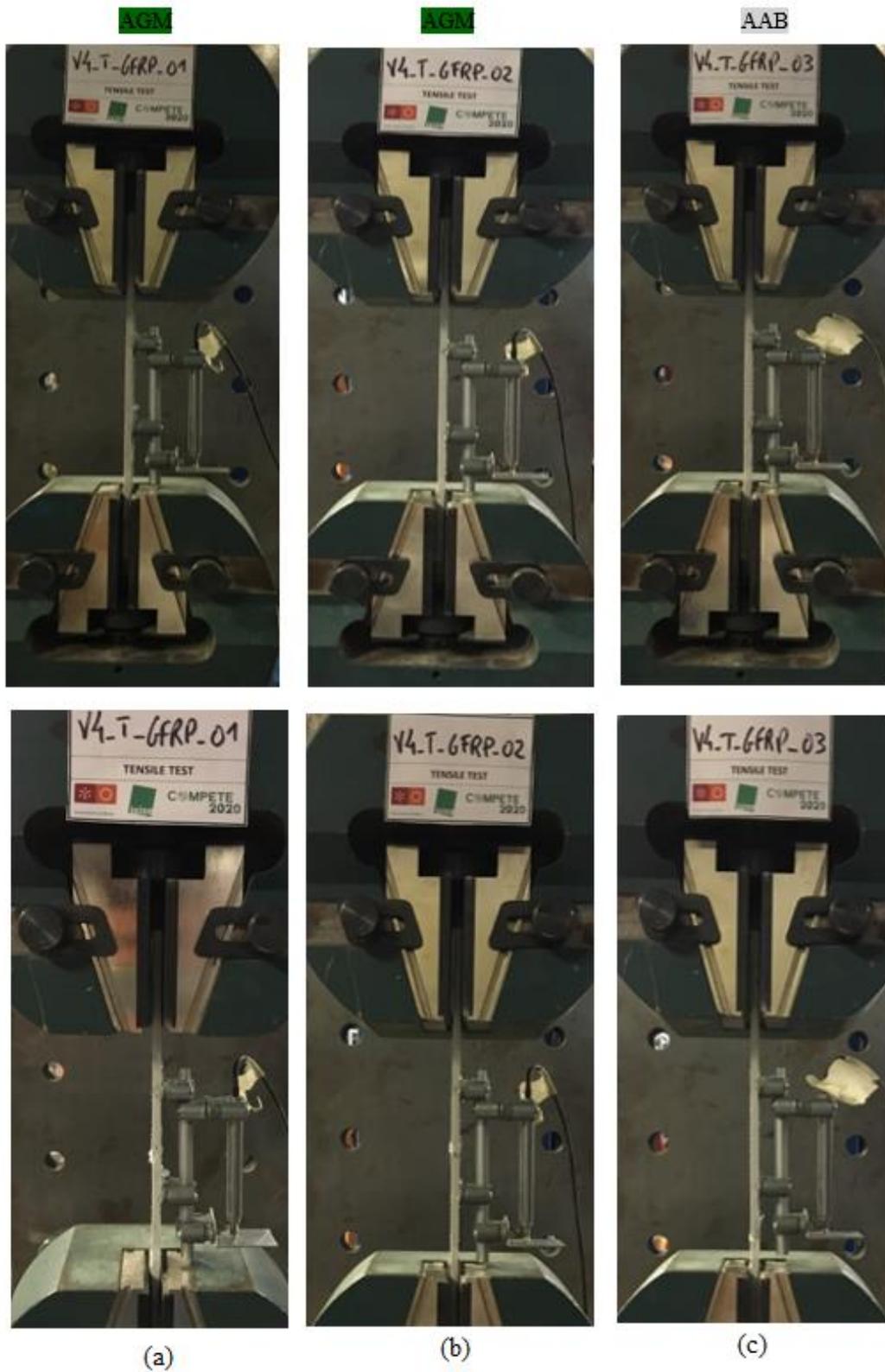


Figura III.4 – Modos de rotura: (a) V1\_GFRP\_T\_01; (b) V1\_GFRP\_T\_02; (c) V1\_GFRP\_T\_03.

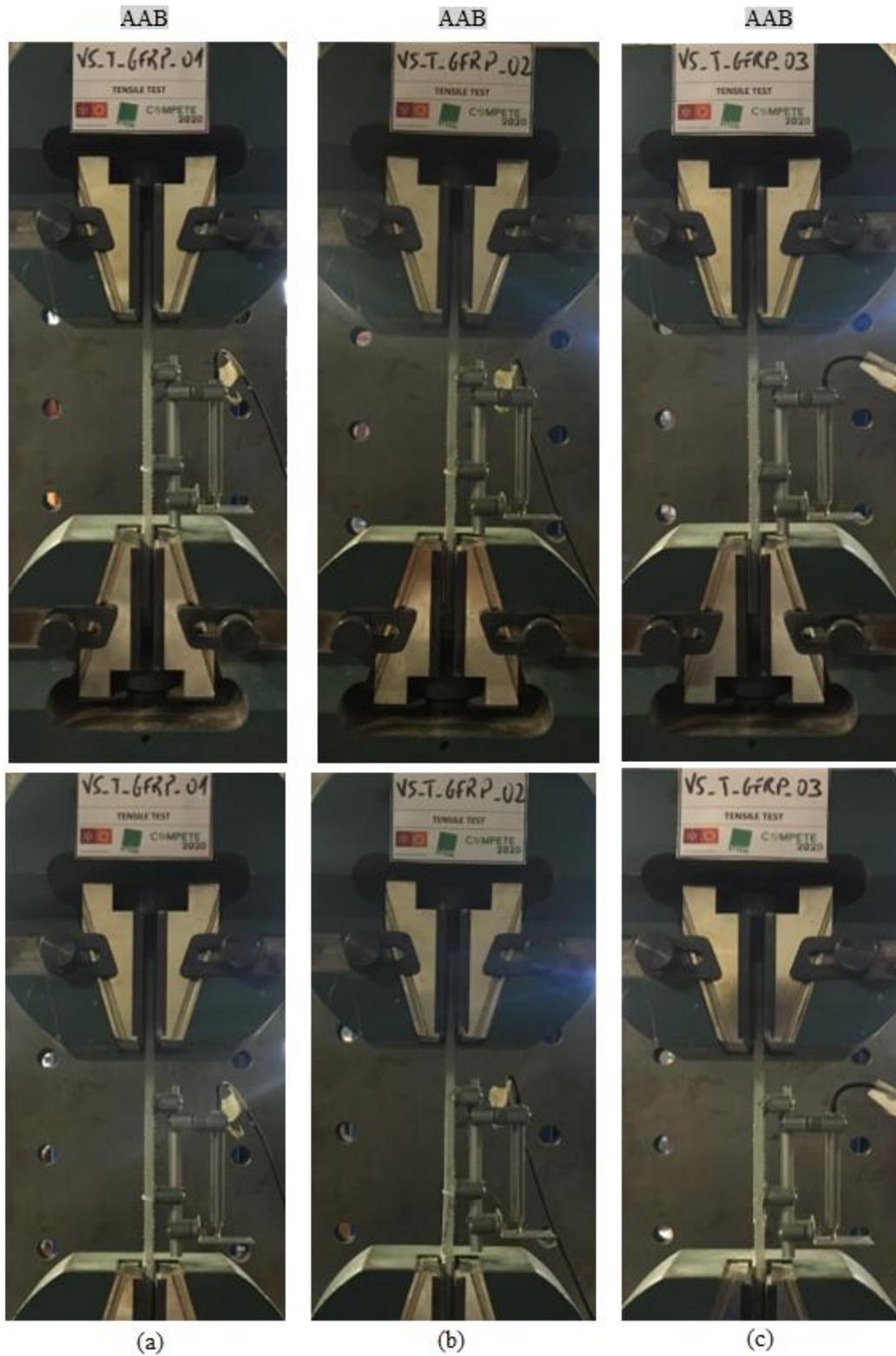


Figura III.5 – Modos de rotura: (a) V2\_GFRP\_T\_01; (b) V2\_GFRP\_T\_02; (c) V2\_GFRP\_T\_03.



Figura III.6 – Modos de rotura: (a) V3\_GFRP\_T\_01; (b) V3\_GFRP\_T\_02; (c) V3\_GFRP\_T\_03.

# ANEXO IV – Ficha técnica do adhesivo utilizada nos Ensaios de Corte para a colagem do PUR/PIR

Industry

Hoja de Datos de Producto  
Versión 3 (02 / 2012)

## SikaForce® -7710 L100

Adhesivo de uso general para el pegado de panel sándwich

### Datos Técnicos del Producto

Propiedades	Componente A SikaForce®-7710 L100	Componente B SikaForce®-7010
Base química	Poliéoles, cargados	Derivados de Isocianato
Color (CQP <sup>1</sup> 001-1)	Beige	Marrón
Color mezcla	Beige	
Mecanismo de curado	Poliadición	
Densidad (CQP 008-5)	1.6 g/cm <sup>3</sup> aprox.	1.2 g/cm <sup>3</sup> aprox.
Densidad de la mezcla (calculado)	1.5 g/cm <sup>3</sup> aprox.	
Contenido en sólidos	100%	100%
Relación de mezcla	en volumen 100 : 25 en peso 100 : 19	
Viscosidad <sup>2</sup> (CQP 538-2)	Brookfield - RVT 6/20 Brookfield - RVT 2/50	30'000 mPa·s aprox. 250 mPa·s aprox.
Viscosidad (mezcla)	Brookfield - RVT 6/20 10'000 mPa·s aprox.	
Temperatura de aplicación	15 - 30°C (60 - 85°F)	
Vida de la mezcla <sup>2</sup> (CQP 538-3)	100 min. aprox.	
Tiempo abierto <sup>2</sup> (CQP 590-1)	(ver diagrama 1)	
Tiempo de prensa <sup>2</sup> (CQP 590-1)	(ver diagrama 1)	
Dureza Shore D <sup>2</sup> (CQP 537-2)	80 D aprox.	
Resistencia a tracción <sup>3</sup> (CQP 545-2 / ISO 527)	13 N/mm <sup>2</sup> aprox.	
Alargamiento a rotura <sup>3</sup> (CQP 545-2 / ISO 527)	8% aprox.	
Resistencia a cizalladura <sup>3</sup> (CQP 548-2 / ISO 4587)	9 N/mm <sup>2</sup> aprox.	
Vida Útil (almacenado entre 10°C y 30°C)	IBC pequeños envases	6 meses 12 meses 9 meses

<sup>1</sup> CQP = Procedimiento de calidad corporativo <sup>2</sup> 23°C (73°F) / 50% h.r. <sup>3</sup> Curado de acuerdo a CQP 542-2

### Descripción

SikaForce®-7710 L100 es la base de un adhesivo de poliuretano bicomponente utilizado con el endurecedor SikaForce® 7010. SikaForce®-7710 L100 está desarrollado en acuerdo con la norma ISO 9001 / 14001 asegurando la calidad del sistema y con arreglo a un programa de seguridad responsable.

### Ventajas del Producto

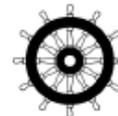
- Curado a temperatura ambiente
- Libre de solventes
- Largo tiempo abierto/corto tiempo de prensa.

### Áreas de Aplicación

SikaForce® 7710 L100 se utiliza para el pegado de metal, fibrocemento, madera y poliéster reforzado con fibra de vidrio, a poliestireno, espuma de poliuretano y lana de roca utilizados en la industria de los paneles tipo sandwich y otros elementos de construcción.

Este producto está indicado únicamente para usuarios profesionales experimentados.

Deben realizarse ensayos con los sustratos y condiciones originales para asegurar la adhesión y la compatibilidad del material.



SikaForce®-7710 L100 1/2

### Mecanismo de curado

El curado de SikaForce®-7710 L100 tiene lugar por la reacción química entre los dos componentes. Altas temperaturas aseguran el proceso de curado, bajas temperaturas prolongan el proceso de curado.

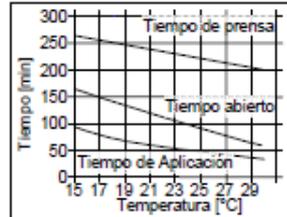


Diagrama 1: Tiempo de prensa, tiempo abierto y tiempo de aplicación para el SikaForce 7710 L100

### Resistencia Química

En caso de exposición a agentes químicos o a altas temperaturas, se recomienda realizar ensayos relacionados con el proyecto.

Para consejos, por favor contactar con el Departamento Técnico de Sika Industria.

### Método de Aplicación

#### Preparación superficial

Preparar los sustratos a unir para asegurar una unión duradera y resistente. Asegurarse de tener una superficie limpia y seca. Algunos sustratos pueden requerir un pretatamiento físico o químico. El tipo de pretatamiento debe ser determinado mediante ensayos.

Consejos sobre aplicaciones específicas son facilitados el Departamento Técnico de Sika Industria.

#### Aplicación

El gramaje a aplicar es entre 150 y 350 g/m<sup>2</sup> en función del tipo de sustrato a unir. El gramaje específico para una combinación dada de un sustrato debe determinarse mediante ensayos.

El procedimiento para aplicaciones manuales es el siguiente: Agitar la parte de la base completamente antes de su uso, añadir el endurecedor en la proporción fijada y mezclar constantemente hasta que se consiga una mezcla homogénea. Aplicar con espátula antes de alcanzar la mitad del tiempo de vida de la mezcla y pegar los sustratos antes de que finalice el tiempo abierto.

Más detalles son facilitados por el Departamento Técnico de Sika Industria.

Para aplicaciones automáticas, contactar con el Departamento System Engineering de Sika Industria.

#### Prensado

Es necesario aplicar una presión adecuada para asegurar un buen contacto entre los sustratos. La presión específica, sin embargo, depende del material del núcleo y debe ser determinada mediante ensayos. La presión debe ser siempre menor que la máxima resistencia a compresión del núcleo. Después de iniciar el proceso de prensado no liberar la presión hasta que haya transcurrido el tiempo de la prensa.

#### Limpieza

El SikaForce®-7710 L100 sin curar puede ser eliminado de las herramientas y equipos con SikaForce® 7280 Cleaner. Una vez curado, el material sólo puede ser eliminado mecánicamente. Las manos y la piel expuesta deben ser lavadas inmediatamente empleando toallitas Sika® Handclean o con un limpiador de manos industrial adecuado y agua.  
¡No utilizar disolventes!

**Condiciones de almacenamiento**  
SikaForce®-7710 L100 debe ser almacenado entre 10°C y 30°C en lugar seco. No exponer a la luz directa del sol o las heladas. Después de abrir el envase, el contenido debe ser protegido contra la humedad del aire. La temperatura mínima durante el transporte es de -20°C hasta un máximo de 7 días.

### Información adicional

Existen a su disposición, bajo petición, copias de las siguientes publicaciones:

-Hojas de Seguridad e Higiene.

### Base de Valor

Todos los datos técnicos dados en esta Hoja Técnica de los Datos del Producto se basan en ensayos de laboratorio. Las medidas de los datos actuales pueden variar debido a circunstancias fuera de nuestro control.

### Información sobre salud y seguridad

Para información y consejo sobre la manipulación, almacenaje y traspaso de productos químicos usados debe remitirse a la actual Hoja de Seguridad del producto la cual contiene datos de seguridad físicos, ecológicos y toxicológicos.

### Notas legales

Esta información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final del producto, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika de los productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales, de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las posibles diferencias en los materiales, soportes y condiciones reales en el lugar de aplicación son tales, que no se puede deducir de la información del presente documento, ni de cualquier otra recomendación escrita, ni de consejo alguno ofrecido, ninguna garantía en términos de comercialización o idoneidad para propósitos particulares, ni obligación alguna fuera de cualquier relación legal que pudiera existir. El usuario de los productos debe realizar pruebas para comprobar su idoneidad de acuerdo con el uso que se le quiere dar. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de los productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Todos los pedidos se aceptan de acuerdo a los términos de nuestras vigentes Condiciones Generales de Venta y Suministro. Los usuarios deben de conocer y utilizar la versión última y actualizada de las Hojas de Datos de Producto local, copia de las cuales se mandarán a quién las solicite, o también se puede conseguir en la página "www.sika.es".

Información adicional disponible en:  
[www.sika.es](http://www.sika.es)  
[www.sika.com](http://www.sika.com)

Sika S.A.U.  
C/ Aragoneses, 17  
28108 Alcobendas, Madrid  
Tel. +34 91 657 23 75  
Fax +34 91 662 19 36



SikaForce®-7710 L100 2 / 2



## ANEXO V – Modos de rotura dos Ensaios de Compressão em provetes de PUR/PIR



(a)

(b)

(c)

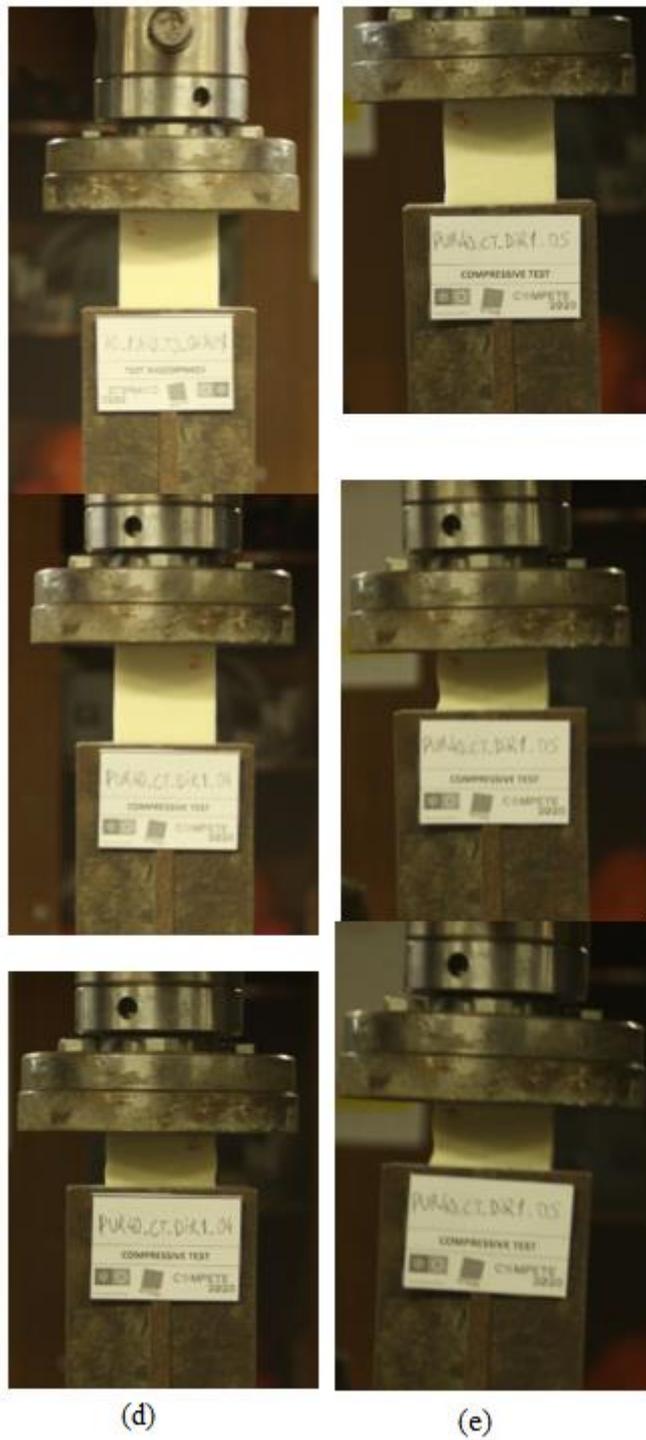


Figura V.1 – Modos de rotura: (a) PUR40\_CT\_01; (b) PUR40\_CT\_02; (c) PUR40\_CT\_03; (d) PUR40\_CT\_04; (e) PUR40\_CT\_05.



(a)

(b)

(c)



Figura V.2 – Modos de rotura: (a) PIR40\_CT\_01; (b) PIR40\_CT\_02; (c) PIR40\_CT\_03; (d) PIR40\_CT\_04; (e) PIR40\_CT\_05.

## ANEXO VI – Modos de rotura dos Ensaios de Corte em provetes de PUR/PIR



(a)



(b)



(c)



Figura VI.1 – Modos de rotura: (a) PUR40\_ST\_01; (b) PUR40\_ST\_02; (c) PUR40\_ST\_03; (d) PUR40\_ST\_04; (e) PUR40\_ST\_05.



(a)



(b)



(c)



Figura VI.2 – Modos de rotura: (a) PIR40\_ST\_01; (b) PIR40\_ST\_02; (c) PIR40\_ST\_03; (d) PIR40\_ST\_04; (e) PIR40\_ST\_05; (f) PIR40\_ST\_06.