



Mestrado em Engenharia e Gestão de Manutenção Aeronáutica

Desenho e fabrico de compósitos termoplásticos de fibra de carbono com matriz PA6, reforçados com TPU

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre

Elaborada por:

Bernardo Correia Pires da Mota, N° 20202482

Orientador:

Professora Doutora Ana Paula Duarte

Coorientador:

Professor Doutor Pedro Costa

Barcarena
Setembro 2025



Mestrado em Engenharia e Gestão de Manutenção Aeronáutica

Desenho e fabrico de compósitos termoplásticos de fibra de carbono com matriz PA6, reforçados com TPU

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre

Elaborado por:

Bernardo Correia Pires da Mota, N° 20202482

Orientador:

Professora Doutora Ana Paula Duarte

Coorientador:

Professor Doutor Pedro Costa

Barcarena

Setembro 2025

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Ana Paula Duarte, e ao meu coorientador Professor Doutor Pedro Costa, por todo o apoio e dedicação empregues no desenvolvimento deste projeto.

Aos meus Pais e irmãos, deixo um grande “Obrigado”, pois sem eles eu não seria capaz de estar a acabar este Mestrado, tendo sido um grande apoio pessoal, pois realizar um mestrado ao mesmo tempo que se trabalha, custa.

Quero agradecer à empresa *Virtus Composites*, por todo o apoio dado no corte dos provetes em estudo.

Quero ainda agradecer à Universidade de Coimbra, que permitiu realizar o ensaio de impacto por queda de peso.

Por fim, deixo um grande agradecimento aos meus colegas e amigos do curso, por estarem presentes nos bons e nos maus momentos deste curso, sendo um grande fator motivacional, que me puxou a ser o melhor de mim mesmo.

RESUMO

O intuito desta dissertação foi produzir e estudar compósitos laminados de fibra de carbono (FC) pré-impregnada com matriz termoplástica poliamida 6 (PA6), conhecida como Nylon® 6. Os referidos compósitos apresentam reforço interlaminar de camadas de TPU (termoplástico de poliuretano) impressas por fabrico aditivo (FA). No presente trabalho pretendeu-se estudar as propriedades mecânicas do compósito, comportamento elástico e plástico, e observar os efeitos, resultantes da introdução de camadas de reforço em TPU 95A, para tal foi efetuado uma análise dimensional, microscópica, ensaios de flexão de três pontos, tração, impacto, análises termogravimétrica e análise térmica diferencial. Durante o fabrico, designadamente durante a cura dos provetes, a manutenção de vácuo estável revelou-se um dos principais desafios, provocando variações dimensionais entre fornadas e originando defeitos como bolhas, delaminação e flutuações na espessura da camada. Apesar dessas limitações foi possível produzir laminados com qualidade adequada, demonstrando o potencial das camadas de TPU como reforço.

A introdução de camadas TPU *honeycomb* (HC) aumentou a espessura do laminado em 29,3% e originou melhorias no desempenho mecânico resultando num aumento médio em flexão com cargas máximas e rigidez de 41,3% a 63%. O módulo de flexão revelou-se dependente da espessura, atingindo 9,97 GPa em provetes com HC, mais finos (aumento médio de 11,2% face aos sem HC). Nos ensaios de tração amostras com HC de formandas diferentes apresentaram módulos de elasticidade 59,5% superiores demonstrando a variabilidade e impacto dos defeitos de fabrico. Apesar dos provetes sem HC registarem em média uma tensão máxima ligeiramente superior (3,12%), os melhores resultados foram obtidos com HC produzidas sob vácuo total. Nos ensaios de impacto verificou-se novamente a influência da qualidade de fabrico. Um dos provetes com HC destacou-se com um significativo melhor desempenho, evidenciando maior dissipação por energia elástica e baixo dano superficial.

Palavras-chave: FC-PA6, camadas de TPU 95A, FA, flexão de três pontos, tração, impacto por queda de peso, TG e DTA

ABSTRACT

This thesis aimed to produce and study laminated composites made of carbon fibre (CF) pre-impregnated with a thermoplastic polyamide 6 (PA6) matrix, commonly known as Nylon® 6. These composites incorporate interlaminar reinforcement consisting of thermoplastic polyurethane (TPU) layers, manufactured by additive manufacturing (AM).

The purpose of this work was to investigate the mechanical properties of the composite, both elastic and plastic behavior, and to assess the effects resulting from the introduction of TPU 95A reinforcement layers. To this end, dimensional and microscopic analyses were carried out, together with three-point bending, tensile and impact tests, as well as thermogravimetric and differential thermal analyses.

During manufacturing, particularly during the curing of the specimens, maintaining a stable vacuum proved to be one of the main challenges, leading to dimensional variations between batches and defects such as voids, delamination and fluctuations in layer thickness. Despite these limitations, it was possible to produce laminates of adequate quality, thus demonstrating the potential of TPU layers as reinforcement.

The introduction of TPU honeycomb (HC) layers increased the laminate thickness by 29.3% and resulted in improvements in mechanical performance, with average increases of 41.3% and 63% in maximum bending load and stiffness, respectively. The flexural modulus was found to be thickness-dependent, reaching 9.97 GPa in thinner specimens (an average increase of 11.2% compared with those without HC). In the tensile tests, samples with HC from different batches showed elastic modulus 59.5% higher, demonstrating both the variability and the impact of manufacturing defects. Although the specimens without HC recorded, on average, a slightly higher maximum stress (3.12%), the best results were obtained with HC produced under full vacuum.

In the impact tests, the influence of manufacturing quality was again evident. One of the specimens with HC stood out with significantly better performance, displaying higher elastic energy dissipation and reduced surface damage.

Keywords: CF-PA6, TPU 95A layers, AM, three-point bending, tensile, drop weight impact.

Índice geral

Agradecimentos	I
RESUMO	III
ABSTRACT.....	V
Índice geral	VIII
Índice de figuras.....	XI
Índice de tabelas.....	XIV
Lista de abreviaturas e de siglas	XV
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Questões da investigação.....	3
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Material Compósito.....	5
2.1.1 Compósitos laminados.....	6
2.1.2 Estratégias de reforço de laminados	8
2.1.3 Processo de fabrico	10
2.1.3.1 Saco de vácuo	11
2.2 Termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros	12
2.2.1 Elastómeros Termoplásticos	14
2.2.2 Fabrico Aditivo – FFF	16
2.2.2.1 Parâmetros da Impressão	18
2.3 Ensaaios de Caracterização	21
3 Procedimento Experimental	23
3.1 Materiais e equipamentos	24
3.2 Processo de fabrico.....	25
3.2.1 Fabrico Aditivo tridimensional.....	25
3.2.2 Fabrico do laminado compósito.....	26

3.2.2.1	Fase de estudo e aperfeiçoamento	26
3.2.2.2	Processo de Fabrico do laminado compósito.....	29
3.3	Análise Dimensional	33
3.4	Metodologia experimental.....	39
3.4.1	Microscopia Ótica.....	39
3.4.2	Tração	39
3.4.3	Flexão em três pontos	40
3.4.4	Impacto	41
3.4.5	Ensaio térmicos	44
4	Resultados e Discussão.....	45
4.1	Análise Microscópica	45
4.1.1	Provetes de FCPA6.....	46
4.1.2	Provetes de FCPA6-HC	48
4.2	Ensaio de Flexão	50
4.2.1	Análise superficial após ensaio.....	50
4.2.2	Resposta Mecânica à Flexão.....	53
4.2.3	Análise dos resultados	56
4.3	Ensaio Tração	57
4.3.1	Pós Rotura.....	57
4.3.2	Resposta Mecânica à Tração.....	58
4.3.3	Análise dos resultados	62
4.4	Ensaio Impacto	62
4.4.1	Pós Impacto.....	62
4.4.2	Resposta Mecânica ao Impacto.....	64
4.4.3	Análise dos resultados	67
4.5	Análise Termogravimétrica (TG) / Análise térmica diferencial (DTA).....	68
4.5.1	Análise TG	68
4.5.2	Análise DTA	70

4.6 Análise Teórica.....	71
Conclusões	75
Trabalhos futuros	78
Referências Bibliográficas	79
Anexo A. Ensaio Charpy - Resultados	86
Anexo B. Ficha Técnica do Pré-preg.....	87
Anexo C. Ficha Técnica do TPU	88
Anexo D. Desenhos técnicos dos provetes	91
Anexo E. Desenhos técnicos da placa usada	94
Anexo F. Desenho Técnico do corte dos provetes	95
Anexo G. Forno – Memmert UNB-500 - Ficha Técnica.....	97
Anexo H. HITACHI STA 7200 – Ficha Técnica/ Especificações	100
Anexo I. INSTRON 5966 – Ficha Técnica/Especificações	102
Anexo J. Ficha Técnica - Chemlease PMR HS EU.....	104
Anexo K. Ficha Técnica - Chemlease 2693W	105

Índice de figuras

Figura 1 - (a) Fibras unidirecionais contínuas; (b) Fibras descontínuas orientadas de modo aleatório; (c) Fibras unidirecionais tecidas ortogonalmente (Carlos, 2012).	6
Figura 2 - Reforço interlaminar de TPU (Boyd et al., 2018).	9
Figura 3 - Infusão de resina (Freitas, 2024).	10
Figura 4 – Fabrico de laminados por Saco Vácuo (Antunes, 2024).	12
Figura 5 - Fases do TPE (TEKNORAPEX, 2025).	14
Figura 6 - Processo de extrusão e deposição (Chaudhry & Czekanski, 2020).	17
Figura 7 - Orientação, altura da peça e espessura das camadas depositadas (Chaudhry & Czekanski, 2020).	17
Figura 8 - Parâmetros do FDM, relacionados ao caminho do bocal (Gao et al., 2022).	18
Figura 9 - Espessura da camada (Gao et al., 2022).	19
Figura 10 - Formato da estrutura interna (Impresoras3D, 2025).	20
Figura 11 - Modos de fratura e cargas aplicadas (Turis & Ivánková, 2020).	22
Figura 12 - Esquema de empilhamento com 2 camadas de reforço interlaminar.	23
Figura 13 - (A) Camada impressa de honeycomb (B) Representação da camada honeycomb no software PrusaSlicer com representação de eixos x (0°) e y (90°) e nodos de ligação.	25
Figura 14 - Vista da superfície do provete: A) em contacto com desmoldante; B) e C) em contacto com o peel ply; D) em contacto com o peel ply humedecido com desmoldante.	27
Figura 15 - A) Chapa no interior do saco de vácuo; B) Saco de vácuo na chapa; C) e D) Aperfeiçoamento do saco de vácuo.	28
Figura 16 - Discos silicone após cada fornada - A) Primeira; B) Segunda; C) Terceira; D) Quarta; E) Quinta.	29
Figura 17 - A) FCPA6; B) FCPA6-HC; C) FCPA6-HC + peel ply; D) Saco de Vácuo no fim do processo de cura.	30
Figura 18 - Temperatura vs Tempo de cura.	31
Figura 19 - Dimensões dos provetes: A) Impacto - I; B) Tração - T; C) Flexão – F.	33
Figura 20 - Espessura dos Provetes de FCPA6.	34

Figura 21 - Espessura dos Provete de FCPA6-HC.....	35
Figura 22 - Comparação da espessura médias dos laminados.	35
Figura 23 - Variação das Espessura dos provetes produzidos nas diferentes fornadas. .	37
Figura 24 – Ensaio de tração – A) Provete com extensómetro; B) Provete após ensaio de tração.....	40
Figura 25 - A) Máquina eletromecânica Instron 5966; B) Flexão em três pontos.	41
Figura 26 – Ensaio de Impacto – A) Esquema do ensaio de Impacto (ASTM D7136); B) Máquina Instron.	42
Figura 27 - Ensaio de Impacto – A) Gráfico das Energias (Dagne Shiferaw et al., 2025); B) Aspeto da região de impacto (ASTM D7136).	43
Figura 28 - Equipamento Hitachi STA7200.	44
Figura 29 - Superfície de Contacto com a Chapa - A) 1ª fornada; B) 2ª Fornada; C) 3ª Fornada; D) 4ª Fornada; E) 5ª Fornada; F) Superfície de contacto do pré-preg com o peel ply.	46
Figura 30 - Provete 1-S-3 de FCPA6 – A) barra de escala de 0,5 mm; B) barra de escala de 1 mm.	47
Figura 31 - Provete 3-S-19 de FCPA6 – C) barra de escala de 0,5 mm; D) barra de escala de 1 mm.	47
Figura 32 – Provete 2-HC-9 de FCPA6-HC - A) Identificação e espessura da camada de TPU; B) Identificação de defeitos e marcação da espessura do provete.	48
Figura 33 - Provete 4-HC-24 de FCPA6-HC – A) Região de delaminação entre FC e PA6.	49
Figura 34 - Provete 5-HC-31 de FCPA6-HC – Identificação das FC.	50
Figura 35 - Imagem de microscópica ótica da amostra 4-HC-23, após o ensaio de flexão - A) região de fratura Intra-laminar.	52
Figura 36 - Ensaio Flexão – A) Gráfico Carga Deslocamento; B) Gráfico Tensão vs Extensão.....	53
Figura 37 - Ensaio de flexão - cargas máximas - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) Resultados por provete.....	54
Figura 38 - Ensaio flexão - rigidez à flexão - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) Resultados por provete.....	54

Figura 39 - Ensaio de flexão - Tensão máxima - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) Resultados por provete	55
Figura 40 - Ensaio de flexão - Módulo de Flexão Máxima - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) Resultados por provete	56
Figura 41 - Provete de tração pós rutura - A) FCPA6; B) FCPA6-HC.....	58
Figura 42 - Ensaio de tração - A); Gráfico Tensão vs Extensão; B) Gráfico Carga vs Deslocamento.....	59
Figura 43 - Ensaio de Tração - Gráfico da Tensão máxima - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) Resultados por provete	60
Figura 44 - Ensaio de Tração - Gráfico da Extensão máxima - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) Resultados por provete	60
Figura 45 - Ensaio de Tração - Módulo de Elasticidade - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) resultados por provete	61
Figura 46 - Ensaio de Impacto - Vista do dano na superfície do laminado - A) Provete 3-S-20, vista oposta; B) Provete 3-S-20, vista de impacto (1. 10J; 2. 2,5J); C) Provete 5-HC-33, vista oposta; D) Provete 5-HC-33, vista de impacto (1. 2,5J; 2. 5J); E) Provete 4-HC-26, vista oposta; F) Provete 4-HC-26, vista de impacto (1. 2,5J; 2. 5J; 3. 10J).....	63
Figura 47 - Ensaio de Impacto - 2,5J - A) Gráfico Carga vs Tempo; B) Gráfico Energia vs Tempo.....	64
Figura 48 - Ensaio de Impacto - 5J - A) Gráfico Carga vs Tempo; B) Gráfico Energia vs Tempo.	65
Figura 49 - Ensaio de Impacto - 10J - A) Gráfico Carga vs Tempo; B) Gráfico Energia vs Tempo.	66
Figura 50 - Curva TG - Percentagem mássica das amostras em função da temperatura.	69
Figura 51 – Curvas DTA	70
Figura 52 - Deformação dos provetes no ensaio Charpy	86

Índice de tabelas

Tabela 1 - Propriedades do TPU 95A (Forward - BASF, 2025).	15
Tabela 2 - Temperatura vs tempo de cura.....	31
Tabela 3 - Nomenclatura dos provetes	34
Tabela 4 - Variação das espessuras.....	37
Tabela 5 - Dimensões / Condições dos provetes	38
Tabela 6 - Parâmetros, para o ensaio de Impacto	43
Tabela 7 – Características (incluindo defeitos) dos provetes após os ensaios de flexão.	51
Tabela 8 – Ensaio Impacto – 2,5J – Resultados experimentais.	64
Tabela 9 – Ensaio Impacto – 5J – Resultados experimentais.	65
Tabela 10 - Ensaio Impacto – 10J – Resultados experimentais.....	66
Tabela 11 - Variação da massa das amostras nos ensaios TG/DTA.....	69
Tabela 12 - Propriedades dos materiais usados no fabrico dos provetes.....	71
Tabela 13 - Sequência de empilhamento.	72
Tabela 14 - Constantes de elasticidade do TPU e do FCPA6 no referencial local.....	72
Tabela 15 - Constantes de elasticidade normais a nível geral.	73
Tabela 16 - Valores da matriz E_{ij} para cada lâmina.	73
Tabela 17 - Constantes de elasticidade dos laminados de FCPA6 e FCPA6-HC.....	74
Tabela 18 - Dimensões e parâmetros obtidos do ensaio de flexão.	74
Tabela 19 - Resultados do Ensaio Charpy	86

Lista de abreviaturas e de siglas

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
AGM	<i>Angled Gage Middle</i>
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
DTA	<i>Differential Thermal Analysis</i> - Análise Térmica Diferencial
CAD	Desenho assistido por computador
CAI	Compressão Após Impacto
CMC	<i>Ceramic Matrix Composites</i>
E	Módulo de Elasticidade (Módulo de Young)
FA	Fabrico Aditivo
FC	Fibra de carbono
FFF	Fabrico de Filamento Fundido
FV	Fibra de vidro
GLARE	<i>GLAss-REinforced Fibre Metal Laminate</i>
ILSS	<i>Short Beam Shear</i>
LAT	<i>Lateral At grip/tab Top</i>
LGM	<i>Lateral Gage Middle</i>
LVI	<i>Low Velocity Impact</i>
MMC	<i>Metal Matrix Composites</i>
PA	Poliamida
PAN	Poliacrilonitrilo
PMC	<i>Polymer Matrix Composites</i>
PP	Polipropileno
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
STL	<i>Standard Triangulation Language, Standard Tessellation Language</i>
TG	Análise Termogravimétrica
T _g	Temperatura de Transição Vítea
TPE	Elastómeros Termoplásticos
TPU	Termoplástico de poliuretano
T _f	Temperatura de Fusão

1 Introdução

A engenharia tem como um dos seus contínuos objetivos, o estudo de estruturas mais resistentes, mais leves, mais flexíveis e que possam ser recicláveis quando atingirem o fim da sua vida útil. Atualmente, o setor aeronáutico é dominado pela implementação de componentes em materiais compósitos, como, por exemplo: GLARE ("GLAss-REinforced" Fibre Metal Laminate) laminado de chapas de alumínio com lâminas de resina epóxi reforçada com fibra de vidro (FV), compósitos de resina com fibra de carbono (FC) usados nas nervuras/vigas da *wing box* do Boeing 787. A aplicação destes materiais permite diminuir o peso, mantendo propriedades mecânicas, como, absorção de vibrações, impactos e capacidade de prevenir a propagação de fendas (Fernandes De Souza Rêgo et al., 2020). Um dos materiais do futuro são os materiais compósitos, mais especificamente os laminados de FC com matriz termoplástica, possíveis de serem reciclados no fim da sua vida útil. Além disso, a incorporação de materiais de reforço, como o TPU, permite melhorar o desempenho mecânico dos compósitos, mantendo a sua reciclabilidade. Com vista a atingir este objetivo, têm vindo a ser realizados estudos de reforço interlaminar, de materiais compósitos termoplásticos, como é o caso de compósitos de FV e resina epóxi reforçados com camadas de termoplástico de poliuretano (TPU) (Boyd et al., 2018); e reforço do pré-impregnado (abreviadamente designado por pré-preg) com fibras curtas/partículas para aumentar a resistência interlaminar das camadas do compósito (Bilge & Papila, 2015). Estas camadas de reforço seguem o mesmo princípio de técnicas ancestrais, como a utilização de palha na construção com lama, que procurava aumentar a aderência, resistência mecânica e a capacidade térmica das paredes. As tecnologias de fabrico aditivo (FA), permitem fabricar peças com vários tipos de geometria, das mais simples às mais complexas. Neste estudo, efetuou-se o fabrico de camadas de TPU por *fused filament fabrication* (FFF), com geometrias semelhantes às utilizadas por Antunes, (2024), tendo sido efetuados ensaios de tração, flexão de três pontos, impacto e análises termogravimétrica (TG) e térmica diferencial (DTA) com: provetes de três camadas de pré-preg de FC e poliamidas 6 (FCPA6) sem camada de reforço e provetes com três camadas de FCPA6 e duas camadas de reforço em TPU com geometria em *honeycomb*.

A presente dissertação começa por apresentar, no Capítulo 2, os compósitos laminados, a sua composição e os materiais (FC, TPU e PA6) em estudo. São discutidos os processos de fabrico, incluindo técnicas tradicionais e fabrico aditivo, e a influência da orientação das fibras e do reforço interlaminar nas propriedades mecânicas do material.

O capítulo 2 apresenta ainda os ensaios de caracterização realizados, como, tração, flexão, impacto, microscopia ótica e ensaios térmicos. No Capítulo 3 constam os materiais utilizados, são apresentadas as fases passos de processamento (FA, saco de vácuo, etc.) para obter os laminados reforçados pretendidos, bem como os métodos e metodologias experimentais. Neste capítulo apresentam-se ainda os ensaios (flexão, tração, impacto e térmicos) e as medições de espessura do laminado, tendo como objetivo comparar os resultados teóricos calculados com os obtidos experimentalmente. Os resultados dos diversos ensaios são apresentados no Capítulo 4. No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões do presente estudo seguido de sugestões para estudos complementares.

1.1 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho foi estudar os materiais compósitos laminados de matriz termoplástica produzidos a partir de pré-preg de FC e matriz de poliamida 6 (PA6), também conhecida por *Nylon® 6*. Foi efetuado um reforço interlaminar com camadas de termoplástico de poliuretano TPU 95A, com o objetivo de analisar as propriedades mecânicas, o comportamento elástico e plástico, bem como os efeitos, resultantes da introdução de 2 camadas de TPU com geometria em *honeycomb*, quando efetuados ensaios de flexão 3 pontos, de tração e de impacto.

Os objetivos inerentes à realização deste trabalho são:

- Verificar a capacidade de fabricar compósitos com o pré-preg de FCPA6 reforçados com camadas de TPU;
- Comprovar o efeito de reforço, efetuado com as duas camadas de TPU com geometria do tipo *honeycomb*, impressas com 30% preenchimento;
- Executar ensaios de flexão 3 pontos, de tração, de impacto por “*drop weight*”, análises termogravimétrica (TG), análise térmica diferencial (DTA), análise por microscopia ótica e análise dimensional aos laminados produzidos
- Analisar e comparar o comportamento dos laminados termoplástico de FC com e sem reforço entre lâminas de camadas de TPU *honeycomb*, impressas com 30% preenchimento, quando sujeitos a carregamentos mecânicos.
- Analisar a delaminação entre camadas nos provetes produzidos com camadas de TPU com geometria *honeycomb*;
- Comparar os resultados obtidos com os resultados de (Antunes, 2024) em que provetes laminados de FV e polipropileno (PP) com e sem camadas de reforço de TPU com geometria *honeycomb*, impressas com 20% de preenchimento, foram analisados em flexão.

1.2 Questões da investigação

As “*Questões da investigação*” correspondem ao que é pretendido responder com a realização deste trabalho, sendo estas:

- ❖ Que resposta mecânica apresenta o laminado produzido a partir dos pré-preg de FC-PA6?
- ❖ Será que a adição de camadas de TPU, melhoriam a capacidade de deformar do laminado? Será que podem ser introduzidas melhorias nas propriedades mecânicas, designadamente a resistência ao impacto, com a aplicação de reforço interlaminar de TPU 95 com geometria *honeycomb*?
- ❖ Que tipos de defeitos são observados nos provetes?
- ❖ Que tipo de rotura ocorre nos respetivos ensaios?

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo efetua-se uma introdução aos materiais compósitos laminados, nomeadamente, uma apresentação de estudos relevantes para o trabalho efetuado, incluindo a forma como se fabricam e se caracterizam os referidos materiais. Posteriormente é realizada uma descrição dos polímeros usados, assim como das suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. São ainda abordados os conceitos de desenvolvimento, produção e de caracterização com base nos ensaios efetuados neste estudo.

2.1 Material Compósito

Um material é designado por compósito quando é composto por dois ou mais materiais, não miscíveis entre si, “desenhado” para apresentar a combinação das melhores características de cada material constituinte (Mallick, 2007). Estes materiais são constituídos por fibras, partículas ou folhas (fase de reforço/elementos de reforço), dispersas numa matriz (fase contínua). Os compósitos podem ser de matriz polimérica, cerâmica ou metálica (Mallick, 2007), sendo neste estudo utilizada uma matriz polimérica. Atualmente, os compósitos podem ser divididos em três categorias (Gurit, 2022):

- *Compósitos de matriz polimérica (Polymer Matrix Composites) (PMC)* – são os mais comuns e os que foram utilizados neste trabalho. Utilizam uma matriz à base de resinas poliméricas, e uma variedade de fibras (vidro, carbono, aramida, etc.) como reforço.
- *Compósitos de matriz metálica (Metal Matrix Composites) (MMC)* – muito utilizados no setor automóvel, estes materiais usam metais, como, por exemplo, alumínio, na matriz e fibras/partículas como reforço.

- *Compósitos de matriz cerâmica (Ceramic Matrix Composites) (CMC)* – são utilizados em ambientes de temperaturas elevadas, sendo os cerâmicos a matriz e as fibras o reforço. Usados no setor espacial e nos aviões hipersônicos (Ginger Gardiner, 2023).

2.1.1 Compósitos laminados

Compósitos laminados consistem em múltiplas camadas de lâminas compostas por fibras unidas por uma matriz. As matrizes poliméricas podem ser de resina (termoendurecível) ou de termoplástico. Cada lâmina pode ter uma orientação de fibras diferentes (Figura 1), para se obter as propriedades mecânicas pretendidas (Mallick, 2007). As sequências de empilhamento de lâminas no laminado afetam as propriedades mecânicas do compósito, tais como: rigidez, resistência à delaminação e resistência ao impacto (Yasaee et al., 2012b). A sequência de empilhamento usada nos provetes produzidos no âmbito desta tese foi de $[0^\circ/90^\circ]$, sendo o tecido plano (*woven*) de pré-preg de FC, com uma orientação de $[0^\circ/90^\circ]$. No caso do TPU, foram impressas camadas com orientação $[0^\circ/90^\circ]$, isto é, em ambas as direções apresentam resistência por parte do formato celular, *honeycomb* (para ter propriedades iguais nas duas direções - isotropia).

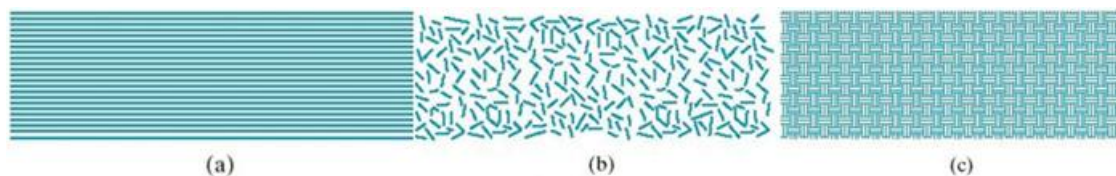


Figura 1 - (a) Fibras unidirecionais contínuas; (b) Fibras descontínuas orientadas de modo aleatório; (c) Fibras unidirecionais tecidas ortogonalmente (Carlos, 2012).

As FC são amplamente utilizadas em aplicações estruturais de elevado desempenho, embora a sua utilização em compósitos termoplásticos seja menos comum quando comparada com as FV, devido ao seu custo mais elevado e maior complexidade de fabrico.

Apesar de apresentarem desvantagens como o preço, a menor resistência ao choque e a suscetibilidade a fenómenos de corrosão galvânica em contacto com metais, as FC oferecem vantagens determinantes para este trabalho, nomeadamente uma rigidez duas a três vezes superior à das FV, boa resistência mecânica e térmica e estabilidade dimensional (Hao et al., 2018).

Estas características tornam-nas particularmente adequadas, para o desenvolvimento de laminados termoplásticos recicláveis com elevado desempenho.

Os materiais compósitos poliméricos com reforço de fibras permitem obter estruturas de elevado desempenho, leves e altamente resistentes, pelo que apresentam uma tendência de aumento de utilização (Asmatulu et al., 2014). São exemplos de aplicações de compósitos de matriz polimérica termoendurecível: tanques de combustível, no setor aeroespacial, estruturas de satélites como estruturas em FC da empresa RocketLab (*RocketLab*, 2024); assim como as aeronaves mais avançadas da Airbus e Boeing, como o A-350 (53% de compósitos) e o B-787 (50% de compósitos), respetivamente, permitindo uma redução nas emissões de poluentes, em torno de 1%-20% de CO₂ (Timmis et al., 2015). As referidas estruturas são difíceis e por vezes inviáveis de reciclar devido ao custo e impacto ambiental associado, quando atingem o fim da vida útil, como é exemplo das pás dos geradores eólicos que são enterradas.

Desta forma, conseguimos perceber o porquê de os materiais termoplásticos estarem a ser estudados e aplicados como matriz de materiais compósitos em muitos setores, como por exemplo no desporto – raquetes, bicicletas, barcos de remo e remos, compostos por matrizes de polipropileno ou outros termoplásticos; setor aeronáutico – com os fabricantes a começarem a substituir as matrizes termoendurecíveis por termoplásticas (Zhang, 2023).

A FC contribui com a sua resistência mecânica, enquanto a matriz de PA6, por ser um termoplástico, oferece reciclabilidade e flexibilidade, para além disto a adição de camadas de TPU permitem aumentar a flexibilidade e a resistência mecânica do compósito. O compósito laminado em estudo não se classifica como compósito laminado híbrido. A definição de compósito híbrido implica a incorporação de dois ou mais diferentes materiais de reforço na matriz, o que não acontece no presente caso. As camadas de TPU podem ser consideradas como camadas interlaminares de reforço, ou

seja, situadas entre as camadas, e não integradas no pré-preg. Um exemplo de compósitos híbridos são as pás de turbinas eólicas, fabricadas em FV e resina epóxi, reforçadas, em certas zonas, com FC. Estas pás podem ultrapassar os 100 metros de comprimento e apresentam um peso muito reduzido, graças à utilização de compósitos (Zuo et al., 2021).

2.1.2 Estratégias de reforço de laminados

O reforço estrutural dos materiais compósitos laminados tem vindo a ser estudado através de vários métodos de reforço interlaminar (Bilge & Papila, 2015), como: adição de mais uma matriz de resina, película adesiva de termoendurecível, fibras curtas espalhadas (Tang et al., 2013), micropartículas de polímeros e películas adesivas de termoplástico (Yasaee et al., 2012b). O estudo de (Bilge & Papila, 2015) consiste numa revisão da literatura existente, reunindo e analisando os principais métodos de reforço interlaminar já estudados.

Existem vários estudos sobre a geometria de reforço ideal em compósitos laminados. Khan et al., (2018) realizou ensaios de flexão e tração, em provetes com quatro tipos de geometrias de preenchimento (*honeycomb*; retilíneo; concêntrico; curva de Hilbert) de ácido polilático (PLA), tendo sido observado que o formato *honeycomb* obteve a maior deformação e a segunda maior tensão máxima, ficando só atrás do retilíneo (Khan et al., (2018). No trabalho de Pragadish N et al., (2025) foi realizado um estudo de duas geometrias (triangulares e *honeycomb*) fabricadas por FDM, com compósito de PLA-madeira-fibra de vidro (Pragadish N et al., 2025). Sendo que, para cada geometria estudada, foi aplicado 20%, 40% e 60% de preenchimento em ensaios de impacto por pêndulo, ensaio de flexão, entre outros. Pragadish N et al., (2025) concluiu que a geometria *honeycomb* com 60% de preenchimento, apresentou a melhor e mais elevada relação resistência/peso, proporcionando estruturas resistentes de baixo peso.

Yasaee et al., (2012a) utilizou anéis de películas termoplásticas, interlaminadas com FV, para controlar a delaminação causada por impacto de baixa velocidade. Os resultados demonstram uma redução da área de delaminação até 38% e o aumento da resistência residual à compressão em 18%, confirmando a importância da localização da delaminação.

Qiu et al., (2014a) realizou estudos de simulações numéricas de ensaios de impacto, para compreender o comportamento e resistência ao dano de camadas de reforço intra e interlaminar. Por outro lado, Lopes et al., (2009) observou que quer a sequência, quer a geometria do compósito, têm ação direta na capacidade de resistir aos ensaios de impacto de baixa velocidade. Boyd et al., (2018) apresentou uma abordagem para melhorar a resistência à delaminação e a durabilidade dos compósitos laminados utilizando camadas de películas de TPU com 0,13 mm e 0,25 mm (Figura 2).

Após os ensaios de impacto, verificou-se que as lâminas de TPU deformam-se elasticamente, concedendo ao laminado capacidade para resistir ao impacto sem sofrer delaminação catastrófica.

No presente estudo e utilizando os provetes fabricados foram efetuados cinco tipos ensaios, designadamente impacto, tração, flexão três pontos, análise por microscopia ótica e análises por TG e DTA

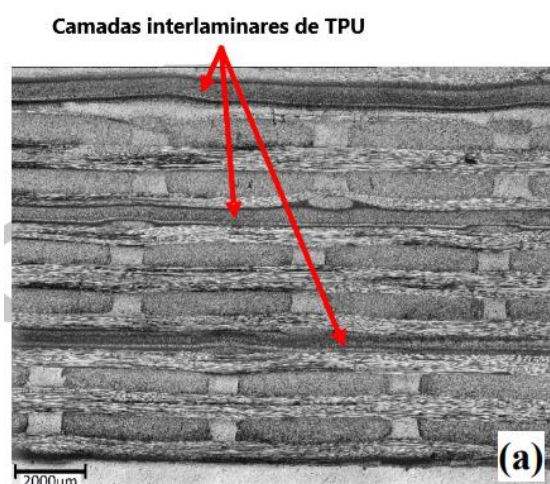


Figura 2 - Reforço interlaminar de TPU (Boyd et al., 2018).

Os provetes realizados neste trabalho, seguiram dois processos de fabrico: o processo de FA, para o fabrico das camadas de reforço interlaminar de TPU, consistindo em camadas com geometria *honeycomb* com um preenchimento de 30%; e o empilhamento de lâminas (*hand lay up*), camada a camada seguidas de cura a altas temperaturas em saco de vácuo. No capítulo 2.1.3 é descrito o método de fabrico, tanto do TPU como do laminado em si, destacando-se os conceitos mais importantes e relevantes relativos a

ambos. São ainda abordados outros tipos de processos de fabrico, com especial enfoque nos laminados de compósitos termoplásticos.

2.1.3 Processo de fabrico

Existe uma variedade de processos de fabrico de laminados, sendo adaptados às especificações de cada aplicação, englobando técnicas manuais até métodos mais avançados e automatizados. Dentro de uma extensa variedade de métodos de produção de compósitos laminados o presente trabalho aplicou o método de saco de vácuo que é apresentado em detalhe no subcapítulo 2.1.3.1. São ainda apresentados alguns outros métodos de fabrico de compósitos laminados com ênfase em processos aplicáveis a compósitos de matriz termoplástica.

- **Infusão de resina** - normalmente utilizada para matrizes termoendurecíveis como, resinas epóxi e resinas fenólicas. As camadas de fibras são colocadas num molde seco, a resina é puxada para dentro, do saco de vácuo, através de um sistema de vácuo, sendo depois colocado o empilhamento numa autoclave para cura, sempre com o molde aberto, como apresentado na Figura 3.

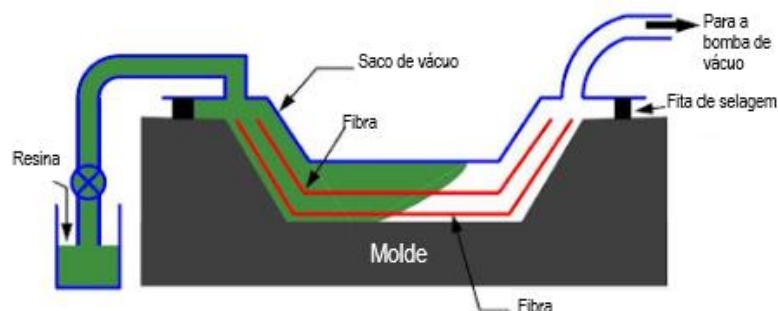


Figura 3 - Infusão de resina (Freitas, 2024).

- **Resin Transfer Molding (RTM)** – o polímero, termoendurecível ou termoplástico, é forçado a entrar num molde fechado, onde as camadas de fibras já estão posicionadas. Este é parecido ao método de infusão de resina, mas apresenta molde contra molde (cima e baixo) e a resina é forçada a entrar e não por assistência de vácuo (Verrey et al., 2006);

- ***Filament Winding*** (Revestimento de filamentos) – é um processo no qual as fibras de reforço contínuas são posicionadas de maneira precisa e de acordo com um padrão predeterminado para compor a forma do componente desejado. Embora seja mais utilizado em compósitos de matriz termoendurecível (como resina epóxi e resina poliéster), também pode ser utilizado para termoplásticos (como poliamidas e polietileno), sendo aplicado para fazer tanques que suportem pressões elevadas (Gomes, 2009).

Para além destes, existem ainda outros métodos de fabrico, podendo os seguintes, serem aplicados na conceção de compósitos termoplásticos (Novo, 2019):

- **Deposição automática de fibras;**
- **Moldagem por compressão;**
- **Pultrusão;**
- **Termofusão;**

2.1.3.1 *Saco de vácuo*

Os laminados de pré-preg de FC (com e sem reforço interlaminar) desenvolvidos no âmbito da presente dissertação, foram processados através do método de laminação manual dos pré-preg seguido do método de saco de vácuo. Este método é regularmente utilizado no fabrico de compósitos laminados pré-impregnados de matrizes poliméricas e permite fabricar laminados de alta qualidade. O processo consiste na aplicação de vácuo ao laminado enquanto é aplicado calor no forno. A aplicação de vácuo induz carga uniformemente distribuída no plano do laminado e remove ar e/ou resina em excesso (no caso de termoendurecíveis), enquanto o material é consolidado (Sprayidea, 2025) (Figura 4).

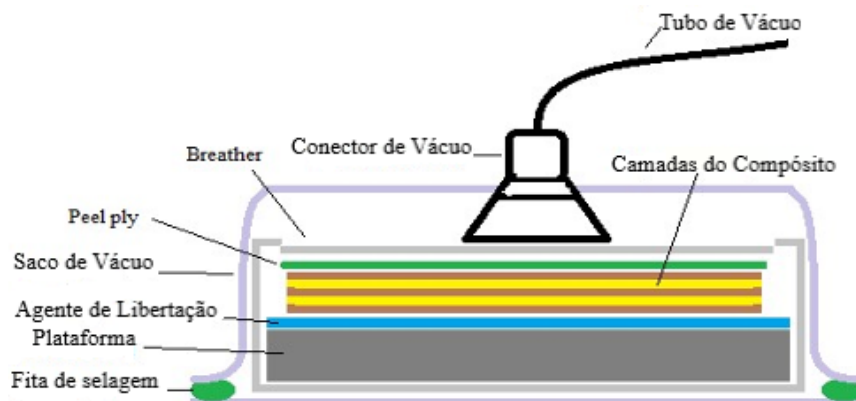


Figura 4 – Fabrico de laminados por Saco Vácuo (Antunes, 2024).

Após o compósito ser posicionado no saco de vácuo que cria uma pressão de 1 atmosfera, este é inserido no forno à temperatura (controlada através de termopar) de cura do polímero (neste caso a 220°C). Este vácuo, melhora a adesão entre as camadas de pré-preg e as camadas de reforço de TPU. É importante salientar que a temperatura e o tempo de cura dependem do tipo de matriz polimérica, sendo geralmente indicados na ficha técnica do pré-preg.

2.2 Termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros

Foram fabricados laminados com pré-preg de FC (TSF-LowBIOPA200-3K-CF-TW-400) com matriz termoplástica poliamida 6 (PA6 - Nylon®6) que contém uma percentagem de materiais biológicos (base). Parte dos laminados foram reforçados com camadas de TPU 95A, fabricadas através de FA. A utilização do pré-preg permite produzir laminados que apresentam melhores propriedades mecânicas e térmicas, e que são mais fáceis de trabalhar que os laminados obtidos por deposição manual de camadas de fibras que depois são banhadas com resina ou por outros métodos (Mallick, 2007).

Em função das propriedades físicas, os polímeros podem ser classificados como plásticos (termoplásticos e termoendurecíveis) e borrachas (ou elastómeros). Os termoplásticos são materiais que requerem calor para serem conformados.

Após o seu arrefecimento mantém a forma que adquiriram durante a conformação, podendo ser várias vezes fundidos e moldados sem que ocorra alteração significativa das

suas propriedades. Estas características permitem que os termoplásticos sejam mais facilmente reciclados. Para além da reciclabilidade, são materiais na generalidade de menor custo, alta produção e com facilidade de processamento (Carraher Jr., 2017).

Os termoendurecíveis são formados por uma estrutura molecular reticulada de ligações primárias covalentes, que os tornam difíceis de reciclar. Estas ligações cruzadas podem ser formadas por calor e pressão, mas, o processo inverso promove a decomposição do material, razão pela qual a reciclagem é complicada. Estas ligações, fornecem ao material elevada rigidez e fragilidade, para além de estabilidade às variações térmicas (apresentando, normalmente, maior resistência ao calor que os termoplásticos) (Uvarajan et al., 2022).

Os termoplásticos podem apresentar um comportamento inferior, a nível de resistência mecânica, quando comparados com os termoendurecíveis. Os termoplásticos mais usados em laminados de pré-pregs, incluem o Nylon®, o polipropileno (PP) e o acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), sendo empregues no fabrico de embalagens, fios de pesca e componentes de automóveis (Uvarajan et al., 2022).

O Nylon®6 (poliamida - PA6), matriz usada nos provetes produzidos, é um termoplástico que possui excelente resistência mecânica (à tração), térmica e à abrasão. Apresenta boa estabilidade dimensional, resistência a produtos químicos, elevada elasticidade e média densidade (1,13 a 1,14 g/cm³). A PA6 é conhecida pela sua capacidade de ser moldada em diversas formas, sendo adequada para várias aplicações, como na indústria automóvel e têxtil (Rwei et al., 2019).

Elastómeros, são polímeros que possuem uma grande elasticidade, podem ser esticados consideravelmente e voltar à sua forma original quando a tensão é removida. Estes podem ser curados por vulcanização, que permite criar ligações cruzadas entre as cadeias que contribuem por aumentar a durabilidade da borracha, mas que, em contrapartida, tornam a sua a reciclagem difícil.

Os elastómeros termoplásticos de poliuretano (TPUs), como é o caso do TPU 95A, usado como reforço interlaminar nos provetes fabricados, possuem propriedades mecânicas elevadas, ao nível da tensão de rutura e do alongamento, sendo utilizados nas solas de calçado, devido à sua flexibilidade, elasticidade e durabilidade (GoldSupplier, 2025).

2.2.1 Elastômeros Termoplásticos

Os **elastômeros termoplásticos (TPEs)** constituem uma classe intermédia que combina as propriedades dos elastômeros (elasticidade) e dos termoplásticos (processamento e reciclagem) (Mundo do Plástico, 2025). Os TPEs podem substituir elastômeros convencionais em diversas aplicações, desde que mantenham propriedades essenciais como dureza e resistência à deformação. A dureza destes é medida nas escalas *Shore A* e *Shore D*, variando de 0 a 100; valores mais altos indicam maior dureza. Os TPEs com dureza abaixo de 90 *Shore A* são considerados elastômeros verdadeiros, enquanto acima de 90 *Shore A* ou 38 *Shore D* comportam-se mais como termoplásticos modificados para resistência ao impacto (TEKNORAPEX, 2025). Como representado na Figura 5, os TPEs possuem uma estrutura composta por fases rígidas e elastoméricas. As fases rígidas conferem resistência mecânica, enquanto as fases elastoméricas oferecem flexibilidade e elasticidade. A reciclabilidade provém da fase rígida, pois quando esta é fundida ou dissolvida, o material torna-se processável e pode ser moldado, e, quando arrefecido, a fase rígida solidifica, restaurando a resistência e a elasticidade.

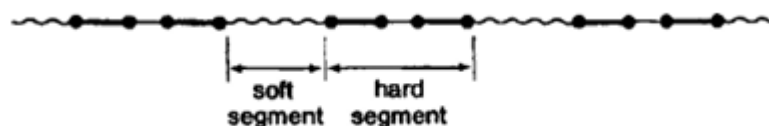


Figura 5 - Fases do TPE (TEKNORAPEX, 2025).

Os **TPUs**, são TPEs que combinam elasticidade com a capacidade de serem processados como termoplásticos, tornando-se numa opção sustentável para as indústrias do calçado (solas).

Destacam-se pela **alta resistência ao desgaste, à abrasão e a impactos**, além de **boa resistência a produtos químicos**. Os TPUs possuem cadeias lineares ligadas entre si por forças intermoleculares secundárias, sem ligações cruzadas. Com a ação da temperatura ocorre um afastamento entre as moléculas e leva o material à fusão. O TPU, pode ser processado e reprocessado por métodos convencionais de transformação de polímeros, como moldagem por injeção e extrusão (Pizzatto, 2009).

A flexibilidade do TPU pode ser ajustada de acordo com a dureza (quanto mais rígido, maior é a temperatura máxima de utilização), tornando-os ideais para uma vasta gama de aplicações. O TPU empregue apresenta uma dureza de 95 na escala *Shore A*, como apresentado na Tabela 1, que oferece um equilíbrio entre flexibilidade e rigidez, apresentando elasticidade e rigidez, sem comprometer a aderência às camadas do pré-preg.

Tabela 1 - Propriedades do TPU 95A (Forward - BASF, 2025).

Parameter Information	
3D Printer Filament	eTPU-95A
Density(g/cm3)	1.21
Heat Distortion Temp(°C,0.45MPa)	/
Melt Flow Index(g/10min)	1.2(190°C/2.16kg)
Tensile Strength(MPa)	35 3/10
Elongation at Break(%)	≥800 10/10
Flexural Strength(MPa)	/
Flexural Modulus(MPa)	/
IZOD Impact Strength(kJ/m ²)	/
Durability	9/10

Os TPUs surgiram como um material popular na impressão FFF devido à sua elevada elasticidade e versatilidade na criação de peças flexíveis. Ao utilizar TPUs em impressoras FFF, é essencial definir a temperatura do bocal de extrusão entre 210°C e 235°C (225°C – estabelecida seguindo Antunes, (2024)) para conseguir uma fusão correta do filamento.

A plataforma, ou cama de impressão, deve ser aquecida a uma temperatura entre 40°C e 70°C (60°C – estabelecida seguindo Antunes, (2024)) para garantir uma boa adesão do material. Para minimizar o risco de entupimento do bocal de impressão, a velocidade de impressão deve ser estabelecida entre 10 mm/s e 30 mm/s (20 mm/s), pois baixas velocidades diminuem o surgimento de imperfeições (Antunes, 2024).

2.2.2 Fabrico Aditivo – FFF

O FA comumente conhecido como impressão 3D, emergiu em 1981 com uma máquina de deposição de resina, camada a camada, consolidada por radiação UV (Robótica, 2024). Atualmente a impressão 3D é conhecida, para o fabrico de componentes de materiais poliméricos, permitindo obter peças complexas, de fácil prototipagem, baixo custo e baixo desperdício.

O método de impressão de fabrico de filamento fundido (*Fused Filament Fabrication* FFF), também conhecido por *Fused Deposition Modeling* (FDM), consiste num filamento termoplástico, normalmente fornecido em bobinas, que é aquecido e extrudido em cordões, sendo posteriormente depositado camada a camada, para a construção da peça, de acordo com a representação digital (ficheiro STL do modelo CAD do software *Solidworks*) (Air Liquide, 2024).

O primeiro passo consiste na modelação do produto num *software* de desenho assistido por computador (CAD). O componente/estrutura/sistema modelado é exportado para um ficheiro com linguagem padrão (*standard triangle language* - STL), que representa o objeto utilizando uma malha triangular. Quanto mais refinada for a malha, mais detalhada será a representação da geometria do componente, e por consequência maior será o ficheiro STL. De seguida, o ficheiro é processado por um *software* denominado como *slicer*, que divide a peça em camadas transversais à direção de impressão. Existem diversos *softwares* disponíveis, sendo que no presente trabalho foi usado o *software* PrusaSlicer. Durante este processo, são estabelecidos uma série de parâmetros, como, por exemplo, velocidade e temperatura de extrusão.

O filamento do material é então aquecido ao mesmo tempo que passa pela tubeira de extrusão, sendo fundido e depositado, camada a camada na plataforma de impressão (como se encontra representado na Figura 6).

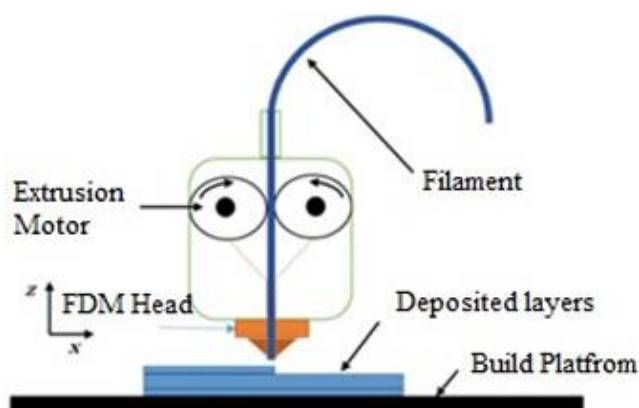


Figura 6 - Processo de extrusão e deposição (Chaudhry & Czekanski, 2020).

O FA tem vindo a evoluir e melhorar, expandindo do fabrico de protótipos para o fabrico em massa. Perceber e saber estabelecer os parâmetros do processo é essencial para garantir a integridade, desempenho e fiabilidade do componente produzido. O processo FFF é reconhecido pela sua capacidade de produzir componentes com comportamento mecânico anisotrópico, resultante do modo como o material é depositado ao longo do fabrico. Este comportamento é causado pelas diferentes orientações da direção e linha de impressão (Zohdi & Yang, 2021). Adicionalmente, os parâmetros de fabrico de direção de impressão (*raster angle*), espessura da camada e a percentagem de preenchimento, têm influência significativa na qualidade e desempenho da impressão. No estudo de Chaudhry & Czekanski, verificou-se que com o aumento da altura da camada de deposição de 0,1 para 0,4 mm resultou numa redução de 36,5% da resistência à tração do componente. Na Figura 7 são representados três tipos de parâmetros: orientação, altura da peça e espessura das camadas.

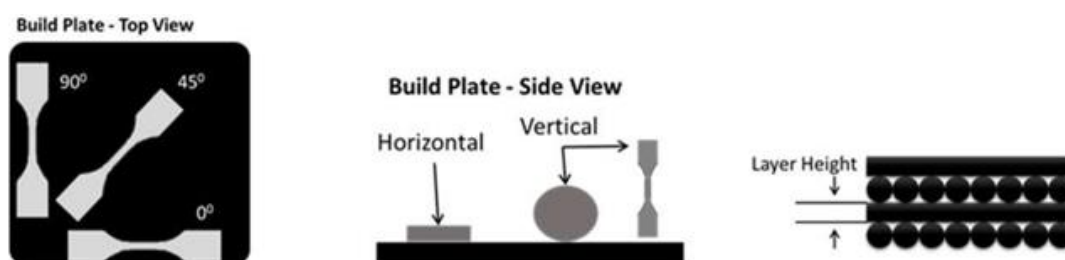


Figura 7 - Orientação, altura da peça e espessura das camadas depositadas (Chaudhry & Czekanski, 2020).

2.2.2.1 Parâmetros da Impressão

Como anteriormente referido, FFF é um processo de fabrico que tem muitos parâmetros associados, sendo que cada um destes tem uma ação diferente na impressão. Os parâmetros de impressão podem ser divididos em três categorias (Gao et al., 2022):

- parâmetros de processo (*raster angle*, espessura da camada, orientação de construção, largura da deposição (*raster width*), velocidade de impressão, *infill density*, zona com ar (*air gap*), preenchimento da peça (*infill pattern*), temperatura de extrusão);
- parâmetros do ambiente (temperatura da plataforma);
- outros parâmetros de impressão (diâmetro do bocal, diâmetro do filamento).

Alguns dos referidos parâmetros de processo podem ser observados na Figura 8.

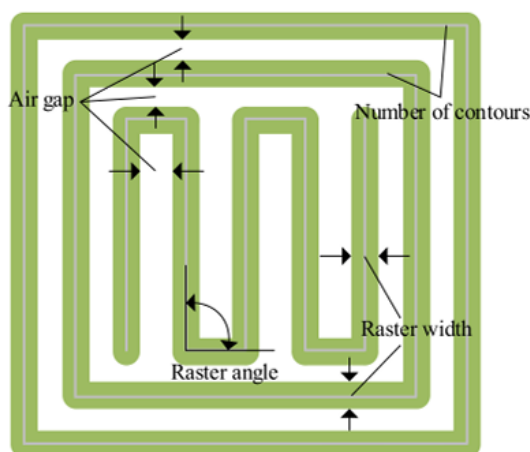


Figura 8 - Parâmetros do FDM, relacionados ao caminho do bocal (Gao et al., 2022).

Todos os parâmetros acima referidos vão influenciar as propriedades mecânicas e térmicas das peças impressas. Os seguintes parâmetros descritos em maior detalhe foram os que apresentaram maior relevância.

- **Espessura da camada de deposição** – é definida pelo eixo vertical (eixo-Z) que pode variar entre 0,05 e 0,4 mm (Figura 9). Neste estudo ficou estabelecido em 0,2 mm.

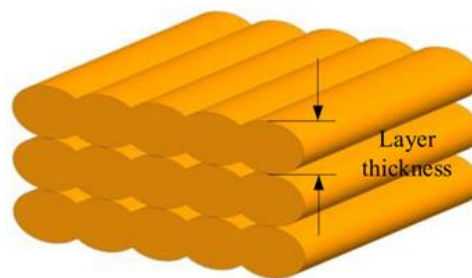


Figura 9 - Espessura da camada (Gao et al., 2022).

- **Velocidade de impressão** – refere-se à velocidade da cabeça da impressora, ao longo do eixo XY. Aumentar a velocidade de impressão, pode levar a camadas imperfeitas e desalinhadas, reduzindo a capacidade estrutural da peça impressa. Neste estudo, foi utilizada uma velocidade entre 20 mm/s a 30 mm/s, como recomendado pela fabricante do TPU;

- **Preenchimento das peças (*infill*)** – as peças fabricadas por FA são geralmente constituídas por linhas de deposição, que podem formar estruturas internas, como *honeycomb*, linha reta, grelhas, triângulos, etc (Impresoras3D, 2025). As formações internas, exemplificadas na Figura 10, conferem à peça propriedades únicas, incluindo baixa densidade, elevada relação resistência/peso e a capacidade de absorção de energia e de ruído.

Estas estruturas celulares podem ser observadas na vida animal, como é o caso dos chifres dos veados (com um núcleo de estrutura em favo de abelha, que ganha densidade à medida que chega ao exterior, conferindo maior resistência e baixo peso) (Zheng, 2019). Esta compreensão permite a otimização dos materiais para alcançar um equilíbrio desejado entre peso, resistência e outras propriedades mecânicas (Gibson, 2003).

No trabalho de Khan et al., (2018) foi efetuado um estudo, para caracterizar as estruturas da Figura 10, conseguindo-se constatar que os padrões internos têm um efeito muito substancial nas propriedades gerais, com o formato *honeycomb* e retilíneo a serem os que apresentam maior deformação e tensão máxima.

No estudo de (Antunes, 2024) foram efetuadas camadas de reforço, com o formato total e *honeycomb*, com um preenchimento de 25%, tendo sido observado um aumento na resistência à delaminação e na resistência à rotura das fibras, quando utilizado o formato *honeycomb*.

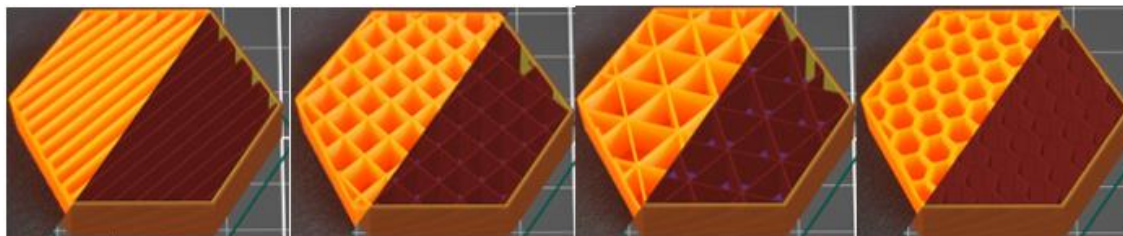


Figura 10 - Formato da estrutura interna (Impresoras3D, 2025).

Um parâmetro fundamental do preenchimento, é a **densidade relativa** [equação (1)] e a **área relativa**. A densidade relativa é a razão entre a densidade do material celular (ρ) e a do material sólido de que é feito (ρ_s), influenciando diretamente as propriedades mecânicas da estrutura, como rigidez e resistência mecânica (Gibson, 2003).

$$\text{Densidade relativa } (\rho^*) = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (1)$$

A área relativa (A^*) [equação (2)], aplicada a estruturas bidimensionais, é a razão entre a área ocupada pelo material sólido (A) e a área total da estrutura (A_s), afetando de forma equivalente o desempenho mecânico. Ao calcular a densidade ou a área relativa é possível prever o desempenho mecânico global do material. (Zheng, 2019) (Gibson, 2003)

$$\text{Área relativa } (A^*) = \frac{A}{A_s} \quad (2)$$

No estudo realizado por (Kiński & Pietkiewicz, 2020) destaca-se a relevância da área relativa, com a investigação centrada na influência do diâmetro do bocal de impressão na resistência à tração de modelos tridimensionais. Foram analisados dois de preenchimento (50% e 100%), procedendo-se ao aumento progressivo do diâmetro do bocal e, em contrapartida, da área relativa da estrutura.

Observou-se que, com o aumento do diâmetro, a resistência à tração também aumenta, até ser atingido um determinado limite, onde a resistência começa a diminuir. Na realização deste estudo, foi selecionado o padrão de preenchimento que apresentou melhor desempenho no trabalho de (Antunes, 2024). Um padrão de estrutura celular em *honeycomb* com 25% de preenchimento, sendo neste estudo utilizado um preenchimento de 30%, permitindo melhorar a relação resistência vs elasticidade e analisar o seu efeito na adesão ao pré-preg e na delaminação entre camadas.

Os restantes parâmetros de fabrico anteriormente referidos, foram estabelecidos com base no trabalho de (Antunes, 2024).

2.3 Ensaios de Caracterização

Para responder aos objetivos estabelecidos, foi efetuada uma pesquisa sobre diferentes ensaios de caracterização física, química e mecânica de compósitos laminados, com particular foco no comportamento elástico e plástico do laminado desenvolvido. São várias as normas aplicáveis à caracterização mecânica destes materiais, tendo sido selecionadas aquelas que permitissem cumprir os objetivos do presente estudo, nomeadamente, para os ensaios de impacto (ASTM D7136 – provete com 150x25 mm) e de tração (ASTM 3039 – provete com 200x30 mm) em compósitos de matriz polimérica (Aga & Woldeesenbet, 2007). No caso do ensaio de flexão, foi utilizada a mesma norma ASTM 7136 que Antunes, (2025), de forma a manter a consistência metodológica. Entre estes, podiam ser efetuados ensaios de cisalhamento interlaminar (ILSS, ASTM D2344/D2344M), utilizado, para determinar a resistência ao deslize entre camadas do laminado, permitindo assim avaliar a adesão entre as camadas de TPU e o pré-preg. No estudo de Lakshmi et al. (2019) foi empregue a norma D2344, para analisar a força de cisalhamento em compósitos laminados de FV e epóxi. Este ensaio foi realizado experimentalmente e por meio de elementos finitos.

A norma ASTM D5528 seria interessante de analisar, uma vez que permite avaliar a tenacidade à fratura interlaminar em Modo I (Figura 11), fornecendo informação essencial sobre a resistência à propagação de fissuras por delaminação em abertura.

Este tipo de caracterização é de grande importância na avaliação da integridade estrutural de compósitos laminados. O estudo de Beckermann & Pickering, (2015), centra-se na análise do comportamento à fadiga de laminados de FC/epóxi na presença de entalhes, simulando defeitos críticos como cortes, furos ou danos por impacto, comuns na indústria aeronáutica.

Os resultados mostraram que a introdução destes entalhes compromete significativamente a vida útil dos laminados, evidenciando a necessidade de técnicas de reforço interlaminar que mitiguem os efeitos da delaminação e aumentem a resistência ao crescimento de fissuras. Sendo ainda interessante realizar um estudo de reforço interlaminar para o Modo II (Ou et al., 2020).

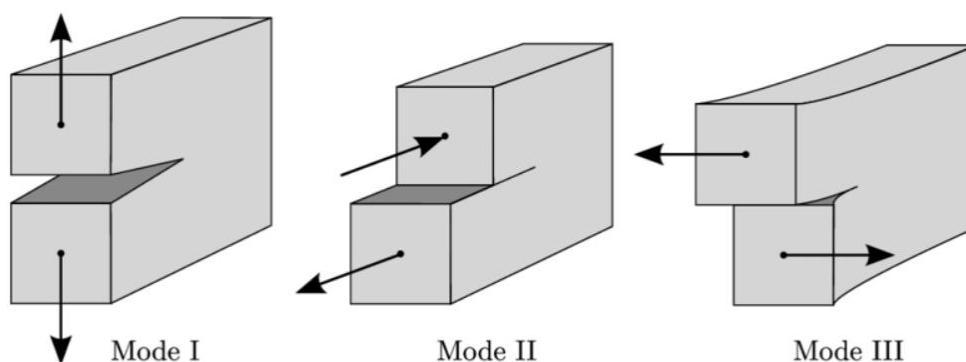


Figura 11 - Modos de fratura e cargas aplicadas (Turis & Ivánková, 2020).

A norma ASTM D7137, consiste num ensaio compressão após impacto (CAI), que permite estudar a resistência residual do compósito após impacto, crucial para avaliar se os reforços interlaminares ajudam a preservar a integridade estrutural. No trabalho realizado por, Y. Zhang et al. (2022), conseguiu-se observar que laminados com reforço interlaminar de nanotubos de carbono apresentaram melhoria significativa na absorção de energia e na resistência pós-impacto, graças à maior resistência interlaminar que inibe a delaminação.

3 Procedimento Experimental

Neste capítulo são apresentados todos os materiais e equipamentos utilizados na presente dissertação. É apresentado o processo de fabrico utilizado e os métodos para obter o laminado pretendido, tendo sempre como base artigos de referência. Os ensaios realizados passaram a ser referenciados por:

- I-S (ensaio de impacto – sem TPU);
- I-HC (Ensaio impacto – com TPU *honeycomb*);
- T-S (ensaio tração – sem TPU);
- T-HC (ensaio tração – com TPU *honeycomb*);
- F-S (ensaio flexão – sem TPU)
- F-HC (ensaio flexão – com TPU *honeycomb*).

A Figura 12 representa o compósito laminado produzido neste trabalho a partir de pré-preg de FC em matriz termoplástica de PA6, reforçado com camadas do elastómero TPU 95A. Neste estudo foram produzidos laminados com três camadas de pré-preg de FC (Figura 12 – camada cinzenta) em tela de orientação [0/90]. Nos laminados com reforço interlaminar em TPU (Figura 12 – camada castanha), foram aplicadas duas camadas adicionais, constituídas por um preenchimento do tipo *honeycomb*, com 30% de densidade e 0,4 mm de espessura.



Figura 12 - Esquema de empilhamento com 2 camadas de reforço interlaminar.

3.1 Materiais e equipamentos

Materiais dos provetes:

- Tecido pré-preg de FC com PA6 (Anexo B);
 - ❖ Referência– TSF-LowBIOPA200-3K-CF-TW-400;
- Filamento de TPU 95^a (Anexo C);
 - ❖ Referência Ultrafuse TPU 95A;

Materiais para produção:

- Saco de Vácuo (resistente a temperaturas de operação de 210°C);
- Pano de respiração/sangramento (*breather*);
- *Peel ply*;
- Fita de selagem para temperaturas elevadas – Yellow AT 200 Y (temperatura máxima de operação de 204°C);
- Desmoldante – Cheamlease PMR HS EU;
- Desmoldante – Cheamlease 2693W;
- Fita de teflon®
- Diluente e Acetona (para limpeza);
- Luvas de proteção;
- Lixas de várias granulometrias, para polir e para evitar o escorregamento dos provetes nas amarras no ensaio de tração;
- Selante Mikon®399MC (uniformiza a superfície do laminado final);
- Extensómetro da máquina de tração/flexão 3 pontos da marca Instron;

Equipamentos:

- Máquina de tração/flexão 3 pontos – Instron 5960 series;
 - ❖ Modelo – Memmert UNB 500;
- Máquina de impacto por queda de peso – Instron Ceast 9340;
- Máquina de corte, para os provetes (empresa Virtus);
- Forno de precisão de 2000W

- Multímetro digital com Termopar – UNI-T (UT890C/UT890D+)
- Bomba de vácuo de ½ hp;
 - ❖ Modelo 2RS-2;
- Impressora tridimensional (3D)
 - ❖ Modelo – Creality – Ender S1;
- Chapa base (Al 5083 H111 prato de alumínio);
- Conector do saco de vácuo;
- Conjunto de acoplamento a vácuo de aperto rápido;
- Acessórios de pressão para juntas roscadas;
- Braçadeiras em aço inoxidável;
- Régua;
- Polideira
- Tubos de vácuo

Chapa de alumínio fabricada sob encomenda (Anexo E), com 510×350×8 mm.

3.2 Processo de fabrico

Neste capítulo são apresentadas as etapas de fabrico dos laminados em estudo, sendo efetuada uma descrição resumida das mesmas. É aqui descrita em detalhe a metodologia de trabalho para estabelecer um processo de fabrico viável e consistente.

3.2.1 Fabrico Aditivo tridimensional

Seguindo os parâmetros de impressão, estabelecidos no capítulo 2.2.2, foram impressas seis lâminas TPU de estrutura *honeycomb* (para as fornadas 2, 4 e 5) com 210x200x4 mm, todas com orientação de impressão de 0° (Figura 13.A e B), garantindo, a mesma rigidez e resistência mecânica em todas as direções entre impressões.

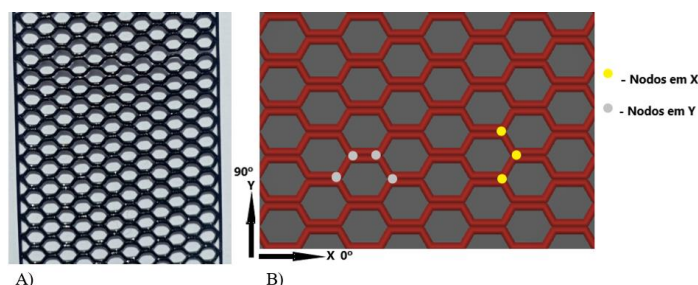


Figura 13 - (A) Camada impressa de honeycomb (B) Representação da camada honeycomb no software PrusaSlicer com representação de eixos x (0°) e y (90°) e nodos de ligação.

Após impressão das camadas de TPU, constatou-se (manualmente) que a orientação de impressão tem efeito nas propriedades das mesmas, tendo-se verificado uma menor rigidez à tração na orientação de impressão 0° que na direção perpendicular. Por forma a introduzir o maior impacto de elasticidade ao laminado foi aplicada a orientação de impressão de 90° (Figura 13.A e B) na direção sujeita a esforços nos ensaios de tração e flexão.

3.2.2 Fabrico do laminado compósito

Antes de estabelecer uma metodologia definitiva de fabrico, foram realizados testes preliminares de estudo, que permitiram identificar os principais desafios para, desta forma, se otimizar o processo de fabrico dos compósitos laminados.

3.2.2.1 Fase de estudo e aperfeiçoamento

Durante a fase de estudo de processamento foram realizadas diversas medições de temperatura e fabricadas pequenas amostras. As análises mais relevantes e as suas conclusões são aqui descritas.

1. **Verificação da temperatura de processamento:** Foi aplicado um termopar à placa de alumínio (sem pré-preg) com o objetivo de determinar quanto tempo demora a atingir os 220 °C. Foi verificado, que a placa demora 83 minutos a atingir os 220 °C. Esta análise indica que o tempo de processamento total, considerando um tempo de cura a 220°C de 10 minutos, irá ser aproximadamente de 93 minutos.
2. **Teste de dois desmoldantes:** observou-se que o desmoldante Cheamlease PMR HS EU não apresenta resíduos visíveis na placa de alumínio após processamento, enquanto o desmoldante 2693W deixa impurezas. Em ambos os provetes de teste, o *peel ply* apresentou muita adesão ao laminado, ficando parte dele agarrado à superfície deste, como mostra as Figura 14.B e C. Por forma a reduzir a adesão do *peel ply* (Figura 14.B) ao compósito foi aplicado desmoldante diretamente no *peel ply*. O resultado obtido após aplicação de desmoldante no *peel ply* é apresentado na Figura 14.D.

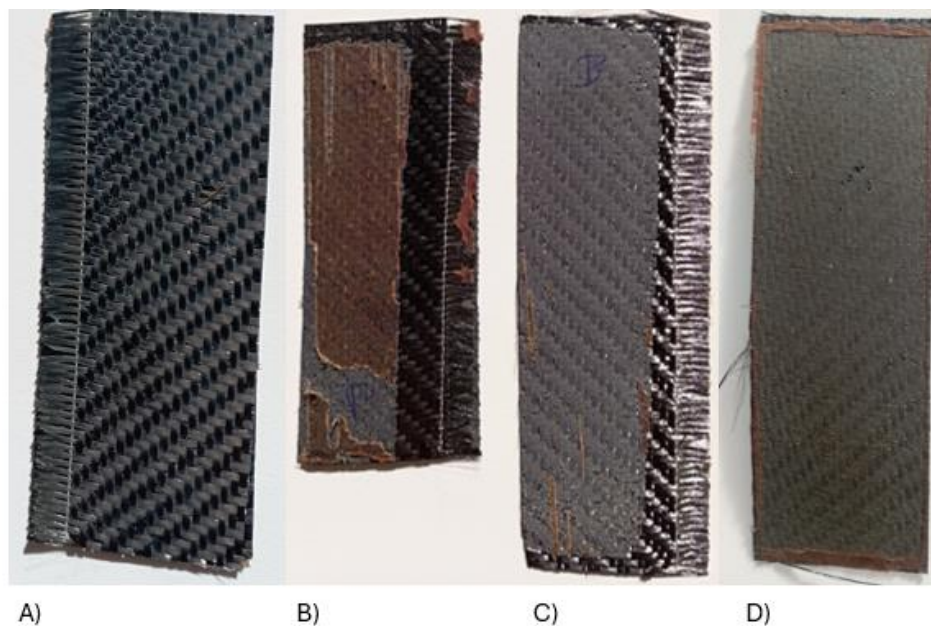


Figura 14 - Vista da superfície do provete: A) em contacto com desmoldante; B) e C) em contacto com o peel ply; D) em contacto com o peel ply humedecido com desmoldante.

3. **Saco de vácuo:** para assegurar que o saco permanecia em vácuo durante 1h e 33 min, este foi deixado fora do forno, para, após passado o referido período se analisarem as perdas de vácuo. Foram executados vários testes, tendo-se verificado que:
- Na primeira testagem, a placa de alumínio foi inserida dentro do saco de vácuo (Figura 15.A), resultando no contacto com a parede do forno, derretendo o saco, originando perda de vácuo.
 - Na segunda tentativa (Figura 15.B) o saco de vácuo foi feito diretamente na placa, mas após deixar 24h verificou-se perda total do vácuo.
 - Na última fase de testagem (Figura 15.C), foi efetuada uma borda com o saco de vácuo que depois foi dobrado para cima, evitando o contacto com as paredes do forno. Este método apresentou uma melhoria na capacidade de manutenção de vácuo no saco e uma maior homogeneidade na distribuição da PA6 no laminado (Figura 14.D).

Assim, na primeira fornada de provetes foi utilizado o método da Figura 15.C. Foi efetuado um “S” com o cabo do termopar na fita de selagem, conseguindo-se assim garantir um maior tempo de vácuo Figura 15.D. Na terceira, quarta e quinta fornada, o termopar foi posicionado do lado de fora do saco vácuo, para minimizar as perdas de vácuo.

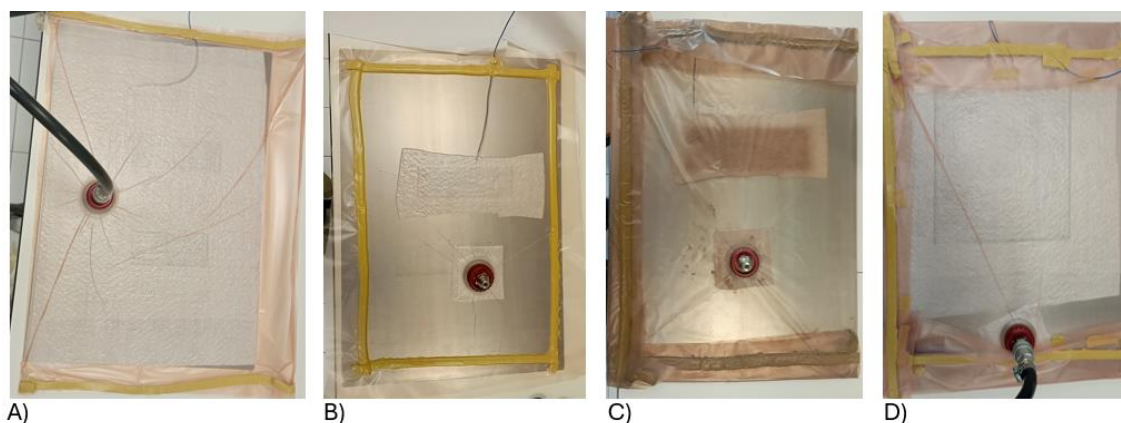


Figura 15 - A) Chapa no interior do saco de vácuo; B) Saco de vácuo na chapa; C) e D) Aperfeiçoamento do saco de vácuo.

Substituição do disco de silicone e da fita de teflon: constatou-se, que quantos mais testes/fornadas, fossem realizadas, mais escuro e deformado ficava o disco de silicone da tomada de vácuo. Na Figura 16.A, observa-se que, após uma série de testes de vácuo, a produção de provetes de teste e a realização da primeira fornada, o disco de silicone apresentava deformações, tendo sido substituído pelo disco representado na Figura 16.B. Este novo disco foi utilizado até à quarta fornada (Figura 16.B a D). Para a quinta fornada (Figura 16.E), foram adquiridos vários discos de silicone novos, sendo recomendado o controle da aparência destes consumíveis neste processo de fabrico.

Foi ainda necessária a constante substituição da fita de teflon® da rosca da tomada de aplicação de vácuo (visto esta perder as propriedades de selagem), sendo possível observar uma diminuição na perda de vácuo.

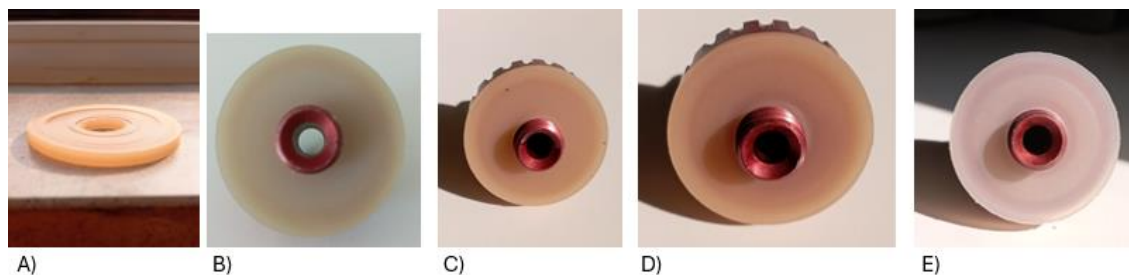


Figura 16 - Discos silicone após cada fornada - A) Primeira; B) Segunda; C) Terceira; D) Quarta; E) Quinta.

3.2.2.2 Processo de Fabrico do laminado compósito

Com a garantia de manutenção do vácuo, prosseguiu-se com o fabrico dos provetes laminados. De seguida é apresentada a sequência de trabalho executado no fabrico de todos os laminados:

1. **Preparação do forno** – deixar atingir os 220°C;
2. **Preparação da chapa base** de alumínio, removendo todas as impurezas com a ajuda de papel e diluente;
3. **Aplicação do desmoldante** – de 15 em 15 min foi aplicada uma (três no total) camada do desmoldante Cheamlease PMR HS EU, ficando, antes de colocar as camadas do laminado, 30 min à espera;
4. **Aplicação de desmoldante sobre o *peel ply***
5. **Preparação do laminado** – camada a camada (Figura 17.A e B);
6. **Preparação do saco de vácuo, para o processo de cura** – deposição do pré-preg (camada a camada), e *peel ply* (Figura 17.C). De seguida, é colocado o *breather* sobre o *peel ply*, sendo posicionados dois quadrados sobrepostos de *breather* na zona da rosca de aplicação da tomada de vácuo.
7. **Selagem do saco de vácuo**, com fita selante, recortando-o com uma margem adicional de 5 cm em cada extremidade, a qual será posteriormente dobrada sobre a chapa, como demonstrado na Figura 17.D.

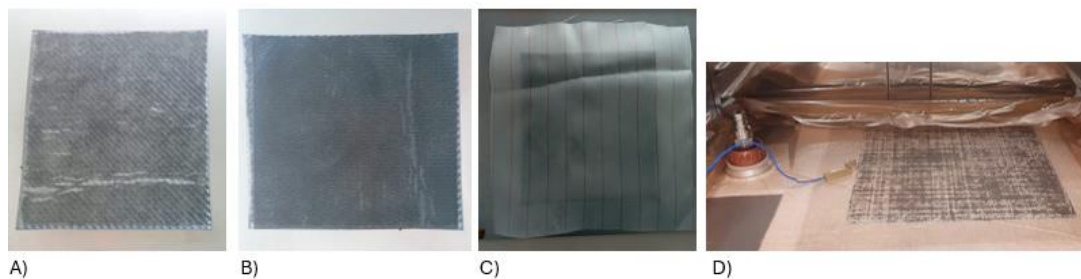


Figura 17 - A) FCPA6; B) FCPA6-HC; C) FCPA6-HC + peel ply; D) Saco de Vácuo no fim do processo de cura.

8. **Processo de cura** – a chapa com o laminado no saco de vácuo demorou aproximadamente 1h e 23 min a atingir os 220°C (como previsto), sendo depois deixada durante 10 min nos 220°C para garantir a total molhagem do tecido de FC por parte da PA6. Na Tabela 2, encontram-se os registos de temperatura ao longo do processo de cura. Os valores da temperatura (Figura 18), a partir da 3ª fornada, não estão de acordo com os valores obtidos para a 1ª e 2ª fornadas, pois a partir da 3ª fornada o termopar foi colocado fora do saco de vácuo, resultando em registo maiores de temperatura. No entanto, o tempo de fabrico seguiu o estabelecido e verificado pelas duas primeiras fornadas.

Tabela 2 - Temperatura vs tempo de cura

Temperatura (°C)	Fornadas - tempo (min:seg)				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
54	2:18	1:32	-	-	-
72	4:10	3:54	-	-	-
83	5:27	5:50	2:20	2:07	2:16
93	-	-	3:25	2:58	3:33
103	8:14	8:15	4:30	3:48	5:00
113	-	-	6:06	4:45	6:28
123	11:20	10:40	7:30	5:44	7:56
133	13:00	12:16	9:06	6:49	9:22
143	-	-	10:48	7:59	10:54
153	17:47	16:43	12:50	9:18	12:56
163	-	-	15:26	11:03	15:33
173	26:30	23:44	19:00	13:24	19:40
183	.	.	23:00	19:55	23:15
193	35:10	38:00	27:50	25:20	28:40
203	-	-	36:00	38:34	34:21
215	61:20	62:28	51:45	51:27	45:15
219	-	-	64:00	79:00	61:35
220	91:30	85:00	75:00	85:00	86:00

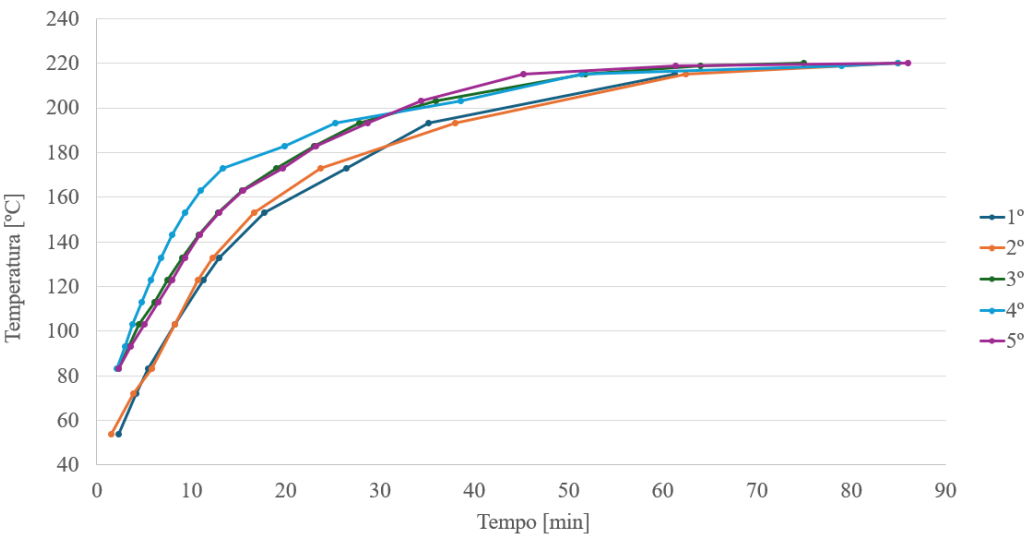


Figura 18 - Temperatura vs Tempo de cura.

9. **Desmoldagem** – deixou-se a chapa de alumínio arrefecer até aos 30°C para remoção do laminado curado, voltando-se depois a repetir os pontos 5 a 10 para fabrico e um novo laminado;
10. **Acabamentos** - corte dos provetes por CNC (lâmina de corte remove 0,3 mm de cada vez), acabamento superficial com lixas de várias granulometrias, seguidas do Selante Mikon®399MC, e polimento da lateral dos povetes por polideira;
11. **Análise dimensional** - microscopia ótica e testagem.

É essencial que durante o processo de cura, o laminado esteja sempre em vácuo, pelo menos até ser atingida a temperatura de processamento recomendada pelo fabricante do pré-preg, ou seja 220 °C (Kumar & Ahmed, 2013).

No total, foram realizadas cinco fornadas:

- duas sem reforço, apenas com FCPA6 (1ª e 3ª fornadas).
- três com reforço interlaminar de TPU 95A (2ª, 4ª e 5ª fornadas)

O resultado do processo de cura de cada fornada:

- 1ª (pior a nível de vácuo – sem TPU);
- 2ª (pior a nível de vácuo – com TPU);
- 3ª (melhor de todas a nível de vácuo – sem TPU);
- 4ª (foi a terceira melhor – com TPU);
- 5ª (foi a segunda melhor, mas a melhor com TPU).

Para os laminados resultantes foram utilizados três tipos de desenho de corte, tendo sido definido, para cada tipo, um número específico de provetes destinados aos ensaios de Impacto (I), Tração (T) e Flexão (F). Foram ainda cortados provetes de dimensões inferiores às aconselhadas, para maximizar os provetes por fornada, para os ensaios referidos, tendo sido utilizados para o ensaio de impacto Charpy. Os desenhos de corte utilizados para o fabrico dos provetes por CNC podem ser observados no Anexo D, sendo apresentados na Figura 19 as dimensões dos três tipos de provetes usados nos ensaios estabelecidas nas respetivas normas (subcapítulo 2.3).

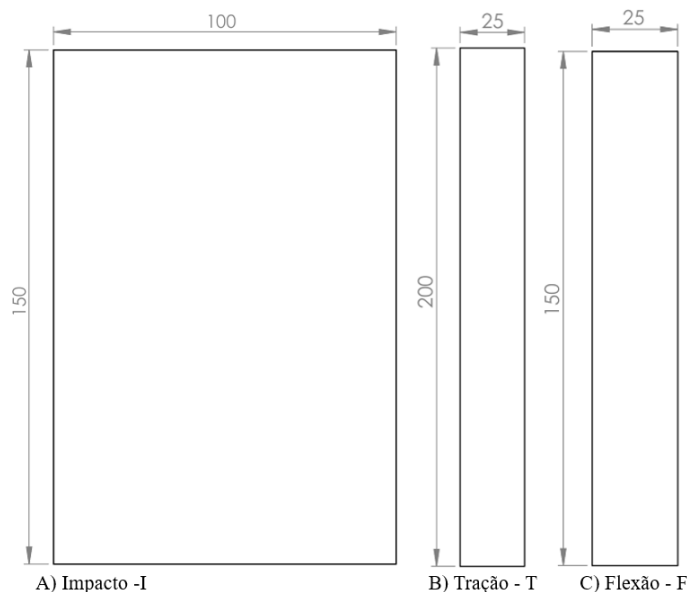


Figura 19 - Dimensões dos provetes [mm]: A) Impacto - I; B) Tração - T; C) Flexão - F.

Após as etapas de fabrico e corte, procedeu-se a uma análise dimensional dos provetes, de forma a verificar a conformidade geométrica com as normas estabelecidas. Concluída esta análise, é descrita a metodologia experimental adotada, para a execução dos ensaios.

3.3 Análise Dimensional

Com todos os provetes fabricados, e antes de efetuar qualquer tipo de cálculos ou ensaios mecânicos, é fundamental verificar o estado/dimensões dos provetes obtidos, utilizando um micrómetro Topex.

A partir desta análise, foi possível observar que alguns dos provetes fabricados apresentam flutuações consideráveis na espessura, como apresentado nas Figura 20 e Figura 21. Na Tabela 3 é apresentada a nomenclatura adotada para os provetes fabricados, que foram identificados com base na fornada (numerados entre 1^a e 5^a), pela presença de reforço interlaminar em TPU (HC) ou pela sua ausência (S), e adicionalmente numerados de 1 a 33. Decidiu-se excluir os provetes 1-S-8; 2-HC-15; 3-S-21; 5-HC-31 e 5-HC-32, por apresentarem comprimentos inferiores aos mínimos exigidos, tanto para os ensaios de tração como para os de flexão, tendo por isso sido utilizados no ensaio Charpy.

Tabela 3 - Nomenclatura dos provetes

	Nº	Nº
I-S	3-S-20	-
I-HC	4-HC-26	5-HC-33
F-S	1-S-1	1-S-2
	1-S-4	1-S-3
	1-S-8	3-S-19
	3-S-21	-
F-HC	5-HC-31	5-HC-32
	4-HC-22	4-HC-23
	4-HC-25	2-HC-9
	2-HC-10	2-HC-13
	2-HC-14	2-HC-15
T-S	3-S-16	1-S-5
	1-S-6	1-S-7
	3-S-17	3-S-18
T-HC	5-HC-28	5-HC-29
	5-HC-30	2-HC-11
	2-HC-12	4-HC-24
	4-HC-27	-

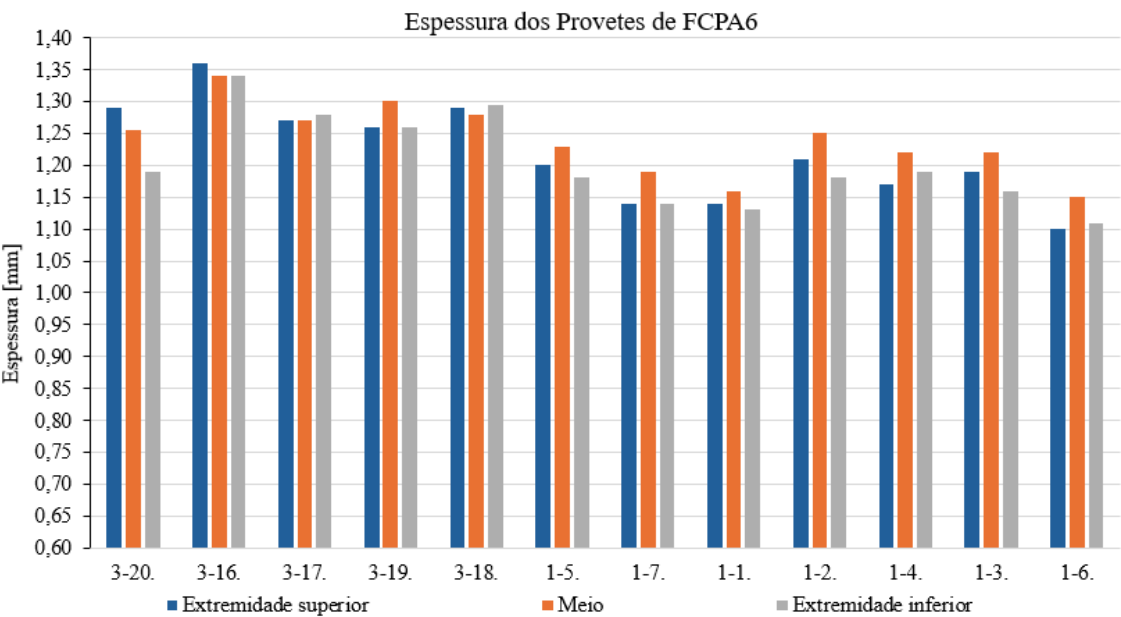


Figura 20 - Espessura dos Provetes de FCPA6.

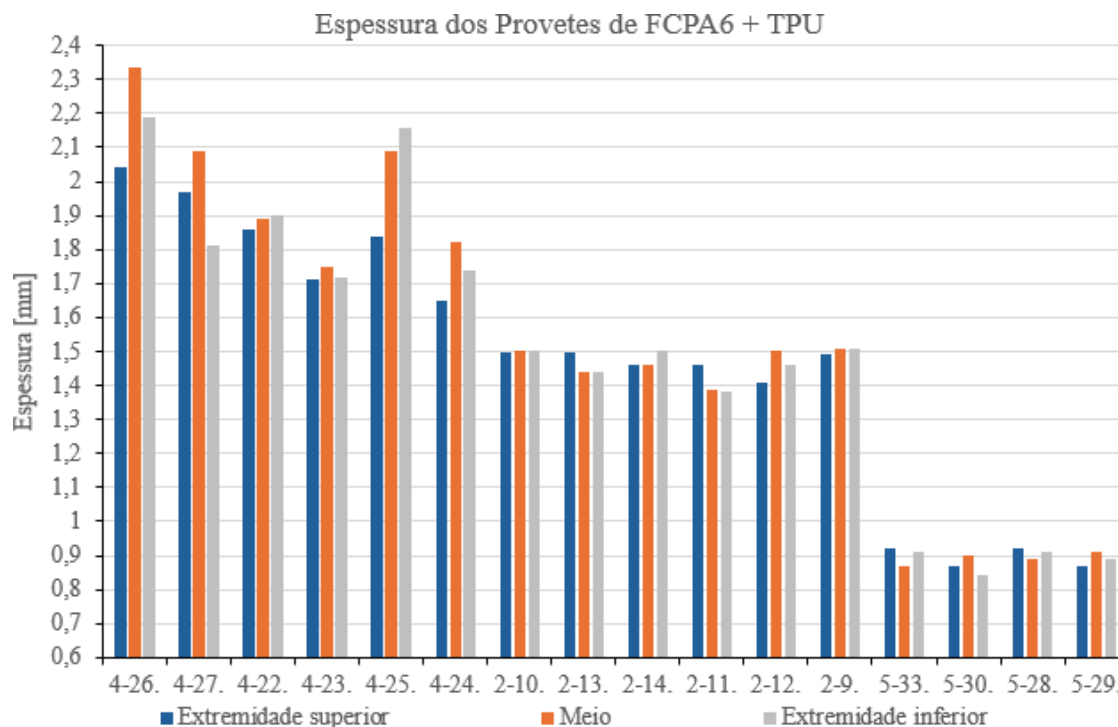


Figura 21 - Espessura dos Provates de FCPA6-HC.

Na Figura 22, é apresentada uma análise das dimensões (valores médios, máximos e mínimos) dos provates de FCPA6 com e sem reforço. Provates sem reforço apresentaram uma espessura média de 1,219 mm, com uma variação de 24%. Realizando a mesma análise para os provates de FCPA6-HC (FCPA6+TPU da Figura 22, verificou-se que a espessura média é de 1,428 mm, apresentando uma variação de 178%.

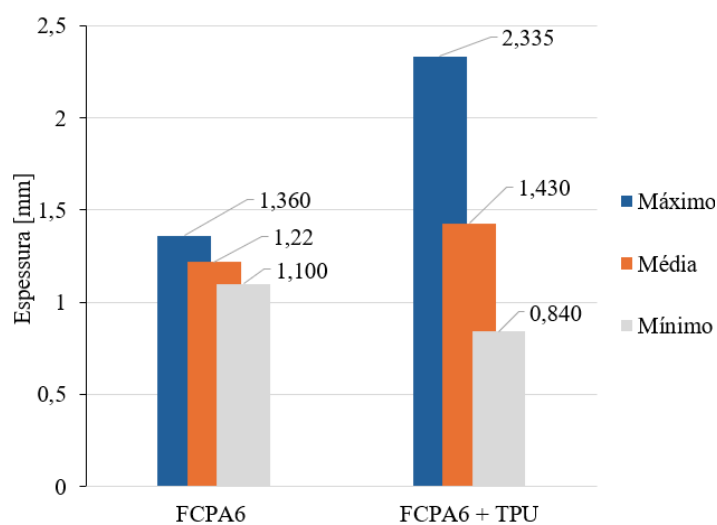


Figura 22 - Comparação da espessura médias dos laminados.

Antes de estimar a espessura total dos dois laminados fabricados foi necessário obter a fração volúmica da fibra (V_f) pela equação (3), através da fração mássica de fibra (w_f), indicada na ficha técnica do pré-preg (Anexo B) e das densidades (ρ) da FC e PA6. Foi assim, obtido 38% (V_f) e 62% (V_m).

$$V_f = \frac{\frac{w_f}{\rho_f}}{\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m}} \quad (3)$$

A fração volúmica de fibra permite assim calcular a espessura do laminado, da seguinte maneira, pelo cálculo da espessura de cada lâmina (h_i) como apresentado em (4)

$$h_i = \frac{\text{gramagem}}{\rho_f \cdot v_f} \quad (4)$$

Sabendo que a gramagem do pré-preg, é 200 g/m², dividindo (porque é tecido 2/2) uma camada de pré-preg em duas orientações (0° e 90°) é assim considerado que cada orientação tem 100 g/m². É assim obtido uma espessura por camada estimada sem reforço interlaminar de 0.144 mm resultando numa espessura estimada total de 0,864 mm.

Como referido, este estudo consiste na inserção de duas camadas de reforço de TPU, cada uma com 0,4 mm de espessura, o que corresponderia a uma espessura total adicional de 0,8 mm (considerando camadas sem estrutura celular). Considerando que para as camadas de TPU de estrutura *honeycomb*, com 30% de área relativa, a forma como se pode estimar a espessura final tem em consideração o volume relativo e a densidade do TPU (logo a espessura de TPU é 0,40*30% = 0,24 mm). Considerando uma densidade relativa de 30% a espessura total foi estimada através de:

$$ht = (3 * 0,144 * 2) + (0,3 * 0,4) * 2 = 1,104 \text{ mm}$$

A Tabela 4, apresenta a comparação da espessura estimada com a espessura média obtida. É possível constatar que os provetes de FCPA6 ficaram 41,06% mais espessos que o esperado e os provetes de FCPA6-HC 29,30% mais espessos que o esperado. A variação menor, observada nos provetes de FCPA6-HC, entre a espessura esperada e obtida, pode ser consequência da estrutura celular aberta do *honeycomb*, que permite maior embebimento da FCPA6.

Tabela 4 - Variação das espessuras

	Espessura Média (mm)	Espessura Esperada (mm)	Variação de Espessura (%)
FCPA6-HC	1,428	1,104	29,30
FCPA6	1,219	0,864	41,06

A diferença entre a espessura média dos provetes de FCPA6 e de FCPA6-HC foi de 17,1%, o que não é uma variação considerável, visto a espessura esperada ter uma variação de 27,8%. Esta discrepância poderá estar associada à 4ª fornada, cuja espessura média rondou os 1,898 mm, enquanto a 5ª fornada apresentou uma espessura média de 0,892 mm. A origem destas variações poderá estar relacionada com a dificuldade em manter o vácuo de forma estável durante todo o processo de cura. Na Figura 23 é apresentada uma análise individual da espessura de cada fornada, tendo-se verificado que as fornadas de FCPA6 (1ª e 3ª), apresentam uma variação de -4%, na 1ª fornada e 5,4%, na 3ª fornada. No caso das fornadas de FCPA6-HC (2ª, 4ª e 5ª), observou-se que a 2ª fornada ficou 2,6% mais espessa que a média de FCPA6-HC, 34,5% mais espessa na 4ª e 37,5% mais fina na 5ª fornada. Esta variação significativa da espessura da 5ª fornada em relação às restantes fornadas de FCPA6-HC pode estar associada à espessura das camadas impressas de HC.

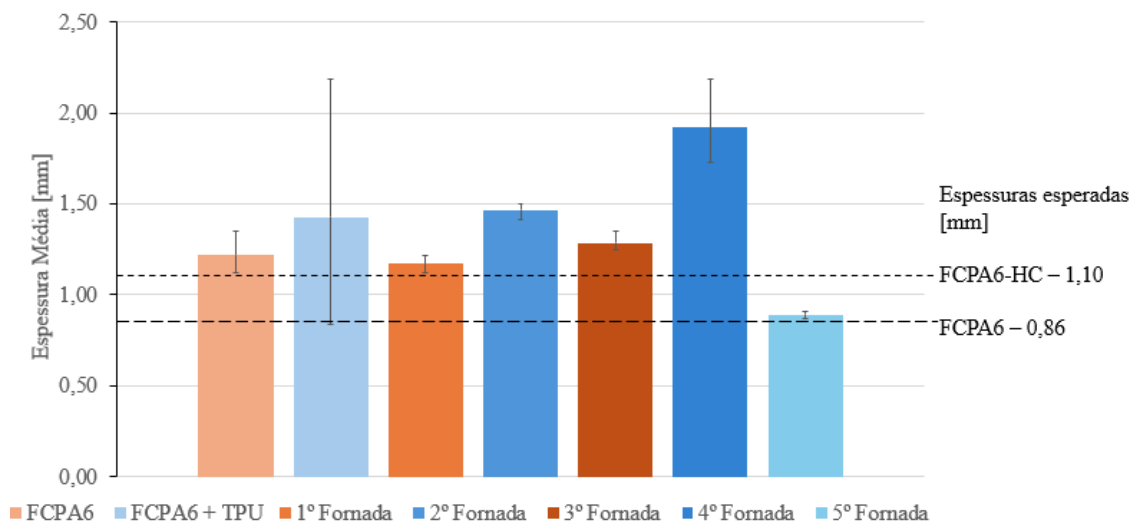


Figura 23 - Variação das Espessura dos provetes produzidos nas diferentes fornadas.

Na Tabela 5 são apresentadas todas as medidas retiradas dos provetes fabricados. Estando identificados os provetes utilizados em cada ensaio, assim como a respetiva fornada, sabendo o resultado de vácuo de cada fornada: 1ª (pior a nível de vácuo – sem TPU); 2ª (pior a nível de vácuo – com TPU); 3ª (melhor de todas a nível de vácuo – sem TPU); 4ª (terceira melhor – com TPU); 5ª (segunda melhor, mas a melhor com TPU).

Tabela 5 - Dimensões / Condições dos provetes

	Nº	Espessura [mm]				Comprimento [mm]	Largura [mm]
		Extremidade cima	Meio	Extremidade Baixo	Média		
I-S	3-20	1,29	1,255	1,19	1,245	149	100
I-HC	4-26	2,04	2,335	2,19	2,188	150	100
	5-33	0,92	0,87	0,91	0,900	150	100
	1-1	1,14	1,16	1,13	1,143	151	27
F-S	1-2	1,21	1,25	1,18	1,213	149	25
	1-4	1,17	1,22	1,19	1,193	150	27
	1-3	1,19	1,22	1,16	1,190	150	25
	1-8	1,12	1,15	1,15	1,140	107	25
	3-19	1,26	1,3	1,26	1,273	153	28
	3-21	1,28	1,275	1,29	1,282	112	25
F-HC	5-31	0,92	0,87	0,88	0,890	111	25
	5-32	0,89	0,9	0,89	0,893	110	23
	4-22	1,86	1,89	1,9	1,883	150	25
	4-23	1,71	1,75	1,72	1,727	156	23
	4-25	1,84	2,09	2,16	2,030	150	25
	2-9	1,49	1,507	1,506	1,501	148	25
	2-10	1,5	1,504	1,502	1,502	152	25
	2-13	1,5	1,44	1,44	1,460	149	25
	2-14	1,46	1,46	1,501	1,474	149	25
	2-15	1,5	1,44	1,42	1,453	110	25
T-S	3-16	1,36	1,34	1,34	1,347	197	25
	1-5	1,2	1,23	1,18	1,203	185	24
	1-6	1,1	1,15	1,11	1,120	190	22
	1-7	1,14	1,19	1,14	1,157	187	25
	3-17	1,27	1,27	1,28	1,273	198	25
	3-18	1,29	1,28	1,295	1,288	198	25
T-HC	5-28	0,92	0,89	0,91	0,907	199	25
	5-29	0,87	0,91	0,89	0,890	198	24
	5-30	0,87	0,9	0,84	0,870	199	25
	2-11	1,46	1,39	1,38	1,410	197	25
	2-12	1,41	1,502	1,46	1,457	198	26
	4-24	1,65	1,82	1,74	1,737	200	25
	4-27	1,97	2,09	1,81	1,957	155	25

3.4 Metodologia experimental

A metodologia experimental iniciou-se com a microscopia ótica dos provetes de forma a validar a qualidade do fabrico. De seguida, efetuaram-se os ensaios de tração, flexão três pontos e impacto, sendo neste capítulo apresentados os parâmetros experimentais, assim como os parâmetros determinados.

3.4.1 Microscopia Ótica

Para a análise dos provetes fabricados e testados, foi efetuada a análise visual, para averiguar se o laminado foi processado corretamente e se as camadas formam uma peça coesa e sem defeitos superficiais. Para além desta análise, foi utilizado um microscópio ótico da marca OPTIKA com uma câmara eletrónica DinoEye Edge para captar as imagens necessárias com o *software* DinoCapture. As figuras apresentadas neste capítulo têm múltiplas amplitudes de zoom, variando de 0,2 mm a 1 mm (ampliação de 4x a 1x). No início do capítulo 4.1, serão apresentadas as imagens dos provetes, ao microscópio ótico, onde será analisada a qualidade dos mesmos.

3.4.2 Tração

A norma ASTM D3039 estabelece provetes de secção transversal retangular de dimensões recomendadas para o provete, de entre as quais foram selecionaram as seguintes: 2,5x200x1,5 a 2,5 mm de espessura. Este provete é fixado numa máquina de ensaios mecânicos com recurso a amarras (Figura 24). O provete é tracionado gradualmente à velocidade de deformação definida, com registo contínuo da força aplicada. O registo da deformação e da força permitem determinar a resposta tensão-deformação do material, a partir da qual é possível obter a tensão máxima que o material suporta até à sua rotura; o módulo de elasticidade (E - Módulo de Young – declive curva tensão vs deformação) e a deformação máxima (ASTM D3039/D3039M-14).

Os ensaios de tração, a máquina INSTRON 5966 (Figura 25.A), com uma célula e carga de 10kN, enquanto os dados foram retirados e guardados pelo *software bluehill*. Na Figura 24.B é apresentado o provete quando posicionado nas amarras de tração com o auxílio de lixas, de forma a evitar o seu escorregamento. A distância de fixação é de 5 cm de cada extremidade, ficando 10 cm na secção central. Aplicou-se uma velocidade de deformação de 2 mm/min.

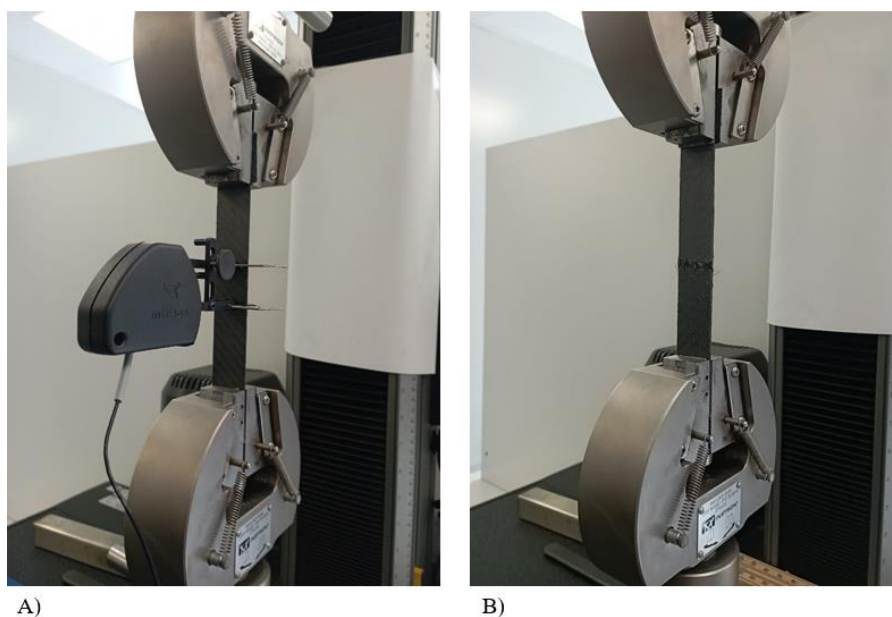


Figura 24 – Ensaio de tração – A) Provete com extensómetro; B) Provete após ensaio de tração.

3.4.3 Flexão em três pontos

O ensaio de flexão em três pontos, definido na norma ASTM D790-17, consiste num sistema de carga de três pontos, em que o provete assenta sobre dois suportes e é submetido a uma força aplicada no ponto médio (Figura 25.B). O ensaio é executado até ocorrer rotura da superfície exterior. Este método de ensaio é utilizado para determinar as propriedades em flexão de plásticos não reforçados e reforçados, permitindo obter: carga máxima aplicada, deflexão, resistência à flexão (corresponde ao declive da curva carga vs deslocamento) e módulo de flexão (ASTM D790-17, 2025).

Tendo por referência (Antunes, 2024), entre outros, e a norma ASTM D790-17 foram estabelecidas as seguintes dimensões para os provetes a sujeitar a este ensaio: 25x150x20 mm. Os ensaios de flexão em três pontos, foram realizados na máquina INSTRON 5966 (Figura 25.A) podendo alcançar uma carga aplicada máxima de 10kN, enquanto os dados são retirados e guardados pelo *software bluehill*. Os provetes foram posicionados no suporte de teste, com um vão de 100 mm, a uma velocidade de flexão de 2 mm/min, com um deslocamento máximo de 40 mm. Nas amarras da máquina de tração foi posicionada a ferramenta que permite realizar a flexão por três pontos, demonstrado na Figura 25.B.

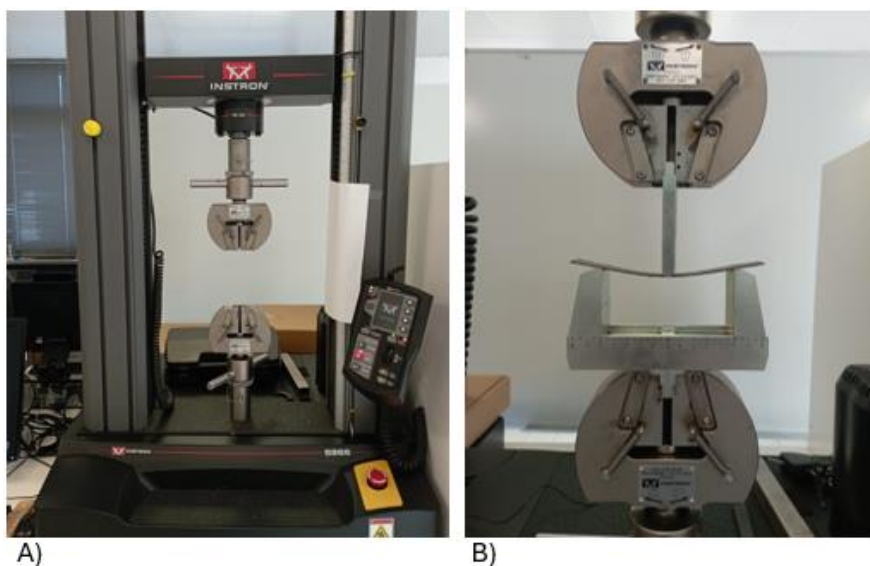


Figura 25 - A) Máquina eletromecânica Instron 5966; B) Flexão em três pontos.

Para padronizar, os provetes foram todos posicionados com a superfície que esteve em contacto com o *peel ply*, sempre virada para cima (Figura 25.B - superfície de aplicação da carga).

3.4.4 Impacto

Antes de prosseguir para o ensaio de impacto por queda, foi realizada uma análise preliminar com o ensaio Charpy, por meio a uma máquina Wolpert e a norma ASTM D6110. Este foi efetuado com um pêndulo de 150J de identador redondo, para os provetes 1-S-8; 2-HC-15; 3-S-21; 5-HC-31 e 5-HC-32.

Os resultados deste ensaio podem ser vistos no Anexo A. Este ensaio teve como objetivo fornecer uma estimativa preliminar da energia de impacto a considerar no ensaio de impacto por queda.

O ensaio por impacto de peso (em queda), foi realizado numa máquina Instron Ceast 9340 (Figura 26.B), nos provetes 3-S-20; 4-HC-26 e 5-HC-33. Este ensaio seguiu a norma ASTM D7136, que consiste em deixar cair um dispositivo de queda de peso com um identador hemisférico no provete plano retangular, como representado na Figura 26.A. A energia potencial do peso de queda foi definida pela massa e pela altura de queda do pêndulo, especificada antes do ensaio.

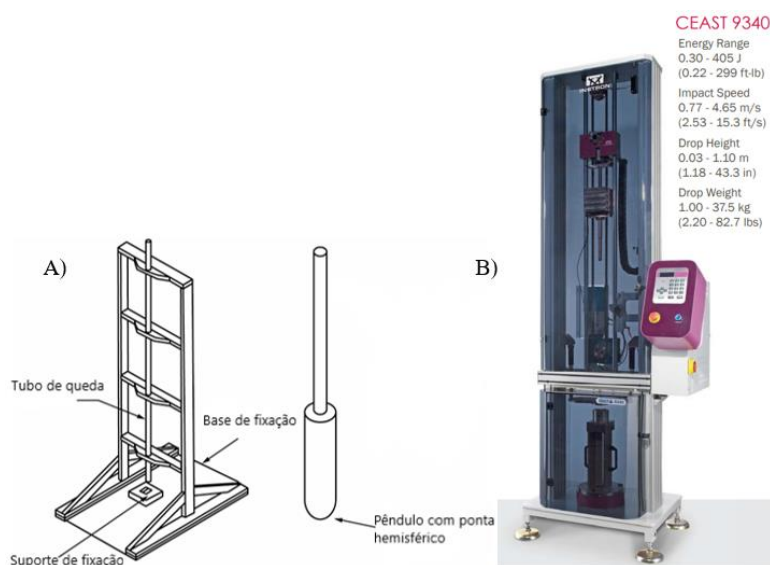


Figura 26 – Ensaio de Impacto – A) Esquema do ensaio de Impacto (ASTM D7136); B) Máquina Instron.

Os parâmetros que podem ser determinados a partir da(s) curva(s) de força de contacto (F_C) *versus* tempo (t) incluem: força F_1 (força de contacto registada na qual a curva força-tempo apresenta uma descontinuidade no declive, a força de contacto máxima $F_{\text{máx}}$. Com a força registada durante o tempo de contacto (T) é determinada a variação de energia de impacto, sendo depois realizado o gráfico da Figura 27. Retirando deste a energia absorvida E_a , a energia elástica E_e . Por terem espessuras diferentes os parâmetros de carga máxima e energia elástica (os mais relevantes) forma normalizados em relação à espessura, obtendo assim rácios. Após ser realizado o ensaio, é realizada uma análise do aspeto e visíveis danos da região do impacto, tendo por base a norma (Figura 27.B).

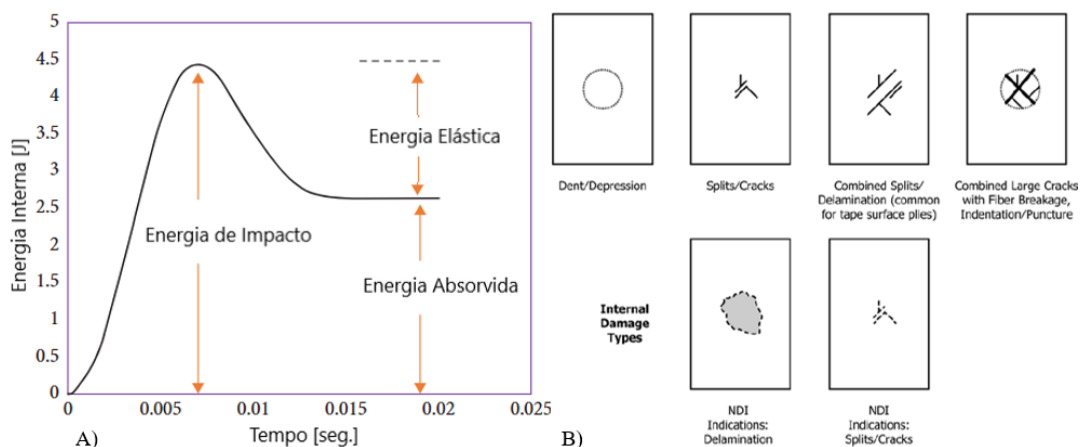


Figura 27 - Ensaio de Impacto – A) Gráfico das Energias (Dagne Shiferaw et al., 2025); B) Aspeto da região de impacto (ASTM D7136).

Mesmo existindo uma norma padrão ASTM (D7136), para os ensaios de impacto, muitos resultados de estudos mostram que o comportamento dos compósitos laminados, varia com a orientação das fibras, geometria do compósito, geometria do indentador, assim como com a energia de impacto (Qiu et al., 2014b). Com base nos artigos (Dagne Shiferaw et al., 2025) encontrados e na norma ASTM D7136, que apresenta as equações 5 e 6, foram estabelecidos os seguintes parâmetros e a energia (2,5J, 5J e 10J) (Tabela 6):

- Identador hemisférico com 10 mm de diâmetro;
- Massa de indentador (m_d) de 3,4kg;
- Altura (H) e Velocidade (v).

Tabela 6 - Parâmetros, para o ensaio de Impacto

Energia (E) [J]	Altura (H) [mm]	Velocidade de impacto (v) [m/s]
2,5	74,7	1,21
5	149	1,71
10	301	2,43

$$H = \frac{E}{9,81.m_d} \quad (5)$$

A energia nominal (E) com que o impactador embate no compósito laminado, é calculada através da equação 6.

$$E = \frac{1}{2} \cdot m_d \cdot v^2 \quad (6)$$

3.4.5 Ensaios térmicos

Foi utilizada uma máquina Hitachi STA7200 (Figura 28), para analisar a temperatura de fusão (T_f) das amostras assim como analisar a percentagem (em peso) do polímero e da FC, empregues nos provetes.



Figura 28 - Equipamento Hitachi STA7200.

Esta máquina permite realizar as análises termogravimétrica (TG) e a análise térmica diferencial (DTA). A TG é uma técnica de análise destrutiva na qual se monitoriza a variação da massa de uma amostra em função de temperatura, como fusão e transição de fase, sob atmosfera controlada. A DTA a temperatura de uma amostra é comparada com a de um material de referência, inerte, durante uma mudança programada de temperatura. Se ocorrer um evento endotérmico (absorve energia) na amostra, a temperatura da amostra ficará atrás da de referência e será observado um mínimo na curva. Se ocorrer um evento exotérmico (expele energia), a temperatura da amostra excederá a da referência e observar-se-á um máximo na curva. Com os provetes ensaiados, foi realizada a análise TG/DTA dos mesmos, com amostras dos provetes (1 – 7 mg). Estas análises foram realizadas à temperatura ambiente (+/- 29°C – 32°C) até alcançar os 550°C (velocidade de aquecimento de 10°C/min) utilizando cadinhos de alumina e atmosfera de azoto (200 ml/min), para evitar a ocorrência de reações de oxidação.

No fim de cada ensaio é possível observar a presença de fibras e resíduos no cadinho.

4 Resultados e Discussão

Este capítulo inclui os resultados e a discussão de todos os dados experimentais e analíticos efetuadas. Primeiramente serão apresentados os resultados da análise microscópica, seguida dos ensaios de flexão, tração e impacto, seguidos das análises termogravimétrica (TG) e térmica diferencial (DTA). Por fim é apresentada uma análise teórica utilizando as equações da teoria clássica dos laminados para calcular propriedades mecânicas elásticas do laminado.

4.1 Análise Microscópica

Neste capítulo vão ser apresentadas todos os pormenores visualizados através da microscopia, após o fabrico.

Numa abordagem geral, as Figura 29.A).B) e D) apresentam as superfícies de contacto do pré-preg com a chapa de alumínio, onde se pode observar que, na 1^a, 2^a e 4^a fornadas, existem bolhas nas zonas de sobreposição das FC com orientação de 0^a e 90^a. Este fenómeno pode resultar do facto das zonas de sobreposição das FC serem regiões propícias à acumulação de ar, especialmente num processo de fabrico com défice de vácuo. Observando as Figura 29.C) e E), correspondentes à 3^a e 5^a fornadas, pode-se constatar que a superfície de contacto com a chapa não apresenta bolhas, visto o vácuo se ter mantido até ao fim do processo de fabrico. Na superfície do laminado da Figura 29.F), é observada alguma rugosidade associada ao contacto do pré-preg com o *peel ply*, comum a todos os laminados fabricados.

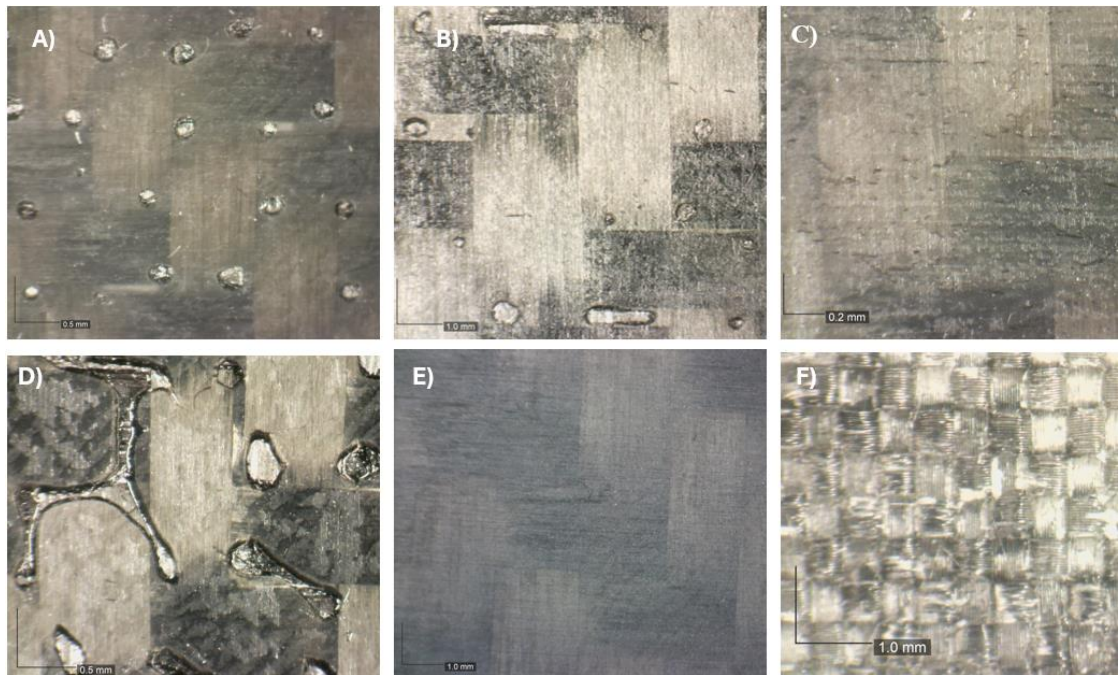


Figura 29 - Superfície de Contacto com a Chapa - A) 1ª fornada; B) 2ª Fornada; C) 3ª Fornada; D) 4ª Fornada; E) 5ª Fornada; F) Superfície de contacto do pré-preg com o peel ply.

Importa salientar que as espessuras obtidas pela microscopia não coincidem com as medições obtidas recorrendo ao micrómetro. A diferença surge devido ao processo de polimento com lixas e polideira que, ao provocar o arredondamento das extremidades dos provetes impediu uma correta e precisa medição da espessura através da microscopia.

4.1.1 Provetes de FCPA6

É primeiramente apresentada a análise microscópica dos laminados sem reforço interlaminar. Os provetes de FCPA6 aqui apresentados são da primeira fornada 1-S-3 (Figura 30), onde ocorreu perda de vácuo durante o fabrico e da terceira fornada 3-S-19 (Figura 31), onde o vácuo manteve-se até ao final do fabrico.

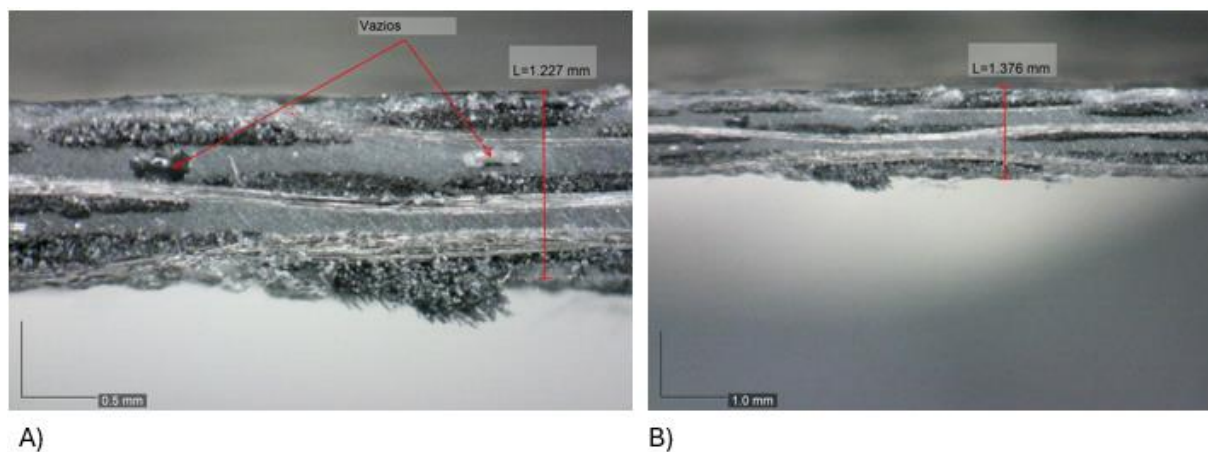


Figura 30 - Provete 1-S-3 de FCPA6 – A) barra de escala de 0,5 mm; B) barra de escala de 1 mm.

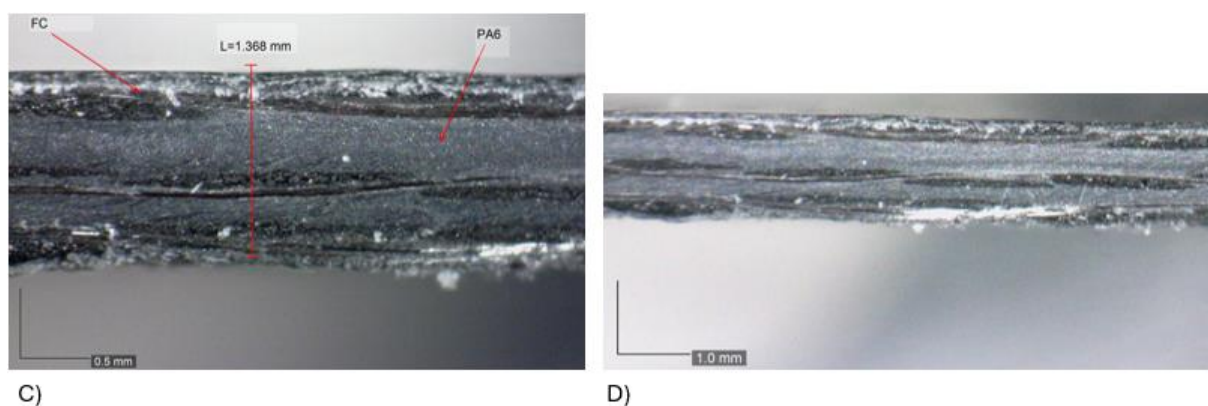


Figura 31 - Provete 3-S-19 de FCPA6 – C) barra de escala de 0,5 mm; D) barra de escala de 1 mm.

O provete 1-S-3 apresenta uma baixa adesão entre as FC, como se pode observar nas Figura 30A e B. Na zona correspondente ao PA6 (área cinzenta), são visíveis vazios. Para além destes, é também possível verificar que algumas FC não aparentam adesão total, como observado nas FC do provete 3-S-19 da Figura 31.

Como referido, o provete 3-S-19 aparenta ter uma excelente adesão entre lâminas, não sendo detetados quaisquer defeitos visíveis ao microscópio. No entanto, é importante referir a adesão da FC nos dois provetes pois ao observar-se a Figura 30.A, constata-se que a consolidação das FC não é ideal, ao contrário do que se verifica nas Figura 31.C e D, onde esta consolidação é significativamente melhor.

4.1.2 Provetes de FCPA6-HC

Apresenta-se de seguida a análise de microscopia ótica dos provetes com reforço de TPU FCPA6-HC, da 2^a, 4^a e 5^a fornadas, sendo estes os provetes 2-HC-90, 4-HC-24 e 5-HC-31. Foi ainda analisado o provete 4-HC-23, após ser sujeito a um ensaio de flexão, cuja imagem de microscopia ótica é apresentada em 4.2.1.

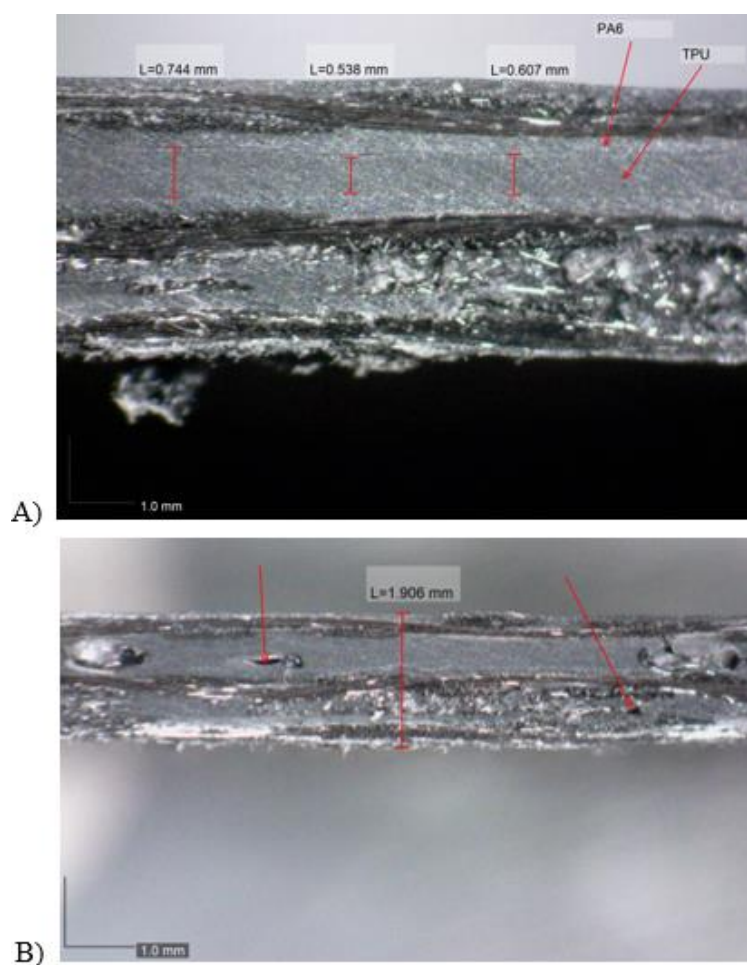


Figura 32 – Provede 2-HC-9 de FCPA6-HC - A) Identificação e espessura da camada de TPU; B) Identificação de defeitos e marcação da espessura do provede.

Na Figura 32.A, o provede 2-HC-9 apresenta características visuais idênticas às do provede 4-HC-24 (Figura 33) e do provede 5-HC-31 (Figura 34) pois nos três casos verifica-se que as camadas de reforço de TPU apresentam uma coloração escura no interior da PA6.

Ao analisar o TPU e a PA6, constata-se que estes apresentam baixa miscibilidade entre si uma vez que é visível uma separação clara entre a matriz e o reforço interlaminar. Já na Figura 32 B e na Figura 33, observam-se vazios na camada de TPU, sendo ainda evidente, no ponto A da Figura 33, uma ligação deficiente entre as FC, possivelmente causada por um vácuo insuficiente. A presença destes vazios no provete 4-HC-24, contribui para justificar o facto desta fornada ter apresentado uma espessura superior à média o que resulta do défice de vácuo a que a mesma esteve sujeita durante o processo de fabrico, o que é aliás comprovado pelas bolhas na superfície do provete (Figura 29.D)

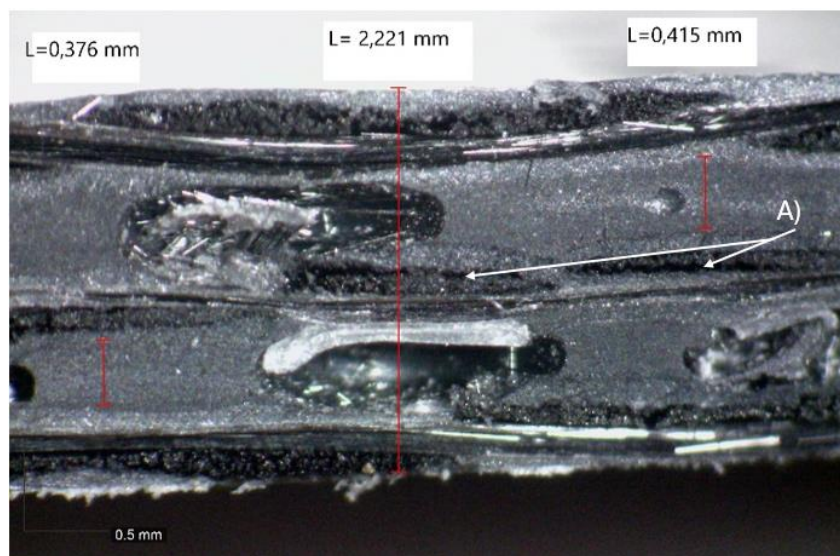


Figura 33 - Provete 4-HC-24 de FCPA6-HC – A) Região de delaminação entre FC e PA6.

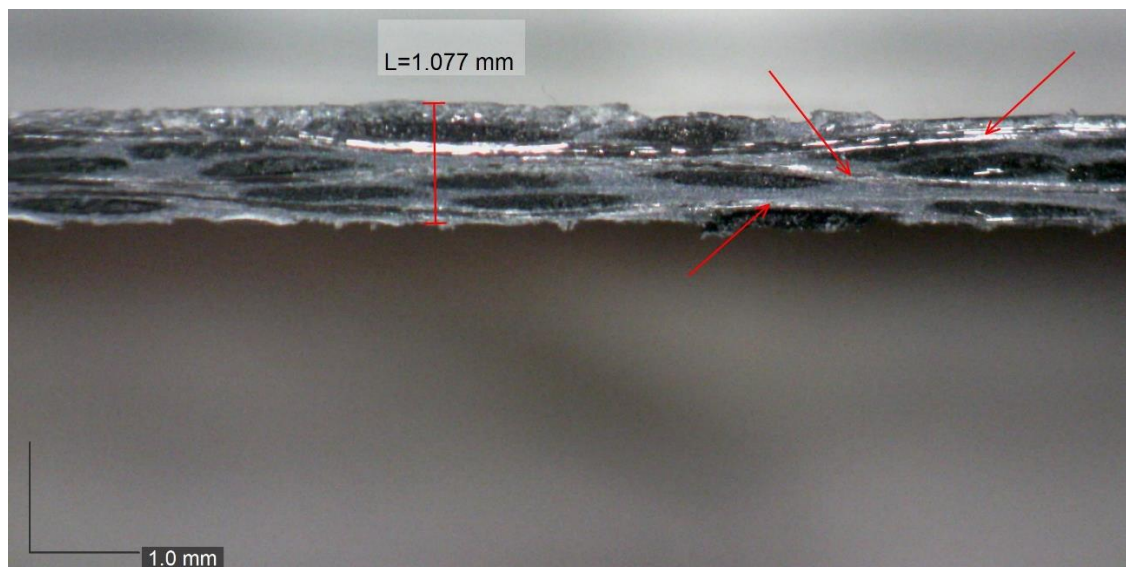


Figura 34 - Provete 5-HC-31 de FCPA6-HC – Identificação das FC.

4.2 Ensaio de Flexão

Neste capítulo será realizada uma análise superficial a olho desarmado dos provetes após o ensaio de flexão, sendo apresentados todos os defeitos e características observadas. Posteriormente são apresentados e analisados todos os dados obtidos através do ensaio.

4.2.1 Análise superficial após ensaio

A Tabela 7 apresentada os defeitos observados, o comportamento e o aspeto lateral, dos provetes após o ensaio de flexão. É essencial destacar que nenhum dos provetes ensaiados sofreu rotura catastrófica. Verificou-se ainda que, após remoção da carga aplicada, todos recuperaram quase totalmente o formato original. No entanto, os provetes: 1-S-1, 1-S-2, 1-S-3, 1-S-4 e 3-S-9 apresentaram uma ligeira deformação pós carga; 4-HC-22, 4-HC-23 e 4-HC-25 apresentaram deformação e delaminação; 2-HC-9, 2-HC-10, 2-HC-13 e 2-HC-14, apresentaram deformação, mas recuperaram mais que todos os outros.

Tabela 7 – Características (incluindo defeitos) dos provetes após os ensaios de flexão.

Amostra	Características
1-S-1	Este provete foi perdido
1-S-2	Apresenta rugosidade e delaminação na superfície do lado do peel ply, bem como alguma delaminação nas camadas superiores (comprimidas).
1-S-3	Apresenta rugosidade/delaminação na superfície do lado do peel ply, sem delaminação visível.
1-S-4	Apresenta rugosidade/delaminação das FC na superfície do peel ply, e alguma delaminação das camadas superiores (comprimidas).
3-S-19	Demonstra muita delaminação, a começar na região central e a progredir verticalmente, para as lâminas superiores. Mas a nível geral é a melhor amostra.
2-HC-9	Evidencia separação das FC, visível tanto na camada central como na camada superior. Apresenta rugosidade / delaminação das FC na superfície do lado do peel ply.
2-HC-10	Apresenta delaminação contínua até à lâmina central (falha vertical desde a superfície até o centro). Observa-se rugosidade/delaminação das FC na superfície do lado do peel ply, bem como delaminação entre a camada de FC e o TPU/PA6
2-HC-13	Apresenta rugosidade/delaminação das FC na superfície do lado do peel ply. A presença de uma bolha de ar, parece favorecer a delaminação
2-HC-14	Apresenta rugosidade/delaminação das FC na superfície do lado do peel ply. Verifica-se separação entre a FC da lâmina central, e a PA6/TPU.
4-HC-22 *	Apresenta rugosidade/delaminação das FC na superfície do lado da chapa. Observa-se uma falha vertical de delaminação, com início na lâmina central de FC.
4-HC-23	Apresenta rugosidade/delaminação das FC na superfície do lado do peel ply. A presença de bolhas parece favorecer a flexão do provete.
4-HC-25	Apresenta rugosidade/delaminação das FC na superfície do lado do peel ply. A presença de bolhas favorece a flexão do provete. Algumas FC aparentam não estar devidamente embebidas na matriz de PA6.

* Este provete foi ensaiado com a superfície do peel ply, virada para baixo, tendo, por isto, sido flexionado com a superfície da chapa, para cima, ao contrário do que aconteceu com os restantes provetes.

Com esta análise, conseguimos concluir que os provetes com reforço interlaminar HC apresentam melhor recuperação elástica que os provetes sem HC, sendo os melhores, os provetes 2-HC-9, 2-HC-10, 2-HC-13, 2-HC-14 e 3-S-19. A Figura 35 apresenta a imagem por microscopia ótica da secção lateral da amostra 4-HC-23 após o ensaio de flexão na região de contacto com o punção. É possível observar a presença de vazios na região correspondente ao TPU HC. A presença de vazios era expectável tendo em conta a espessura superior obtida. É também possível observar delaminação entre PA6 e conjuntos de FC (identificado na Figura 35). Na superfície inferior do provete, correspondente à zona de contacto com o *peel ply* e de aplicação de carga, é ainda visível a delaminação do laminado. Para além destes aspetos, destacam-se indícios de fraturas interlaminares e de fraturas verticais (intra-laminar) no conjunto das fibras (Figura 35 zona A)), possivelmente associadas a uma impregnação deficiente da matriz polimérica de PA6. Pode-se ainda observar a quebra localizada de fibras na zona A.

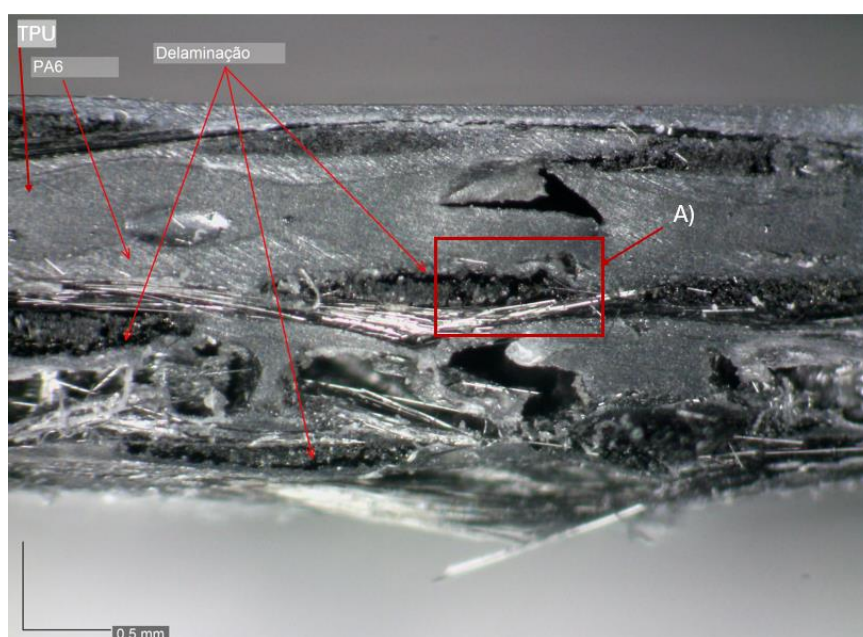


Figura 35 - Imagem de microscópica ótica da amostra 4-HC-23, após o ensaio de flexão - A) região de fratura Intra-laminar.

4.2.2 Resposta Mecânica à Flexão

Como referido na metodologia, a partir dos ensaios experimentais de resposta mecânica à flexão realizados aos vários tipos de provetes fabricados foi registada a carga e o deslocamento (Figura 36.A). A partir destes valores, foi possível calcular a tensão e a extensão (Figura 36.B). Do gráfico tensão-extensão obteve-se ainda a curva, correspondente à rigidez em flexão.

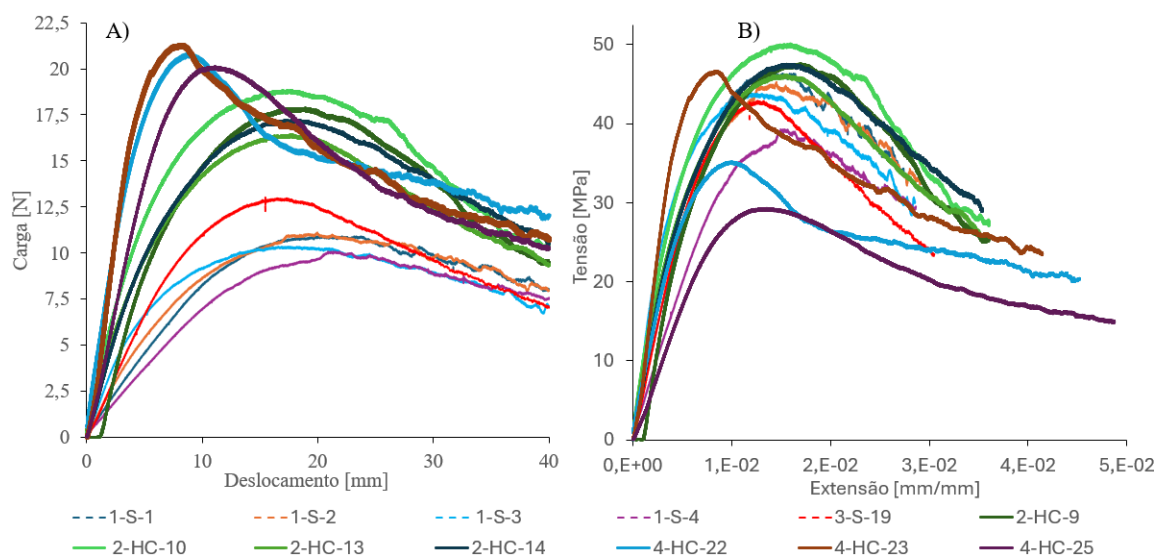


Figura 36 - Ensaio Flexão – A) Gráfico Carga Deslocamento; B) Gráfico Tensão vs Extensão.

A análise dos gráficos das Figura 37, evidenciou que as fornadas reforçadas com HC, apresentam, em média, uma carga máxima 41,3% superior à registada nas fornadas sem HC. A amostra 4-HC-23 apresentou a carga máxima mais elevada (21,33 N), correspondente a um deslocamento à flexão de 8,3 mm. Consegue-se ainda constatar que das fornadas sem TPU, a 3ª fornada (3-S-19), apresenta uma carga máxima de 13,03 N que é 17,3% superior à carga máxima do provete 1-S-2 (11,11 N).

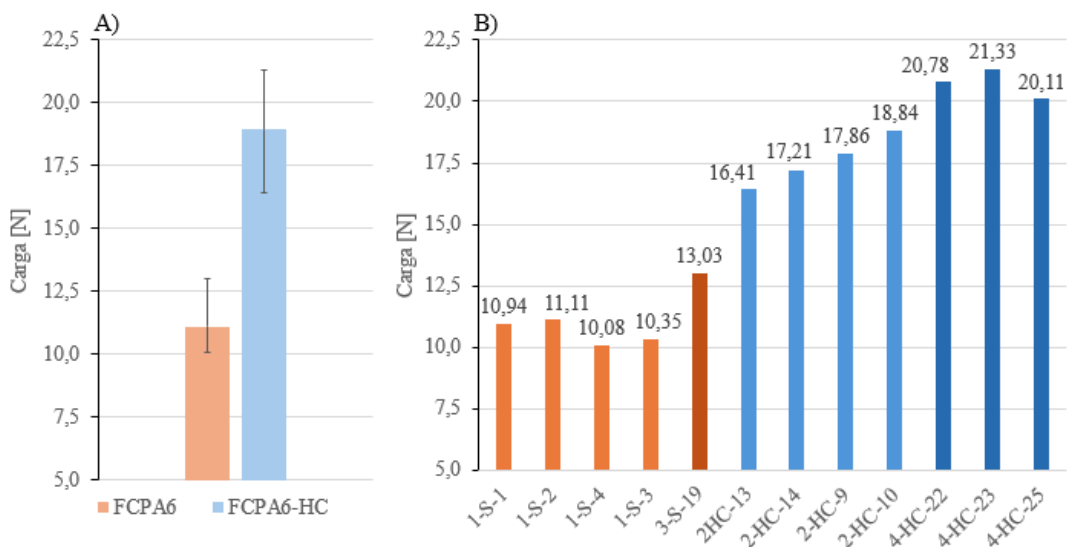


Figura 37 - Ensaio de flexão - cargas máximas - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) Resultados por provete

Relativamente, à rigidez à flexão (Figura 38), analisando os provetes reforçados com HC, a 4ª fornada (4-HC-22; 4-HC-23 e 4-HC-25) apresenta a maior rigidez à flexão, sendo, em média, 77% superior à da 2ª fornada, embora com maior variação entre provetes (54%). As fornadas sem HC, apresentam uma rigidez à flexão 63% inferior à das fornadas com HC. Na 1ª fornada, as curvas mostram-se bastante semelhantes entre si, mas com menor consistência, existindo uma variação de 42%, entre o máximo (1-S-3) e o mínimo (1-S-4).

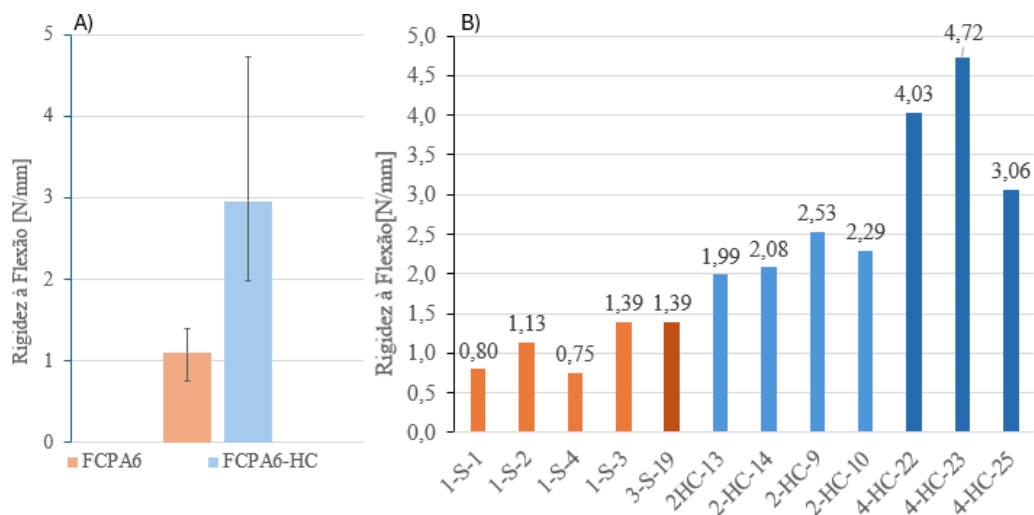


Figura 38 - Ensaio flexão - rigidez à flexão - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) Resultados por provete

A análise das tensões máximas em flexão (Figura 39), revelou que a 4ª fornada apresenta tensões de flexão mais baixas, consequência das elevadas variações de espessura entre as amostras. No entanto, desta fornada, a amostra 4-HC-23, apresenta uma tensão de flexão 37,3%, superior à amostra 4-HC-25, evidenciando o impacto direto da espessura na performance mecânica. Conseguiu-se observar que as amostras sem HC, apresentaram uma tensão de flexão média 0,91% superior às amostras com HC. Ainda assim, as tensões máximas observadas nas amostras com HC são, em média, 7,15% superiores às registadas nas amostras sem HC, se só contabilizarmos a 2ª fornada. Estes dados permitem concluir que, caso o processo de fabrico seja realizado sob vácuo total, minimizando variações de espessura, o reforço com HC poderá proporcionar um desempenho mecânico superior.

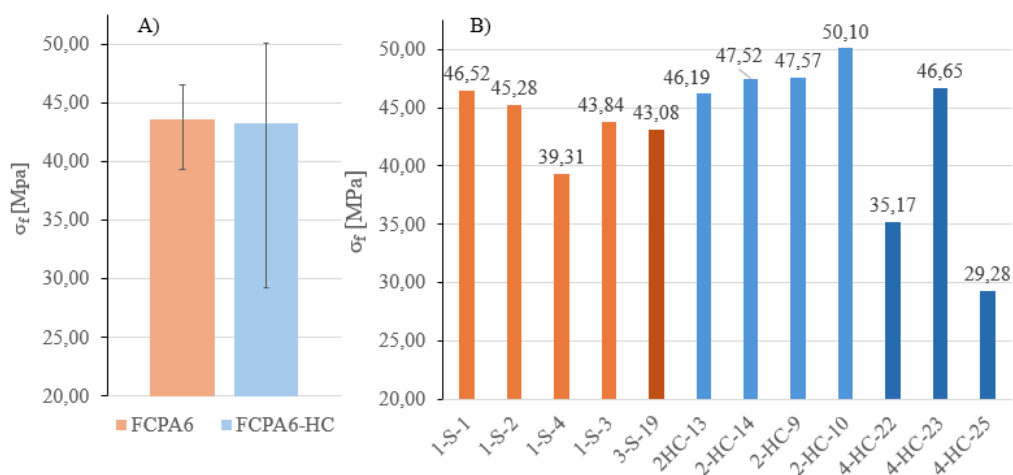


Figura 39 - Ensaio de flexão - Tensão máxima - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) Resultados por provete

Com base nos resultados do módulo de flexão da Figura 40, verifica-se que existe uma tendência inversa com a espessura do laminado: Como exemplo, a amostra 4-HC-25, tem uma espessura média de 2,03 mm, mas apresenta o menor módulo de flexão (3,66 GPa). Já no caso da amostra 4-HC-23 com uma espessura média de 1,73 mm apresenta 9,97 GPa, sendo 172% maior que o módulo de flexão da amostra 4-HC-25. Outro exemplo que pode ser analisado é a amostra 1-S-3, que apresenta o módulo de flexão mais elevado das amostras de FCPA6, com espessura média mais baixa (1,19 mm).

Comparando o módulo de flexão das amostras FCPA6 e FCPA6-HC, conseguimos constatar que as FCPA6-HC apresentam, em média, um módulo de flexão 11,2% superior. Este resultado sugere que a incorporação de TPU não só mantém a integridade estrutural (maior rigidez e menor capacidade de deformação), mas também contribui para o aumento da rigidez do laminado, o que pode ser vantajoso em aplicações que exigem elevada resistência à flexão e menor deformabilidade. Embora o TPU seja conhecido pela sua elasticidade, resiliência e capacidade de absorção de impacto, neste caso atua como reforço adicional, melhorando a transferência de tensões.

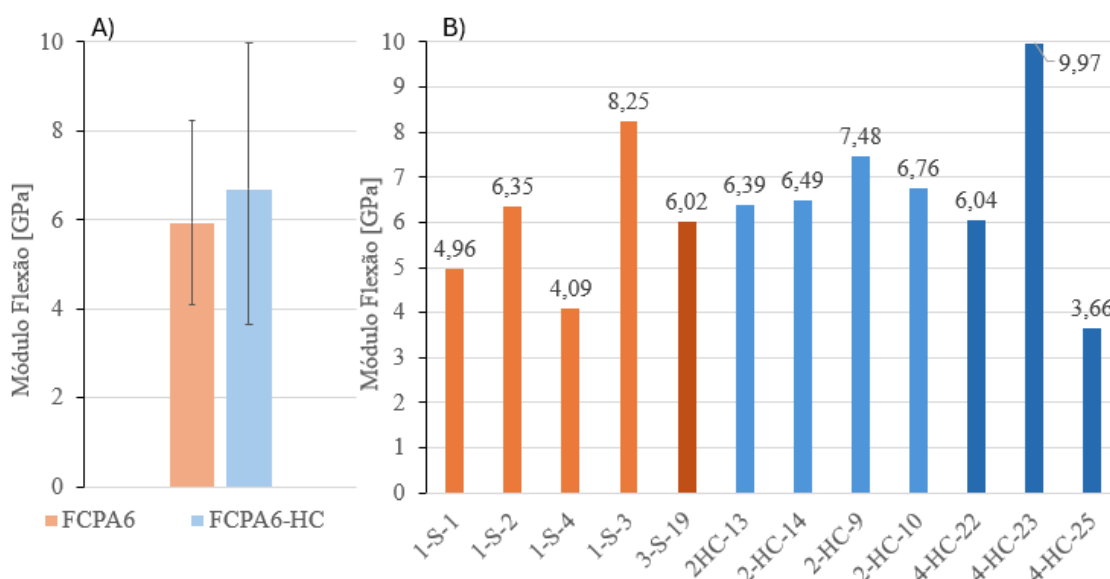


Figura 40 - Ensaio de flexão - Módulo de Flexão Máxima - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) Resultados por provete

4.2.3 Análise dos resultados

O ensaio de flexão evidenciou que as fornadas reforçadas com HC apresentaram, em média, uma carga máxima 41,3% superior às fornadas sem HC, destacando-se a 4ª fornada, cujas amostras atingiram valores mais elevados. Analisando as fornadas sem TPU, a 3ª revelou melhor desempenho face à 1ª, no entanto importa salientar que só foi ensaiado um provete da 3ª fornada. Quanto à rigidez à flexão, a 4ª fornada apresentou valores médios 77% superiores aos da 2ª, embora com elevada dispersão entre provetes.

A nível geral, as fornadas sem HC revelaram uma rigidez à flexão 63% inferior às reforçadas.

No que diz respeito à tensão de flexão máxima, os resultados mostram que, embora exista grande variação entre amostras (devido à variação da espessura), as fornadas com HC apresentaram, em média, tensões de flexão 7,15% superiores às sem HC, quando consideradas apenas as amostras da 2ª fornada. Estes resultados sugerem que a manutenção do vácuo ao longo de todo o processo de cura do laminado reduziria a variação dimensional entre os provetes das diferentes fornadas e consequentemente o seu desempenho mecânico, evidenciando assim o efeito positivo do HC. A análise do módulo à flexão dos diferentes provetes, demonstrou uma relação inversa com a espessura dos mesmos: provetes mais finos apresentam módulos mais elevados.

4.3 Ensaio Tração

Neste capítulo, começa-se por descrever as condições pós-rotura, assim como a identificação dos modos de rotura, sendo de seguida apresentados e discutidos os dados experimentais obtidos nos ensaios de tração com recurso a gráficos. Importa, contudo, salientar que o provete 5-HC-29 sofreu deslizamento quando tracionado, registando uma extensão superior à das restantes amostras, tendo apenas sido utilizado na análise dos dados da tensão máxima e do módulo de Young.

4.3.1 Pós Rotura

Analisando os provetes apresentados na Figura 41, após a realização dos ensaios de tração, foi possível identificar e discutir a região típica de rotura, de acordo com a norma ASTM D3039.

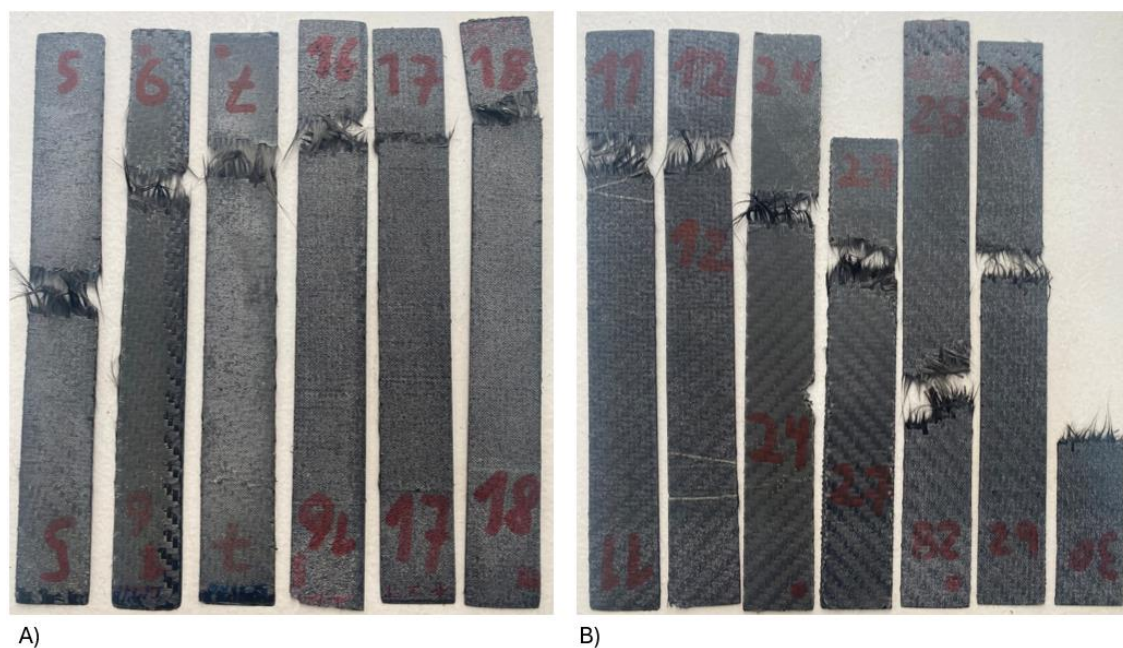


Figura 41 - Provetes de tração pós rutura - A) FCPA6; B) FCPA6-HC

Com base na Figura 41.A conclui-se que cinco dos seis provetes apresentam rutura do tipo LAT (*Lateral At grip/tab Top*), sendo o provete 1-S-5 (5 na figura) do tipo LGM (*Lateral Gage Middle*). Dos cinco provetes com LAT os 3-S-16; 3-S-17 e 3-S-18 (16, 17 e 18 na figura) apresentam início de rutura na parte inferior do provete.

Observando agora a Figura 41.B, verifica-se que os provetes 2-HC-11; 2-HC-12; 4-HC-24 e 4-HC-27 (11, 12, 24 e 27 na figura), são do tipo LAT, enquanto os provetes 5-HC-29 e 5-HC-30 (29 e 30 na figura) correspondem ao tipo LGM. O provete 5-HC-28 (28 na figura), apresenta uma rutura em ângulo, do tipo AGM (*Angled Gage Middle*), sendo visível a delaminação entre as fibras, acompanhada pela rutura das camadas.

4.3.2 Resposta Mecânica à Tração

Como referido na metodologia, a partir dos ensaios experimentais foi registada a carga e o deslocamento (Figura 42.B). A partir destes valores, foi possível calcular a tensão e a extensão (Figura 42.A). Do gráfico tensão-extensão foi ainda possível determinar o módulo de Young (ou módulo de elasticidade).

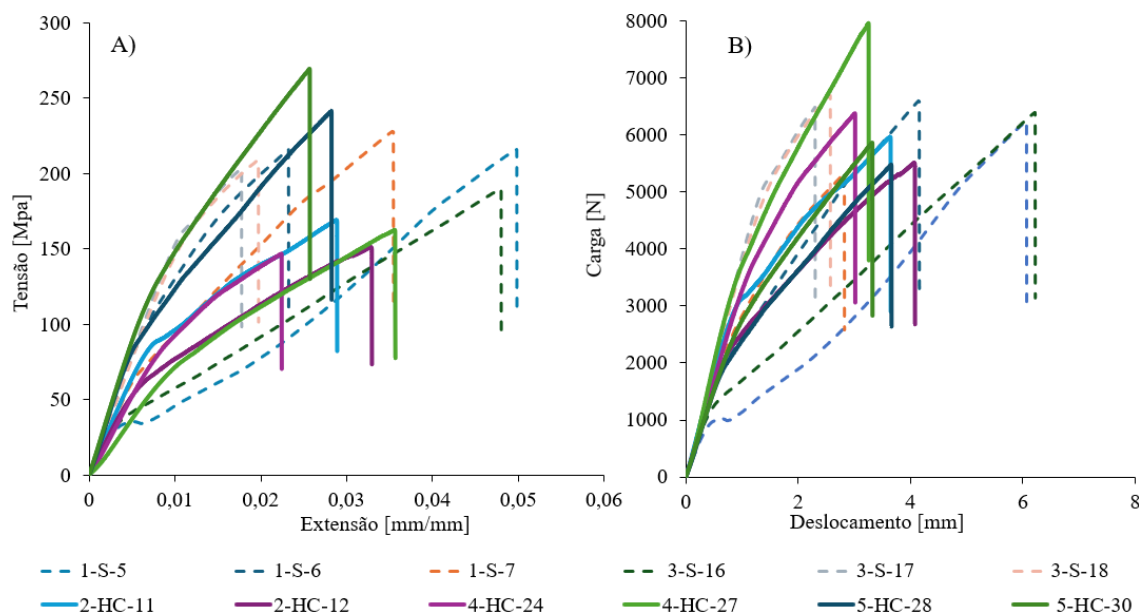


Figura 42 - Ensaio de tração - A); Gráfico Tensão vs Extensão; B) Gráfico Carga vs Deslocamento

De forma geral, as amostras sem HC (linhas a tracejado na legenda do gráfico) apresentam uma tensão máxima à rotura 3,12% superior à das amostras com HC (linhas a cheio no gráfico). Ao analisar a Figura 43 em detalhe, verifica-se que as amostras 2-HC-11; 2-HC-12; 4-HC-24 e 4-HC-28 pertencem a fornadas que, conforme identificado no capítulo 4.1.2, apresentam defeitos, tais como, bolhas e aparente falta de adesão entre a PA6 e a FC, além de exibirem uma variação significativa de espessura entre amostras. A presença destes defeitos e variações, pode justificar o facto da média da tensão máxima da 2ª e 4ª fornada ser, respetivamente, 66% e 71% inferior à registada na 5ª fornada.

Observa-se ainda que as amostras da 5ª fornada (5-HC-28, 5-HC-29 e 5-HC30), registaram os valores mais elevados de tensão máxima à tração, evidenciando que, quando o vácuo se mantém ao longo da cura do laminado, é possível obter melhorias na resistência à tração.

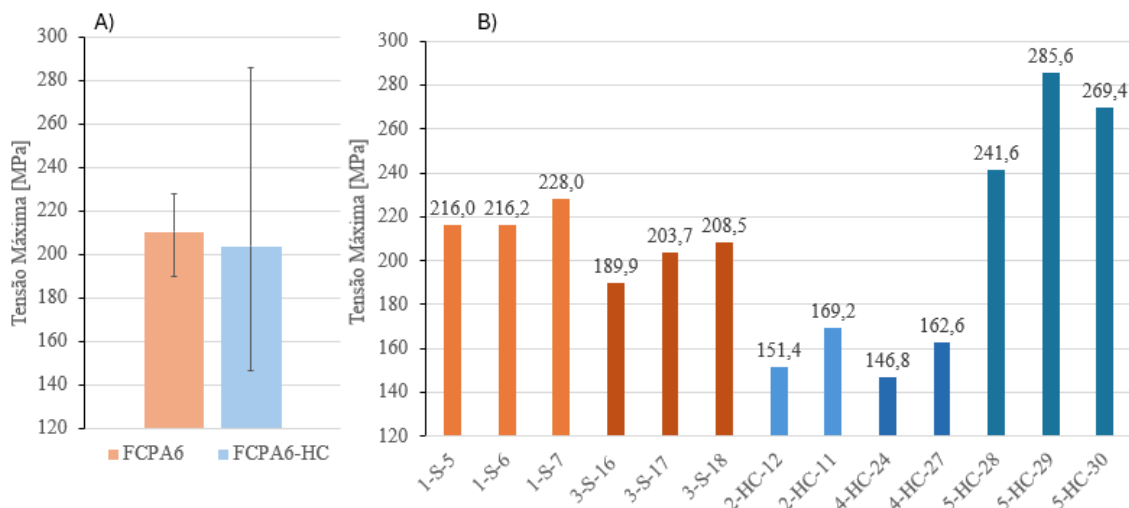


Figura 43 - Ensaio de Tração - Gráfico da Tensão máxima - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) Resultados por provete

Na Figura 44 verifica-se que, de forma geral, a presença de HC (espessura média de 0,0029 mm face a 0,0032 nos sem HC) não apresentam um claro aumento da capacidade de deformação do laminado, sendo possível observar que as amostras sem HC apresentam em média 10,4% maior capacidade de deformação.

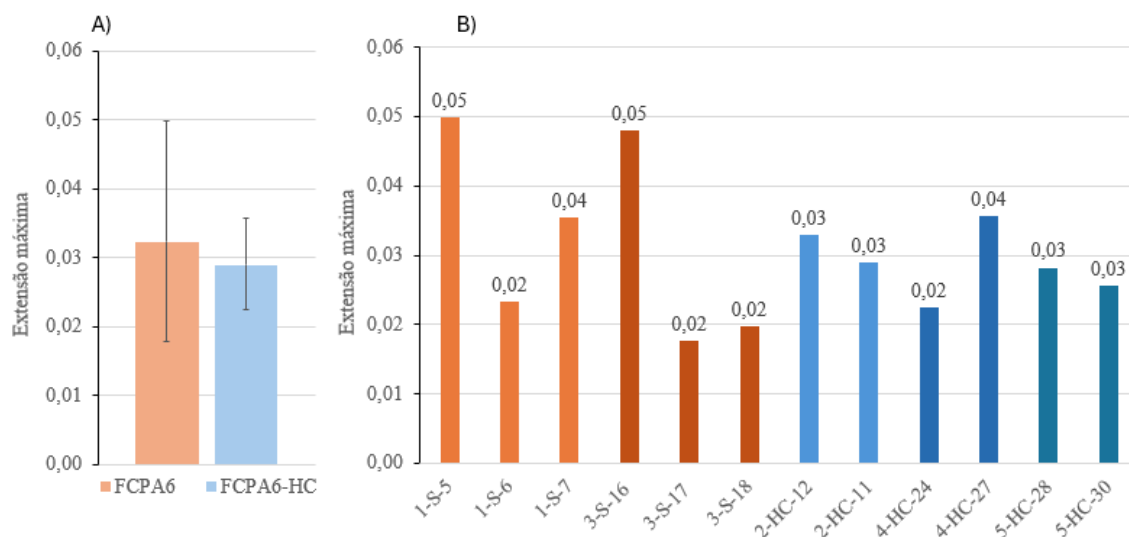


Figura 44 - Ensaio de Tração - Gráfico da Extensão máxima - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) Resultados por provete

O gráfico da Figura 45 mostra que as fornadas reforçadas com HC, apresentam um módulo de *Young* 2,15% superior às amostras sem HC. Analisando as amostras com TPU - HC pode-se constatar que a melhor fornada é a 5ª, apresentando um *E*, em média, 59,6% superior ao das amostras da 4ª fornada. Esta variação abrupta pode ser devida à presença de defeitos ou vazios na união entre a PA6 e o TPU e entre as FC e a PA6. Constata-se ainda que as amostras da 4ª fornada são menos rígidas e mais deformáveis que qualquer uma das amostras sem HC.

Pode ainda observar-se que, tanto as amostras da 3ª fornada (3-S-17 e 3-S-18) como as da 1ª fornada (1-S-5, 1-S-6 e 1-S-7), apresentam valores de *E* não muito diferentes, indicando que, a nível geral, os processos de fabrico decorreram de forma semelhante.

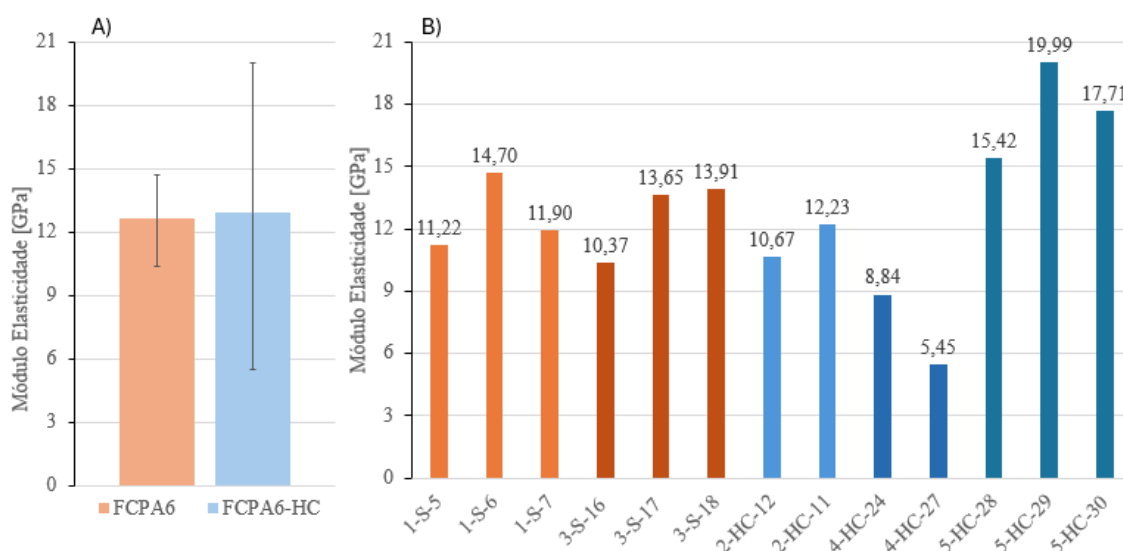


Figura 45 - Ensaio de Tração - Módulo de Elasticidade - A) Média de provetes FCPA6 e FCPA6-HC; B) resultados por provete

Para além destas observações, verifica-se que a espessura do laminado exerce influência no valor de *E* (Figura 45). A amostra 5-HC-29, com a menor espessura (0,89 mm), apresenta o valor de *E* 266%, mais elevado que a amostra 4-HC-27, com a maior espessura (1,97 mm), sendo esta a amostra com o valor mais baixo de *E*. Isto deve-se ao facto de o módulo de elasticidade ser o declive da curva tensão vs extensão na região elástica, do gráfico e da tensão ser dependente da espessura dos provetes.

4.3.3 Análise dos resultados

A análise dos resultados dos ensaios de tração evidenciou que a presença de HC melhorou o módulo de elasticidade e a tensão máxima, tendo apresentado uma redução na extensão. O módulo de elasticidade revelou-se superior nas amostras com HC da 5ª fornada, atingindo valores 59,6% superiores aos da 4ª fornada, que apresentou defeitos de fabrico, como bolhas e má adesão entre PA6/TPU e FC. Já as amostras sem HC das fornadas 1 e 3 evidenciaram boa consistência nos valores de E, refletindo um fabrico mais estável.

Quanto à tensão máxima, os provetes sem HC registaram em média, valores 3,12% superiores, embora os melhores resultados tenham sido obtidos para a 5ª fornada (com HC), confirmando que a manutenção do vácuo ao longo da cura do laminado melhora a resistência à tração dos provetes.

Na extensão máxima, verificou-se menor capacidade de deformação nos provetes com HC, demonstrando uma redução da flexibilidade em cerca de 10,4%. Em síntese, os resultados demonstraram que a adição de HC melhora o desempenho mecânico global, aumentando a rigidez à tração e o módulo de elasticidade do laminado, mas à custa da redução da sua flexibilidade.

4.4 Ensaio Impacto

Neste capítulo, começa-se por descrever as condições pós-impacto, assim como a identificação da zona de impacto, sendo de seguida apresentados e discutidos os dados experimentais com recurso a gráficos.

4.4.1 Pós Impacto

Analizando os provetes apresentados na Figura 46, após a realização dos ensaios de impacto, foi possível identificar e discutir as regiões de impacto a diferentes níveis de energia aplicada.

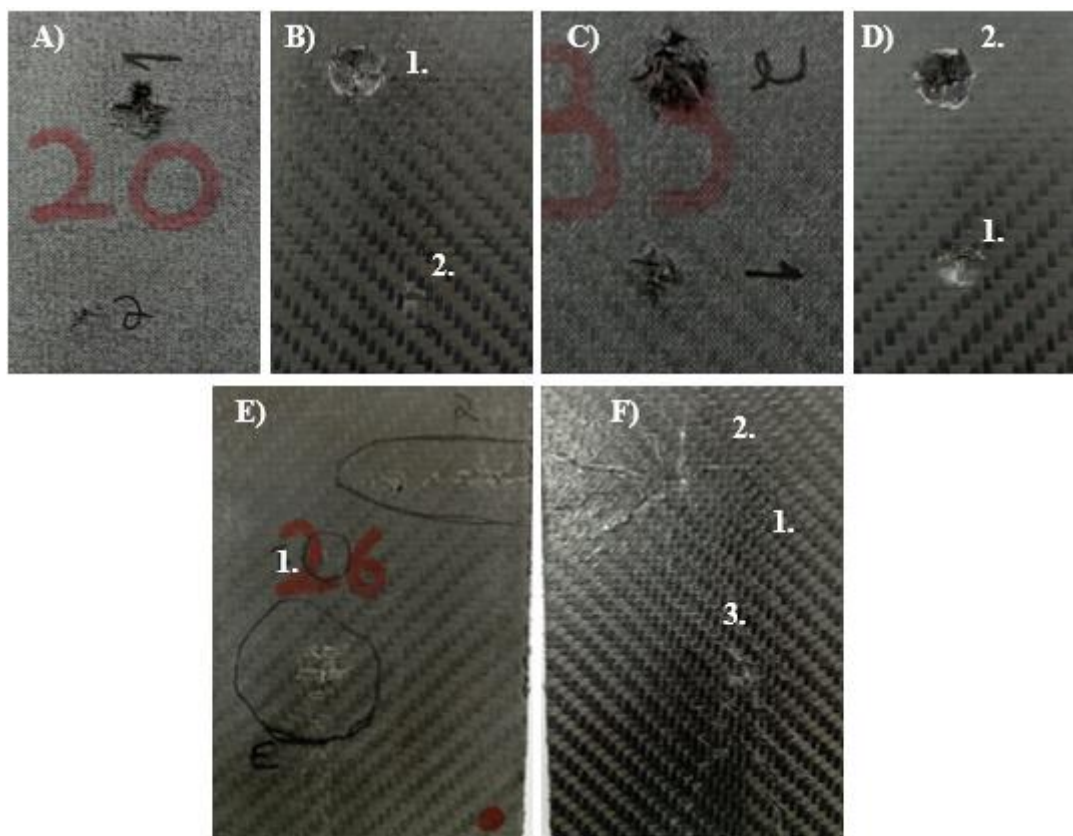


Figura 46 - Ensaio de Impacto - Vista do dano na superfície do laminado - A) Provete 3-S-20, vista oposta; B) Provete 3-S-20, vista de impacto (1. 10J; 2. 2,5J); C) Provete 5-HC-33, vista oposta; D) Provete 5-HC-33, vista de impacto (1. 2,5J; 2. 5J); E) Provete 4 HC-26, vista oposta; F) Provete 4-HC-26, vista de impacto (1. 2,5J; 2. 5J; 3. 10J).

Para uma energia de 2,5J, o provete 3-S-20 apresentou uma indentação superficial, tendo ocorrido fratura de fibras na face oposta (Figura 46.A2). No provete 5-HC-33, observou-se a quebra de FC e fratura localizada da superfície de PA6 (Figura 46.D1). Entre os três provetes testados a uma energia de 2,5J, o provete 4-HC-26, apresentou o melhor desempenho (fruto da espessura elevada), não evidenciando qualquer defeito visível na superfície de impacto (Figura 46.F).

Para uma energia de 5J o provete 5-HC-33 foi perfurado, apresentando fratura total das FC, na face oposta (Figura 46.C2), e um orifício com o diâmetro do indentador na superfície de impacto (Figura 46.D2)). No provete 4-HC-26, foram observadas linhas de delaminação centradas no ponto de impacto (Figura 46.F2), bem como indícios de delaminação na face oposta (Figura 46.E2).

Com uma energia de 10J o provete 4-HC-26 sofreu danos internos significativos, visíveis em ambas as faces, incluindo delaminação (Figura 46.E3) e F2) e fraturas das FC, para além da propagação das linhas de delaminação já registadas a 5J. Por sua vez, o provete 3-S-20 foi totalmente perfurado, com a fratura extensiva das FC, observada em ambas as faces (Figura 46.A1 e B1).

4.4.2 Resposta Mecânica ao Impacto

Como referido na metodologia (capítulo 3.4.4), dos ensaios de impacto foi registado o tempo de contacto, a carga (Figura 47.A)), deslocamento, energia de impacto (Figura 47.B) e velocidade. A partir destes, foi selecionado e obtido o tempo de contacto total, carga máxima, deslocamento máximo, energia elástica e absorvida (obtidas através da energia patamar).

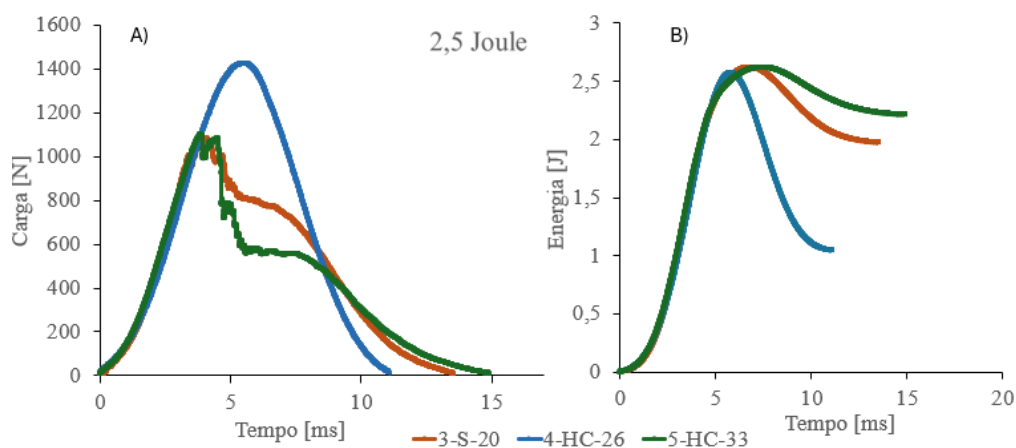


Figura 47 - Ensaio de Impacto - 2,5J - A) Gráfico Carga vs Tempo; B) Gráfico Energia vs Tempo.

Tabela 8 – Ensaio Impacto – 2,5J – Resultados experimentais.

Provetes	Tempo Contacto [ms]	Carga Máxima [N]	Energia Elástica (E_e) [%]	Rácios	
				Carga máxima/Espessura [N/mm]	E_e /Espessura [J/mm]
3-S-20	13,6	1085,7	25	872	0,20
4-HC-26	11,1	1426,8	59	652	0,27
5-HC-33	14,9	1099,5	16	1221	0,17

Analisando os resultados obtidos, para uma energia de impacto de 2,5 joules, e considerando que, quanto maior a energia elástica (Tabela 8), menor será o dano, verifica-se que a espessura do laminado volta a assumir um papel determinante. O provete 4-HC-26 apresentou uma energia elástica de 59%, sendo significativamente superior à registada pelos provetes 3-S-20 e 5-HC-33. Estes resultados indicam que o provete 4-HC-26 sofreu menos danos para a mesma energia de impacto, seguido pelo provete 3-S-20 enquanto o provete 5-HC-33, foi o mais afetado. Adicionalmente, analisando o rácio da E_e /Espessura, indicador direto da capacidade de resistência ao impacto, verifica-se que o provete 4-HC-26 apresentou o melhor desempenho (0,27 J/mm), seguido pelos provetes 3-S-20 (0,20 J/mm) e 5-HC 33 (0,17 J/mm). Por sua vez, no rácio da Carga máxima/Espessura, o provete 4-HC-26, registou o valor mais reduzido (652 N/mm), correspondendo a menos 34% e 87% em relação aos provetes 3-S-20 e 5-HC-33, respetivamente.

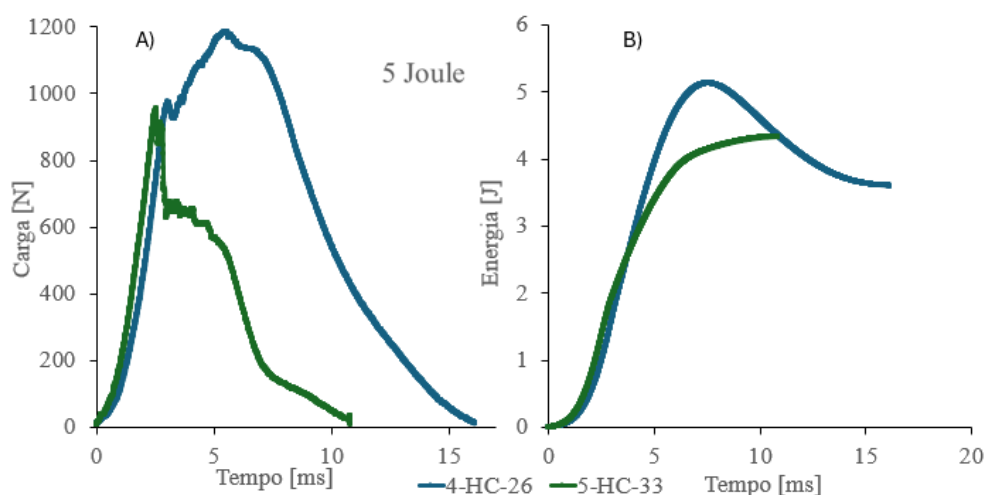


Figura 48 - Ensaio de Impacto - 5J - A) Gráfico Carga vs Tempo; B) Gráfico Energia vs Tempo.

Tabela 9 – Ensaio Impacto – 5J – Resultados experimentais.

Provetes	Tempo Contacto [ms]	Carga Máxima [N]	Energia Elástica (E_e) [%]	Rácios	
				Carga máxima/Espessura [N/mm]	E_e /Espessura [J/mm]
4-HC-26	16,1	1183,2	30	540	0,14
5-HC-33	10,8	953,3	-	1059	-

Analisando os resultados obtidos, para uma energia de impacto de 5 joules, o provete 4-HC-26 apresentou novamente uma maior dissipação energética apresentando uma energia elástica de 30% relativamente à energia de impacto. Estes resultados indicam que o provete 4-HC-26 sofreu menos danos em relação ao provete 5-HC-33, que apresentou perfuração (comprovado pelo valor negativo da energia elástica, -0,9%). Adicionalmente, analisando o rácio da E_e /Espessura, indicador direto da capacidade de resistência ao impacto, verifica-se que o provete 4-HC-26 apresentou o melhor desempenho (0,14 J/mm - uma diminuição de 13% em relação ao ensaio com 2,5J de energia), com o provete 5-HC 33 (-0,01 J/mm) a demonstrar perfuração, também observado na Figura 48.B), com o cessar abrupto da energia. Por sua vez, no rácio da Carga máxima/Espessura, o provete 4-HC-26, registou o valor mais reduzido (540 N/mm), correspondendo a menos 96% em relação ao provete 5-HC-33 (1059N/mm).

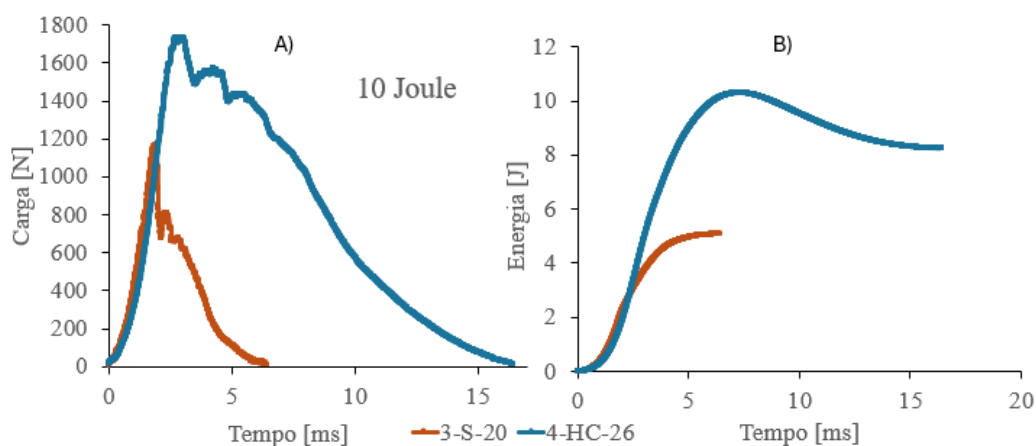


Figura 49 - Ensaio de Impacto - 10J - A) Gráfico Carga vs Tempo; B) Gráfico Energia vs Tempo.

Tabela 10 - Ensaio Impacto – 10J – Resultados experimentais.

Provetes	Tempo Contacto [ms]	Carga Máxima [N]	Energia Elástica (E_e) [%]	Rácios	
				Carga máxima/Espessura [N/mm]	E_e /Espessura [J/mm]
4-HC-26	16,4	1734,2	20	792	0,09
3-S-20	6,4	1169,4	0,03	940	0,0003

Analisando os resultados obtidos para uma energia de impacto de 10 joules, o provete 4-HC-26 apresentou uma energia elástica de 20%, sendo 99% superior à registada pelo provete 3-S-20 (0,03%). Estes resultados indicam que o provete 4-HC-26 sofreu menos danos em relação ao provete 3-S-20. Adicionalmente, analisando o rácio da E_e /Espessura, verifica-se que o provete 4-HC-26 apresentou o melhor desempenho (0,09 J/mm - uma diminuição de 5% em relação ao ensaio com 5J de energia), com o provete 3-S-20 (0,0003 J/mm) a transitar, para a perfuração, também observado na Figura 49.B, com o cessar abrupto da energia. Por sua vez, no rácio da Carga máxima/Espessura, o provete 4-HC-26, registou o valor mais reduzido (792 N/mm), correspondendo a menos 19% em relação ao provete 3-S-20 (940N/mm).

4.4.3 Análise dos resultados

Para a energia de 2,5J o provete 4-HC-26 demonstrou o melhor desempenho, evidenciado por um rácio de Carga/Espessura significativamente inferior aos restantes, seguido pelo provete 3-S-20 e, por fim, o 5-HC-33. Este comportamento sugere que uma espessura mais elevada contribui, para uma capacidade superior de absorção de energia, sendo validado pelo aspeto pós-impacto, onde o provete 4-HC-26 não apresentou danos visíveis. Esta tendência manteve-se nos ensaios com energias superiores, com o provete 4-HC-26 a destacar-se consistentemente como o mais resistente ao impacto. Em todos os casos apresentou os rácios de Carga máxima/Espessura mais baixos e os rácios da E_e /Espessura mais elevados, indicador direto da sua capacidade de resistência ao impacto. O provete 3-S-20 revelou-se o segundo mais eficaz, enquanto 5-HC-33 foi o mais vulnerável, evidenciando sinais de perfuração nos ensaios com 5J de energia.

Esta conclusão é validada pela aparência após o impacto, com o provete 4-HC-26 a não apresentar danos para uma energia de 2,5J. Sendo depois visível delaminação nas faces do provete para energias de impacto de 5 e de 10J, características que podem ser associadas aos defeitos de fabrico, como bolhas e má adesão entre PA6/TPU e FC, observados na Figura 33.

4.5 Análise Termogravimétrica (TG) / Análise térmica diferencial (DTA)

No âmbito deste trabalho, a técnica TG foi utilizada para determinar a quantidade de polímero (PA6) e de FC presentes nos provetes de FCPA e a quantidade de FC, PA6 e TPU-HC presentes nos provetes de FCPA6-HC, permitindo assim determinar as percentagens reais, do PA6, TPU e fibras (FC) presentes nos provetes. O objetivo do referido ensaio foi degradar a matriz polimérica das amostras e comparar os resultados obtidos com os previstos e relacioná-los com o comportamento dos diferentes materiais presentes nos provetes fabricados. As amostras testadas foram as seguintes: 3-S-16; 4-HC-24; 5-HC-30 e PA6 antes da cura. Importa ainda referir que foram realizadas duas repetições, para as amostras 5-HC-30 (T1 e T2), assim como para a PA6 (T1 e T2).

4.5.1 Análise TG

Na Figura 50 são apresentadas as curvas TG referentes aos provetes analisados. É possível observar que nas amostras de FCPA6-HC o provete 4-HC-24, perdeu aproximadamente 59% da sua massa, enquanto a amostra do provete 5-HC-30-T1 perdeu apenas 42%. Isto quer dizer que 41% do laminado, da 4ª fornada, é FC e 59% é PA6 e TPU. Já na 5ª fornada, 58% é FC e 42% é PA6 e TPU. Devido à espessura e à qualidade da 5ª fornada, foi testada uma segunda amostra (5-HC-30-T2), para a qual se obteve 54% FC e 46% de PA6 e TPU. Comparando os valores da percentagem mássica das amostras da 5ª fornada com a amostra 4-HC-24, verificamos que existe uma diferença em torno de 17% na percentagem final, esta variação pode eventualmente estar associada à menor espessura das camadas impressas de HC da 5ª fornada. Seguindo a mesma metodologia de análise, pode-se observar que na 3ª fornada, só de FCPA6, existe 71,5% de FC e 28,5% de PA6. Esta percentagem de PA6, pode justificar a delaminação ocorrida nos provetes submetidos ao ensaio de flexão, pois o laminado apresentava menor quantidade de matriz de PA6, essencial para a união das FC.

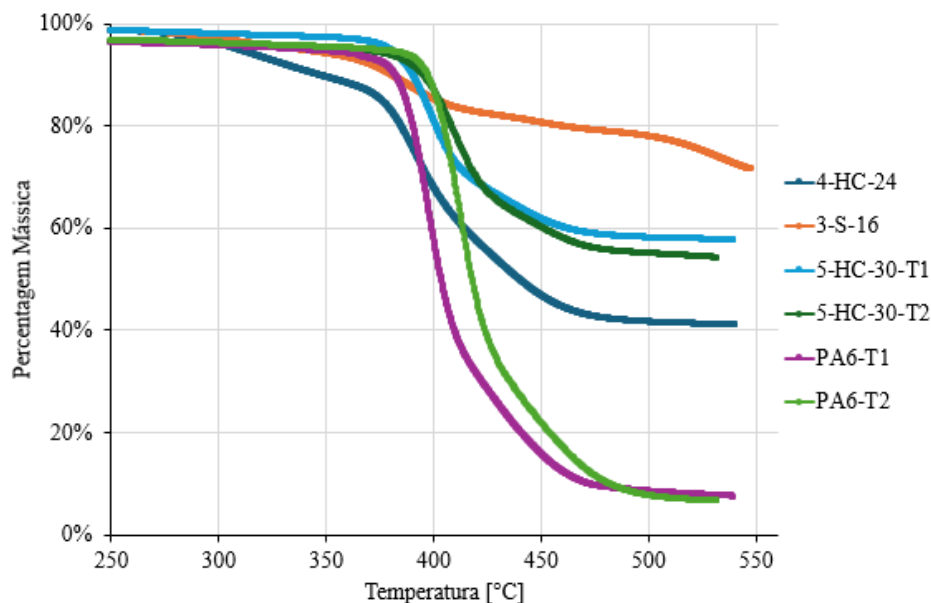


Figura 50 - Curva TG - Percentagem mássica das amostras em função da temperatura.

A amostra do provete 4-HC-24 (Figura 50), inicia a degradação da PA6 em torno dos 300°C, muito antes dos 380°C das restantes amostras, podendo estar associado à presença de impurezas no provete. Analisando as curvas TG das amostras 5-HC-30-T1 e T2 e 4-HC-26 em comparação com as amostras de PA6-T1 e T2, verifica-se que a presença de TPU, parece antecipar a degradação do polímero (PA6+TPU) para 470°C enquanto nas amostras PA6-T1 e T2, a degradação total do PA6 ocorre até aos 490°C. Na Tabela 11 são apresentadas as massas das amostras no início e no final dos ensaios de TG/DTA, bem como as percentagens de polímero e FC presentes nas diferentes amostras.

Tabela 11 - Variação da massa das amostras nos ensaios TG/DTA

Amostras	Início [mg]	Massa no fim do ensaio			
		FC e/ou impurezas [%]	PA6+TPU [%]	FC e/ou impurezas [mg]	TPU e/ou PA6 [mg]
3-S-16	5,721	71,5	28,5	4,089	1,631
4-HC-24	6,177	41	59	2,536	3,640
5-HC-30-T1	5,140	58	42	2,964	2,175
5-HC-30-T2	1,710	54	46	0,927	0,783
PA6-T1	2,684	7,5	92,5	0,202	2,482
PA6-T2	2,973	6,63	93,4	0,197	2,776

4.5.2 Análise DTA

A Figura 51 mostra o comportamento face à temperatura das amostras estudadas, podendo ser observados os valores de energia, em função da temperatura. Para realizar a discussão deste gráfico, importa referir que a T_f da PA6 é 190°C e do TPU é de 144°C, com base nas fichas técnicas (Anexo B e Anexo C).

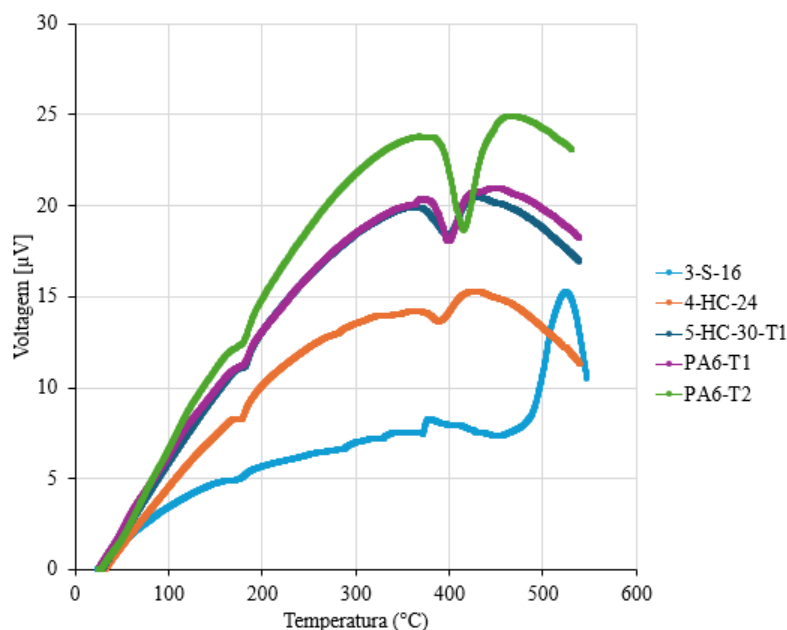


Figura 51 – Curvas DTA

Analisando a Figura 51 todas as amostras (5-HC-30-T1; 4-HC-24; 3-S-16; PA6-T1 e PA6-T2) apresentam uma diminuição na voltagem por volta dos 180°C, o que indica a ocorrência de uma reação endotérmica. Esta absorção de calor pode estar associada a diversos fenómenos, como fusão, a libertação de gases ou a evaporação da humidade presente na amostra. No entanto, com base na análise da curva da Figura 51, é possível concluir que o processo de fusão do PA6 deverá ocorrer neste ponto, ou seja, por volta dos 180°C. Por volta dos 400-410°C observa-se um pico de voltagem nas amostras de PA6, enquanto as amostras com TPU parecem antecipar este pico em torno dos 380°C-390°C. Estes picos sugerem uma reação exotérmica (libertação de calor), associada ao início da degradação da PA6, no caso das amostras PA6-T1 e PA6-T2 à degradação do TPU+PA6 no caso das restantes amostras com ambos os polímeros.

O facto do pico da amostra 4-HC-24 surgir a uma temperatura mais baixa (cerca de 380°C) está de acordo com o esperado pois, com base nos resultados da Figura 50, deverá apresentar uma maior quantidade de TPU que as restantes duas amostras com HC.

4.6 Análise Teórica

A análise teórica da resposta elástica dos laminados desenvolvidos no âmbito deste trabalho foi realizada no software *Excel*, recorrendo ao método da teoria clássica de laminados (Öchsner, 2021). Na Tabela 12 constam as propriedades dos materiais usados, obtidas com base nas informações disponibilizadas pelos fabricantes (Anexo B e C).

Tabela 12 - Propriedades dos materiais usados no fabrico dos provetes.

	Fibra Carbono	Matriz (PA6)	Reforço em HC
<i>Densidade ρ (Kg/m³)</i>	1800	1130	1149
<i>E(GPa)</i>	200	3,5	0,0144
<i>Coefficiente de Poisson (ν)</i>	0,35	0,45	0,45
<i>Gramagem (g/m²)</i>	200		
<i>G(GPa) = $E/(2(1+\nu))$</i>	44,44	1,207	0,00497

* Com o TPU *honeycomb*, o módulo de elasticidade é linear ao preenchimento ficando assim 0,048.0,30 (Gibson & Ashby, 1997).

Como referido no subcapítulo 2.1.1 as camadas de TPU *honeycomb* apresentam uma resposta mecânica equivalente a uma lâmina de fibra reforçada. Foi constatado que a orientação de impressão tem efeito nas propriedades, nomeadamente, maior rigidez na orientação de impressão (0°) que na direção transversal (90°). Para o fabrico do laminado foi, no entanto, considerada a camada de TPU *honeycomb* como isotrópica. No fabrico *hand-layup*, os laminados foram fabricados de forma que a direção com maior elasticidade (90°) fosse a que vai estar sujeita à carga tanto nos ensaios de tração como nos de flexão. Tendo em consideração que o pré-preg é do tipo 0/90 e foi dividido em duas camadas 0° e 90°, e que as camadas de *honeycomb* têm orientação 90, obteve-se o seguinte empilhamento do laminado (Tabela 13):

Tabela 13 - Sequência de empilhamento.

Sequência do Laminado								
Nº Camada	1	2	3	4	5	6	7	8
Orientação (°)	0	90	90	0	90	90	0	90
Tipo de Lâmina (FCPA6-HC)	FCPA6		TPU	FCPA6		TPU	FCPA6	
Tipo de Lâmina (FCPA6)	FCPA6		-	FCPA6		-	FCPA6	

Como calculado no sub-capítulo 3.3, sabemos que a espessura do laminado já com o TPU incorporado, fica em 1,104 mm, tendo sido obtido experimentalmente 1,430 mm. A densidade total do pré-preg (7) é calculada através:

$$\rho_{total} = V_{fibras} \cdot \rho_{fibras} + V_{matriz} \cdot \rho_{matriz} \quad (7)$$

Obtendo assim:

$$\rho_{total} = 0.38 * 1800 + 0.62 * 1130$$

$$\rho_{total} = 1388,4 \text{ Kg/m}^3$$

Foram calculadas as constantes de elasticidade para cada tipo de lâmina no referencial local (L, T, LT), fundamentais para a caracterização do comportamento elástico de cada lâmina. Começando por obter o módulo de elasticidade na direção da fibra (L, longitudinal - E_L) e perpendicular à fibra (T, transversal - E_T), módulo de corte na direção Z (G_{LT}), coeficiente de Poisson na direção Z (ν_{LT}). Na Tabela 14 são apresentadas as constantes no referencial local, para o pré-preg e para o TPU.

Tabela 14 - Constantes de elasticidade do TPU e do FCPA6 no referencial local.

Constantes	Reforço em TPU	FCPA6
Módulo transversal - E_T [GPa]	0,0144	5,64
Módulo longitudinal - E_L [GPa]	0,0144	79,28
Coeficiente de Poisson - ν_{LT}	0,4500	0,41
Coeficiente de Poisson - ν_{TL}	0,4500	0,03
Módulo de Corte - G_{LT} [GPa]	0,00497	1,94

As constantes de elasticidade são essenciais para a descrição do comportamento elástico de cada lâmina, no referencial local (X, L, Z). Antes de obtermos estas constantes,

têm de ser calculadas as constantes de elasticidade normais a nível geral (Tabela 15) (equações 8 e 9).

$$\overline{E}_L = \frac{E_L}{1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{LT}} \quad (8)$$

$$\overline{E}_T = \frac{E_T}{1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{LT}} \quad (9)$$

Tabela 15 - Constantes de elasticidade normais a nível geral.

	FCPA6	TPU
\overline{E}_L [GPa]	80,25	0,02
\overline{E}_T [GPa]	5,70	0,02

Com este passo realizado já temos todos os dados necessários para preencher a matriz E_{ij} (Tabela 16) e, de seguida conseguir preencher as matrizes A e D:

Tabela 16 - Valores da matriz E_{ij} para cada lâmina.

ORD.	Θ	Sen(Θ)	Cos(Θ)	E11	E12	E13	E21	E22	E23	E31	E32	E33
FCPA6	0	0,00	1,00	80,25	2,32	0,00	2,32	5,70	0,00	0,00	0,00	1,94
	90	1,00	0,00	5,70	2,32	0,00	2,32	5,70	0,00	0,00	0,00	1,94
TPU	90	1,00	0,00	0,0181	0,0065	0,00	0,0065	0,0181	0,00	0,00	0,00	0,005
FCPA6	0	0,00	1,00	80,25	2,32	0,00	2,32	5,70	0,00	0,00	0,00	1,94
	90	1,00	0,00	5,70	2,32	0,00	2,32	5,70	0,00	0,00	0,00	1,94
TPU	90	1,00	0,00	0,0181	0,0065	0,00	0,0065	0,0181	0,00	0,00	0,00	0,005
FCPA6	0	0,00	1,00	80,25	2,32	0,00	2,32	5,70	0,00	0,00	0,00	1,94
	90	1,00	0,00	5,70	2,32	0,00	2,32	5,70	0,00	0,00	0,00	1,94

Com a matriz E_{ij} calculada, prosseguimos para o cálculo da matriz A, através dos cálculos obtidos na Tabela 16 multiplicados pela espessura das respetivas camadas. De realçar que esta matriz foi verificada através do site *efunda* (efunda, 2025), tendo ainda sido obtida a matriz D.

Invertendo esta matriz A e multiplicando pela respetiva espessura do laminado, conseguimos obter as constantes de elasticidade dos laminados no referencial global (Tabela 17).

Tabela 17 - Constantes de elasticidade dos laminados de FCPA6 e FCPA6-HC.

	Teórico		Experimental (média)	
	FCPA6-HC	FCPA6	FCPA6-HC	FCPA6
E_x [GPa]	33,55	42,87	12,90	12,63
E_y [GPa]	33,55	42,87		
G_{xy} [GPa]	1,52	1,94		
ν_{yx}	0,05	0,05		
ν_{xy}	0,05	0,05		

Para previsão teórica dos resultados dos ensaios de flexão três pontos, foram utilizadas as dimensões do provete com base nos valores médios obtidos na (Tabela 18). Considerando a aplicação de uma força de 10N, mantida até ocorrer rotura, foi possível calcular o módulo de flexão (E_f – equação 11) e o deslocamento vertical máximo/enflechamento ($W_{\text{máx}}$ – equação 12) no ponto de aplicação de carga. Adicionalmente, foi necessário determinar o momento de inércia (I_{yy} – equação 10), recorrendo à matriz inversa D^{-1} , posteriormente transformada.

$$I_{yy} = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (10)$$

$$E_f = \frac{1}{I_{yy} \cdot [d_{11}^*]} \quad (11)$$

$$w = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E_f I_{yy}} \quad (12)$$

Tabela 18 - Dimensões e parâmetros obtidos do ensaio de flexão.

	Teórico		Experimental	
	FCPA6-HC	FCPA6	FCPA6-HC	FCPA6
Largura nominal [mm]	1	1		
Comprimento [L - mm]	150	150		
Espessura [mm]	1,104	0,864	1,428	1,219
I_{yy} [mm ⁴]	0,11	0,05		
E_f [GPa]	38,96	42,90	6,68	5,93
$W_{\text{máx}}$ [mm]	47,65	90,26		

Conclusões

Este capítulo sintetiza as etapas desenvolvidas nesta dissertação e apresenta as principais conclusões. O objetivo principal desta tese foi estudar as propriedades mecânicas do compósito, comportamento elástico e plástico, e observar os efeitos, resultantes da introdução de camadas de reforço em TPU 95A produzidos por FFF.

Um dos principais desafios foi a manutenção de vácuo estável durante o fabrico. Mesmo após diversos testes e melhorias implementadas, ainda antes da 1ª fornada, como: aquisição de novos componentes (placa de alumínio, toma de vácuo, termopar), substituição frequente do selante de silicone e da fita de teflon, verificou-se que em algumas fornadas o vácuo não se manteve ao longo de todo o processo de cura, o que provocou grande variabilidade dimensional e visual, que levou à variabilidade dos resultados obtidos. Assim, para melhorar o processo de fabrico é essencial assegurar um controlo rigoroso dos consumíveis (fita teflon e selante de silicone), para garantir que a cura ocorre com vácuo constante.

A microscopia ótica permitiu observar a variabilidade entre diferentes fornadas, com os provetes produzidos a apresentarem características morfológicas muito distintas. Foram identificados vários defeitos (bolhas, fraca união entre FC-PA6-TPU), flutuação da espessura das camadas de TPU, o que pode ter comprometido a uniformidade e o desempenho mecânico dos laminados produzidos. A introdução de camadas de TPU conduziu a um aumento da espessura do laminado em 29,30%, devido tanto à espessura das camadas de TPU no formato celular *honeycomb*, como a eventuais falhas na adesão entre FC-PA6-TPU.

Os ensaios TG/DTA forneceram informações relativamente ao comportamento térmico do compósito, demonstrando que as amostras FCPA6-HC apresentam temperaturas de degradação ligeiramente inferiores às dos provetes de FCPA6, atribuído à menor estabilidade térmica do TPU face à PA6. Os ensaios de TG permitiram quantificar as percentagens reais de FC e de polímero nos diferentes provetes produzidos e que, em alguns casos, ajudam a justificar a delaminação observada em alguns dos provetes.

Nos ensaios de flexão, as fornadas com HC registaram, em média, uma carga máxima 41,3% superior às fornadas sem HC, destacando-se a 4ª fornada, cujas amostras atingiram valores mais elevados. Quanto à rigidez à flexão, a 4ª fornada apresentou valores médios 77% superiores à 2ª, embora com elevada dispersão entre provetes. Globalmente, as fornadas sem HC revelaram uma rigidez à flexão 63% inferior às reforçadas. Relativamente à tensão de flexão máxima, embora exista grande variação entre amostras (devido à variação da espessura), as fornadas com HC apresentaram, em média, tensões de flexão 7,15% superiores às fornadas sem HC, quando consideradas as amostras da 2ª fornada. O módulo elástico à flexão, demonstrou uma relação inversa da espessura: provetes mais finos apresentaram módulos superiores. A amostra 4-HC-23, atingiu 9,97 GPa, em contraste com os 3,66 GPa da amostra 4-HC-25, mais espessa. Em média, os provetes do tipo FCPA6-HC apresentaram um módulo 11,2% superior aos dos provetes FCPA6, comprovando que o TPU, contribui para o aumento da rigidez global do laminado, preservando a integridade estrutural.

O ensaio de tração evidenciou que a presença de HC melhorou o módulo de elasticidade (E) e a tensão máxima, tendo apresentado uma redução na extensão. O módulo de elasticidade, revelou-se superior nos provetes com HC da 5ª fornada, atingindo valores 59,6% superiores aos da 4ª fornada, que apresentou defeitos de fabrico, como bolhas e má adesão entre PA6/TPU e FC. Já as amostras sem HC da 1ª e 3ª fornadas evidenciaram boa consistência no valor de E , refletindo um fabrico mais estável. Quanto à tensão máxima, os provetes sem HC registaram em média, valores 3,12% superiores, embora os melhores resultados tenham sido obtidos na 5ª fornada com HC, confirmando que a manutenção do vácuo ao longo de todo o processo de cura melhora a resistência. Na extensão máxima, verificou-se menor capacidade de deformação nos provetes com HC (média de 0,0029 mm face a 0,0032 nos sem HC), demonstrando uma redução da capacidade de deformação em cerca de 10,4%. Este resultado era inesperado visto que o TPU tem enorme capacidade de deformação. Este resultado pode estar correlacionado com os defeitos de vácuo e resultantes defeitos de fabrico.

Os ensaios de impacto realizados, para 2,5J; 5J e 10J, evidenciaram o papel determinante da espessura e da qualidade de fabrico na resistência ao impacto. A 4ª fornada, destacou-se com o melhor desempenho mecânico, apresentando rácios de Carga/Espessura mais baixos e rácios de E_c /Espessura mais elevados, indicadores diretos da sua capacidade de absorção de energia e resistência ao dano. Para o ensaio de 2,5J, o provete da 4ª fornada apresentou uma energia elástica de 59%, sendo 58% e 73% superior à registada pelos provetes da 3ª e 5ª fornada, respetivamente, sem ser visível dano na superfície de impacto. Esta tendência manteve-se nos ensaios com 5J e 10J, onde, apesar da ocorrência de delaminação e fraturas internas (associadas a defeitos de fabrico), o desempenho do provete com HC manteve-se superior aos restantes, melhorando a capacidade do laminado absorver energias de impacto. A 3ª fornada apresentou um desempenho intermédio, com sinais de fratura e perfuração visíveis a 10J, enquanto a 5ª fornada evidenciou perfuração já a 5J. Estes resultados demonstram que uma espessura mais elevada contribui, para uma maior capacidade de absorção de energia, reforçando a importância de garantir um processo de fabrico constante, para garantir a integridade estrutural dos compósitos laminados, quando sujeitos a impacto.

Em síntese, os resultados que evidenciam que quando o fabrico é controlado e é assegurada a manutenção do vácuo ao longo de todo o processo de cura do laminado, a adição de TPU em estrutura *honeycomb* melhora o desempenho mecânico global dos laminados, sendo estas melhorias:

- Carga máxima à flexão em média 41,3% superior;
- Rigidez à flexão, em média, 63% superior;
- Módulo de Young superior, face ao laminado sem HC;
- Maior capacidade de absorção de energia ao impacto e resistência ao impacto;

Trabalhos futuros

As investigações futuras devem centrar-se na resolução das questões identificadas na conclusão, de modo a aumentar a capacidade mecânica, a fiabilidade e a qualidade dos laminados, garantindo que estes cumpram padrões ainda mais elevados. Seguem em anexo algumas propostas para trabalhos futuros:

- Melhoria do método de fabrico:
 - Aquisição de um forno que seja capaz de alcançar temperaturas mais elevadas, com entrada, para aplicação de vácuo;
 - Aquisição de uma segunda placa de alumínio, para ser posicionada por cima do laminado;
 - No processo de fabrico por vácuo, realizar troca da fita de teflon da rosca da toma de vácuo, observar sempre os discos de silicone por forma a aferir acerca de eventuais sinais e degradação, realizar o saco de vácuo com mais fita selante, na zona que tem a dobra do saco;
- Expandir a introdução de camadas de reforço a laminados mais complexos: aplicação de camadas com a orientação de 45° para introduzir resistência ao corte;
- Utilizar estudos numéricos, para verificar/comprovar os resultados obtidos experimentalmente;
- Fazer iterações no efunda para obter um empilhamento o mais otimizado possível, que tenha a matriz D com os valores maiores;
- Efetuar uma análise fractográfica dos provetes, dos ensaios de impacto, tração e flexão, como efetuado no (Cirilo, 2025);
- Realizar um estudo da resposta do TPU *honeycomb*, com diferentes orientações, por forma a obter as propriedades mecânicas para cada orientação;
- Realizar um estudo da tenacidade à fratura interlaminar em Modo I, para perceber o comportamento do reforço interlaminar (norma ASTM D5528);
- Análise do comportamento à fadiga de laminados na presença de entalhes, simulando defeitos críticos. A introdução de entalhes, compromete a vida útil do laminado, evidenciando a necessidade de técnicas de reforço interlaminar;

Referências Bibliográficas

- Aga, Z. A., & Woldeesenbet, E. (2007). Bond thickness effect on impact response and damage of adhesively-bonded graphite/epoxy composites. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21(1), 21–34. <https://doi.org/10.1163/156856107779976114>
- Air Liquide. (2024, December 24). *Porque é que a tecnologia FFF (Fused Filament Fabrication), também conhecida como FDM (Fused Deposition Modeling), pode democratizar a impressão metálica em 3D?* <https://Pt.Airliquide.Com/Solucoes/Fabricacao-Aditiva/Porque-e-Que-Tecnologia-Fused-Filament-Fabrication-Pode-Democratizar-Impressao-Metalica-Em-3d>.
- Antunes, T. (2024). *Design, Manufacture and Testing of Laminated Composite of Pré-preg and Printed Elastomers by Fused Filament* [Materials]. Atlântica, University Institute.
- Asmatulu, E., Twomey, J., & Overcash, M. (2014). Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept. *Journal of Composite Materials*, 48(5), 593–608. <https://doi.org/10.1177/0021998313476325>
- Beckermann, G. W., & Pickering, K. L. (2015). Mode I and Mode II interlaminar fracture toughness of composite laminates interleaved with electrospun nanofibre veils. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 72, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.01.028>
- Bilge, K., & Papila, M. (2015). Interlayer toughening mechanisms of composite materials. In *Toughening Mechanisms in Composite Materials* (pp. 263–294). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-279-2.00010-X>
- Boyd, S. E., Bogetti, T. A., Staniszewski, J. M., Lawrence, B. D., & Walter, M. S. (2018). Enhanced delamination resistance of thick-section glass-epoxy composite laminates using compliant thermoplastic polyurethane interlayers. *Composite Structures*, 189, 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.062>
- Carraher Jr., C. E. (2017). *Introduction to Polymer Chemistry* (Charles Carraher, Ed.; 2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315369488>

- Chaudhry, M. S., & Czekanski, A. (2020). Evaluating FDM Process Parameter Sensitive Mechanical Performance of Elastomers at Various Strain Rates of Loading. *Materials*, 13(14), 3202. <https://doi.org/10.3390/ma13143202>
- Cirilo, P. (2025). *Estudo Fractográfico de Compósitos de Fibra de Carbono/Matrizes de Polipropileno-polietileno Submetidos a Ensaio de Tração e Compressão* [Thesis]. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO .
- Dagne Shiferaw, H., Woldemariam, M. H., Tilahun Redda, D., & Yimam Ahmed, A. (2025). Drop-Weight Impact Analysis of Unidirectional Sisal Fiber –Reinforced Epoxy Resin Composite Material for Automotive Application Based on ASTM D-7136 Standard. *Journal of Engineering*, 2025(1). <https://doi.org/10.1155/je/5102865>
- efunda. (2025, April 29). *Efunda - Finding Stiffness Matrices*. https://www.efunda.com/Formulae/Solid_mechanics/Composites/Calc_ufrp_abd_go.Cfm.
- Fernandes De Souza Rêgo, J. J., Lincoln, D., Santos, F., & Santos Marinho, G. (2020). Breve histórico da evolução do uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica. In *Mens Agitat* (Vol. 15).
- Forward - BASF. (2025, February 10). *Ultrafuse® TPU 95A* . https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Flexible%20Filaments/TPU%2095A/TDS/Ultrafuse_TPU-95A_TDS_EN_v1.0.pdf.
- Gao, G., Xu, F., Xu, J., Tang, G., & Liu, Z. (2022). A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. *Micromachines*, 13(4), 553. <https://doi.org/10.3390/mi13040553>
- Gibson, L. J. (2003). Cellular Solids. *MRS Bulletin*, 28(4), 270–274. <https://doi.org/10.1557/mrs2003.79>
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular Solids* (second). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>
- Ginger Gardiner. (2023, September 27). *A new era for ceramic matrix composites*. <https://www.compositesworld.com/articles/a-new-era-for-ceramic-matrix-composites>.
- GoldSupplier. (2025, February 28). *O que você precisa saber sobre o material TPU: o melhor material termoplástico flexível*. <https://blog.goldsupplier.com/pt/tpu-material-2/>.

- Gomes, E. (2009). *Implementação de rotinas computacionais para o cálculo de trajetórias geodésicas no processo de filament winding* [Thesis]. Universidade de São Paulo.
- Gurit. (2022). *Guide to Composites*. <https://www.gurit.com/wp-content/uploads/2022/12/Guide-to-Composites-1.pdf>.
- Hao, W., Liu, Y., Zhou, H., Chen, H., & Fang, D. (2018). Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites. *Polymer Testing*, 65, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.11.004>
- Impresoras3D. (2025, January 29). *O melhor padrão de preenchimento para impressão 3D*. <https://www.impresoras3d.com/pt/o-melhor-padr%C3%A3o-de-preenchimento-para-impress%C3%A3o-3d/>.
- Khan, S. F., Zakaria, H., Chong, Y. L., Saad, M. A. M., & Basaruddin, K. (2018). Effect of infill on tensile and flexural strength of 3D printed PLA parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 429, 012101. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/429/1/012101>
- Kiński, W., & Pietkiewicz, P. (2020). Influence of the Printing Nozzle Diameter on Tensile Strength of Produced 3D Models in FDM Technology. *Agricultural Engineering*, 24(3), 31–38. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2020-0024>
- Kumar, V., & Ahmed, K. (2013). Analysis Of Vacuum Failures During Curing Of Cfrp Composites. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, 2(5), 1–6.
- Lakshmi, P. R., Devi, P. A., Reddy, P. R., Yamuna, K., & Bharathi, Y. (2019). Estimation of interlaminar shear strength in glass epoxy composites by experimental and finite element method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1240(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1240/1/012027>
- Lopes, C. S., Seresta, O., Coquet, Y., Gürdal, Z., Camanho, P. P., & Thuis, B. (2009). Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part I: Experiments. *Composites Science and Technology*, 69(7–8), 926–936. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.02.009>
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420005981>

- Mundo do Plástico. (2025, February 10). *Elastômeros termoplásticos: saiba o que é, os tipos e aplicações*.
<https://Mundodoplastico.Plasticobrasil.Com.Br/Artigos/Elastomeros-Termoplasticos-Saiba-o-Que-e-Os-Tipos-e-Aplicacoes/>.
- Novo, P. (2019). *Pultrusion of thermoplastic composites* [Thesis]. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- Öchsner, A. (2021). *Foundations of Classical Laminate Theory* (Advanced Structure, Vol. 163). Springer Nature.
- Ou, Y., González, C., & Vilatela, J. J. (2020). Understanding interlaminar toughening of unidirectional CFRP laminates with carbon nanotube veils. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108372. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108372>
- Pizzatto, L. (2009). *Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos de Elastômero Termoplástico de Poliuretano (TPU) Com Argila* [Thesis]. Universidade de Caxias do Sul.
- Pragadish N, Bakkiyaraj M, Rajakrishnamoorthy P, Ganapathy Srinivasan R, Selvam M, & Thamarai Selvan A. (2025). Infill structure analysis of FDM-printed PLA wood glass fiber composite for commercial product applications. *Iopscience*, 34(3). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/adb35f>
- Qiu, A., Fu, K., Lin, W., Zhao, C., & Tang, Y. (2014a). Modelling low-speed drop-weight impact on composite laminates. *Materials & Design*, 60, 520–531. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.041>
- Qiu, A., Fu, K., Lin, W., Zhao, C., & Tang, Y. (2014b). Modelling low-speed drop-weight impact on composite laminates. *Materials & Design*, 60, 520–531. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.041>
- Robótica. (2024, December 22). *Breve mas impressionante história da Impressão 3D*. <https://www.robotica.pt/breve-historia-da-impressao-3d/>.
- RocketLab. (2024, December 12). *Composites Structures*. <https://Www.Rocketlabusa.Com/Space-Systems/Composite-Structures/>.
- Rwei, S.-P., Ranganathan, P., & Lee, Y.-H. (2019). Synthesis and characterization of low melting point PA6 copolyamides from ϵ -caprolactam with bio-based polyamide salt. *Journal of Molecular Structure*, 1186, 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.03.044>

- Sprayidea. (2025, January 10). *Dominando o processo de infusão a vácuo: um guia abrangente*. <https://Sprayidea.Com/Pt/Blog/Dominando-o-Processo-de-Infusao-a-Vacu-Um-Guia-Completo/>.
- Tang, Y., Ye, L., Zhang, Z., & Friedrich, K. (2013). Interlaminar fracture toughness and CAI strength of fibre-reinforced composites with nanoparticles – A review. *Composites Science and Technology*, 86, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.06.021>
- TEKNORAPEX. (2025, February 10). *Thermoplastic Elastomers, or Thermoplastic Rubber compounds, as they're sometimes called, are a class of materials that behave a lot like rubber, but process like plastic. TPEs consist of hard and soft phase systems in the form of blends, alloys, or copolymers*. <https://Www.Teknorapex.Com/En-Us/Resources/Blogs/Thermoplastic-Elastomers-and-Measuring-Shore-Hardness-Chart>.
- Timmis, A. J., Hodzic, A., Koh, L., Bonner, M., Soutis, C., Schäfer, A. W., & Dray, L. (2015). Environmental impact assessment of aviation emission reduction through the implementation of composite materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(2), 233–243. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0824-0>
- Turis, M., & Ivánková, O. (2020). Using finite element analysis to obtain plastic zones in the vicinity of the crack edges, under mixed mode loading conditions. *MATEC Web of Conferences*, 310, 00028. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202031000028>
- Uvarajan, T., Gani, P., Chuan, N. C., & Zulkernain, N. H. (2022). Reusing plastic waste in the production of bricks and paving blocks: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(14), 6941–6974. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1967201>
- Verrey, J., Wakeman, M. D., Michaud, V., & Manson, J.-A. E. (2006). Manufacturing cost comparison of thermoplastic and thermoset RTM for an automotive floor pan. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(1), 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.048>
- Yasaee, M., Bond, I. P., Trask, R. S., & Greenhalgh, E. S. (2012a). Damage control using discrete thermoplastic film inserts. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(6), 978–989. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.01.011>

- Yasaee, M., Bond, I. P., Trask, R. S., & Greenhalgh, E. S. (2012b). Mode I interfacial toughening through discontinuous interleaves for damage suppression and control. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(1), 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.10.009>
- Zhang, Y., Cai, D., Hu, Y., Zhang, N., & Peng, J. (2022). Effect of Interlaminar Toughness on the Residual Compressive Capacity of Carbon Fiber Laminates with Different Types of Delamination. *Polymers*, 14(17), 3560. <https://doi.org/10.3390/polym14173560>
- Zhang, Z. (2023). (2023). The application and influence of polymer composite materials in competitive sports. *Applied and Computational Engineering*, 25, 1-8. *Sino Canada School*, 25.
- Zheng, Y. (2019). Biological design of materials. In *Bioinspired Design of Materials Surfaces* (pp. 27–97). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814843-3.00002-8>
- Zohdi, N., & Yang, R. (Chunhui). (2021). Material Anisotropy in Additively Manufactured Polymers and Polymer Composites: A Review. *Polymers*, 13(19), 3368. <https://doi.org/10.3390/polym13193368>
- Zuo, P., Srinivasan, D. V., & Vassilopoulos, A. P. (2021). Review of hybrid composites fatigue. *Composite Structures*, 274, 114358. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114358>

ANEXOS

Anexo A. Ensaio Charpy - Resultados

Com base nos parâmetros definidos no capítulo 3.4.4, foi possível determinar a energia absorvida ao impacto (E - Tabela 19). Este ensaio teve como objetivo fornecer uma estimativa preliminar da energia de impacto a considerar no ensaio de impacto por queda.

Tabela 19 - Resultados do Ensaio Charpy

Provetes	E [J]
1-S-8	1,5
2-HC-15	1,9
3-S-21	1,5
5-HC-31	1,2
5-HC-32	1,0

Na Figura 52 pode observar-se que os provetes 1-S-8; 2-HC-15 e 3-S-21, apresentaram deformação plástica visível a olho nu. Em contraste, os provetes 5-HC-31 e 5-HC-32, recuperaram a sua forma original, apesar de terem sofrido delaminação na secção central.



Figura 52 - Deformação dos provetes no ensaio Charpy

Anexo B. Ficha Técnica do Pré-preg



PRODUCT DATA SHEET

B22-011 TSF-Low-BIOPA200-3K-CF-TW-400
 Thermoplastic Prepreg –Bidirectional 3K carbon fibre fabric laminated on both sides with 100gsm BioPA film



PROPERTIES

Property	Value
Fiber areal weight (FAW)	200 g/m ²
Weight per ply (PAW)	400g/m ²
Resin content by weight	50% Bio-PA
Consolidated ply thickness(CPT)	-

FABRIC DESIGN

Property	Value
Fibre	Carbon fibre
Matrix	BIO-PA
Pattern	Twill
Width	100 cm
<i>contact us for special widths</i>	
Density	5 threads/cm

TYPICAL NEAT RESIN PROPERTIES

Property	Value
Density	1,13 g/cm ³
Tg	60°C
Tm (melt)	190°C
Tp (processing)	220°C

MAIN FEATURES:

- Flexible
- Recyclable
- Ready to be shaped
- Short Time Processing
- Easy to manipulate and cut

TYPICAL APPLICATIONS:

- Sports Goods
- Naval
- Automotive
- Renewable energy
- Consumer products
- Aesthetics

The described values in this technical sheet are the estimated results obtained in the TEXFIRE TEXTILS TECNICS S.L internal laboratory according to standard methodologies. TEXFIRE reserves the right to change the parameters without the obligation to notice it previously.



www.blackfabric.eu
info@blackfabric.eu

C/Llobateres, 29- 08210 Barberà del Vallès, Spain

Anexo C. Ficha Técnica do TPU



Technical Data Sheet

Ultrafuse® TPU 95A

Date / Revised: 22.08.2022

Version No.: 2.0

General information

Components

BASF ether based thermoplastic polyurethane (TPU) based filament for Fused Filament Fabrication.

Product Description

Ultrafuse® TPU 95A comes with a well-balanced profile of flexibility and durability. On top of that, it allows for easier and faster printing than softer TPU grades. Parts printed with Ultrafuse® TPU 95A show a high elongation, good impact resistance, excellent layer adhesion and a good resistance to oils and common industrially used chemicals.

Due to its good printing behavior, Ultrafuse® TPU 95A is a good choice for starting printing flexible materials on both direct drive and bowden style printers.

Delivery form and warehousing

Ultrafuse® TPU 95A filament should be stored at 15 - 25°C in its originally sealed package in a clean and dry environment. If the recommended storage conditions are observed the products will have a minimum shelf life of 12 months.

Product safety

Please process materials in a well ventilated room, or use professional air extraction systems. For further and more detailed information please consult the corresponding material safety data sheets.

Notice

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve processors from carrying out their own investigations and tests; neither do these data imply any guarantee of certain properties, nor the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

Values in this document are average values, measured and calculated according to the instructions in the listed standards. The used specimens are produced with the Fused Filament Fabrication method.

Measured values can vary depending on used print orientation and print parameters.

Please contact us for further product information, like for example REACH, RoHS, FCS.

Filament Properties		
Filament Diameter	1.75 mm	2.85 mm
Diameter Tolerance	±0.050 mm	±0.1 mm
Roundness	±0.050 mm	±0.05 mm
Available Spool size	750 g; 2.5 kg	750 g; 2.5 kg
Available colors	white and black	

Spool Properties		
Available Spool size	750 g	2.5 kg
Outer diameter	200 mm	300 mm
Inner diameter	50.5 mm	51.5 mm
width	55 mm	103 mm

Recommended 3D-Print processing parameters		Used for test specimens
Printer	FFF printer	Prusa i3 MK3
Nozzle Temperature	210 – 230 °C / 410 – 446 °F	220 °C / 428 °F
Build Chamber Temperature	-	-
Bed Temperature	40 °C / 104 °F	40 °C / 104 °F
Bed Material	Glass	PEI coated spring sheet
Nozzle Diameter	≥ 0.4 mm	0.4 mm
Print Speed	15 – 40 mm/s	25 mm/s

Please check your print profile availability for an easy start at www.forward-am.com.

Further Recommendations	
Drying recommendations to ensure printability and best mechanical properties	70 °C in a hot air dryer or vacuum oven for at least 5 hours Please note: To ensure constant material properties the material should always be kept dry.
Support material compatibility	Ultrafuse® BVOH

General Properties		Standard
Filament Density*	1149 kg/m ³ / 72 lb/ft ³	ISO 1183-1

*measured on filament

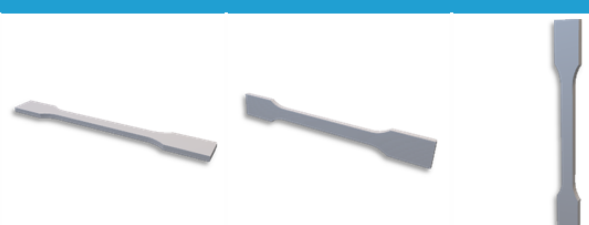
Classification and Certification		Standard
Biocompatibility		
Cytotoxicity XTT neutral red	Passed	ISO 10993-5
Skin irritation	Passed	ISO10993-10
Skin sensitization LLNA	Passed	ISO10993-10
KretinoSens		

Thermal Properties		Standard
Vicat softening point @ 50 N	<27 °C / <81 °F	ISO 306
Vicat softening point @ 10 N	75 °C / 167 °F	ISO 306
Glass Transition Temperature	-25 °C / -13 °F	ISO 11357-2
Melting Temperature	144 °C / 291 °F	ISO 11357-3
Melt Volume Rate	30.7 cm ³ /10 min / 1.87 in ³ /10 min (210 °C, 5 kg)	ISO 1133

General Mechanical Properties		Standard
Compression Set at 23°C, 72 h	38 %	ISO 815
Compression Set at 70°C, 24 h	90 %	ISO 815
Abrasion Resistance	64 mm ³ / 0.004 in ³	ISO 4649
Shore A Hardness (3 s)	92	ISO 7619-1
Shore D Hardness (15 s)	45	ISO 7619-1

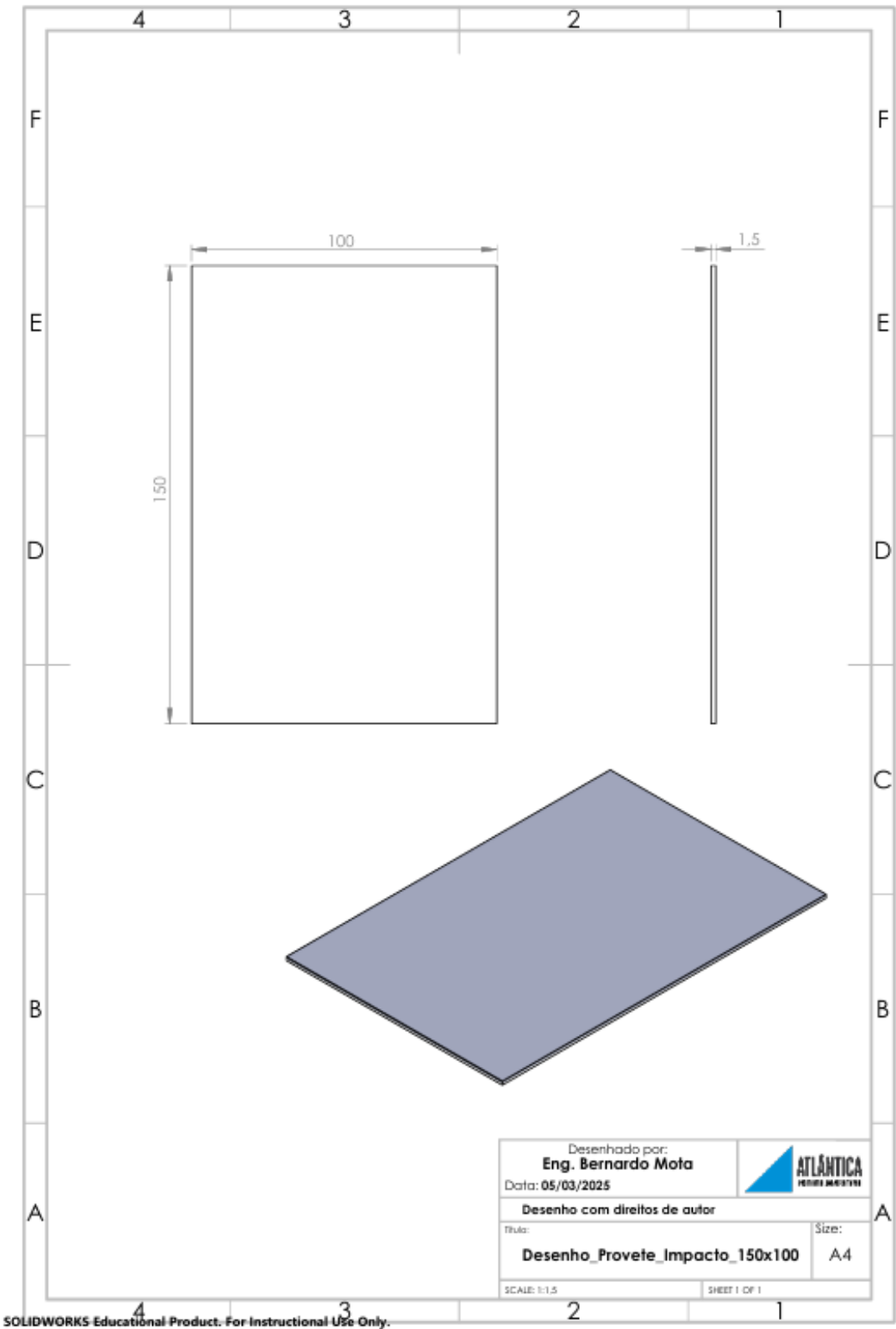
Technical Data Sheet for Ultrafuse® TPU 95A

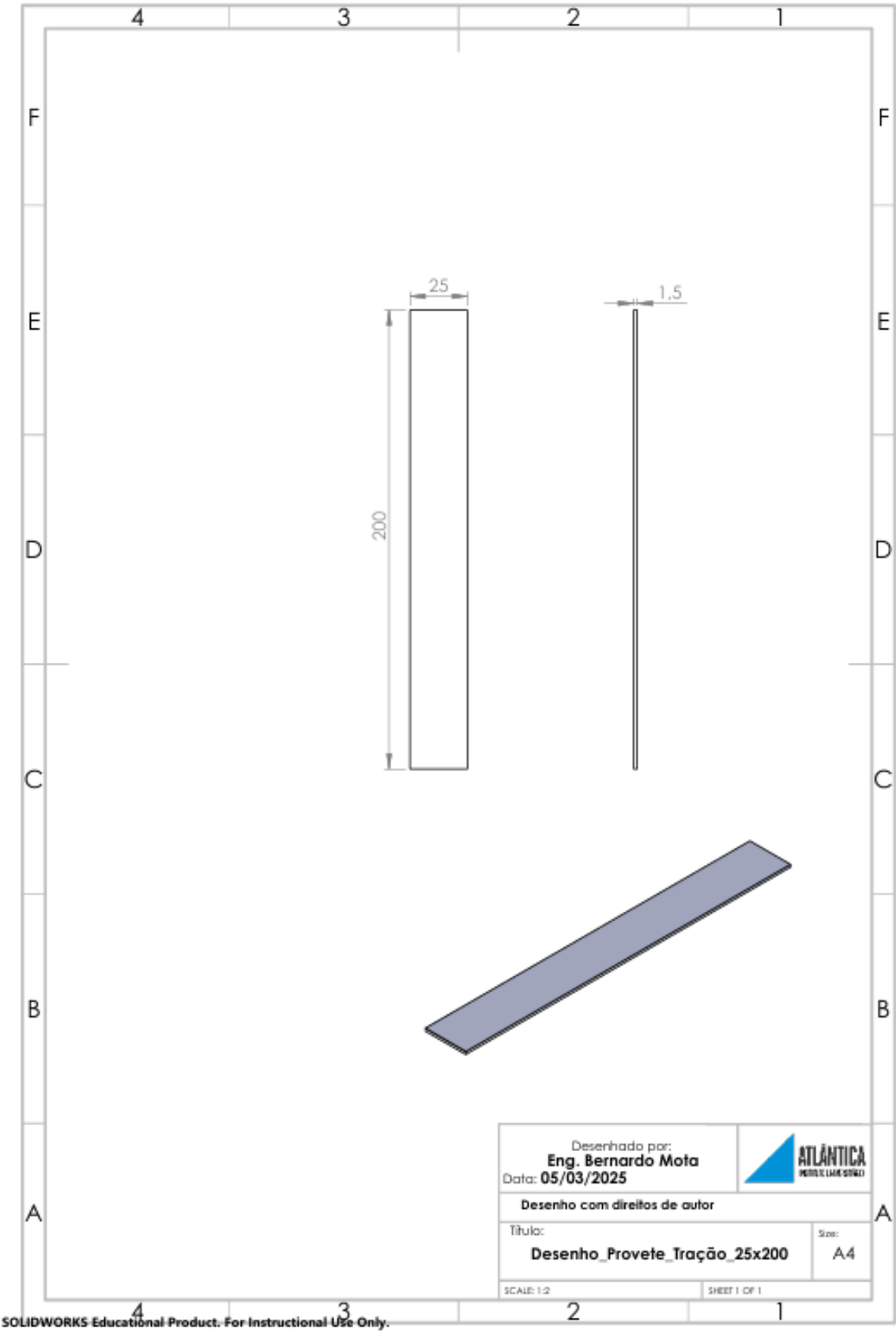
Version No. 2.0

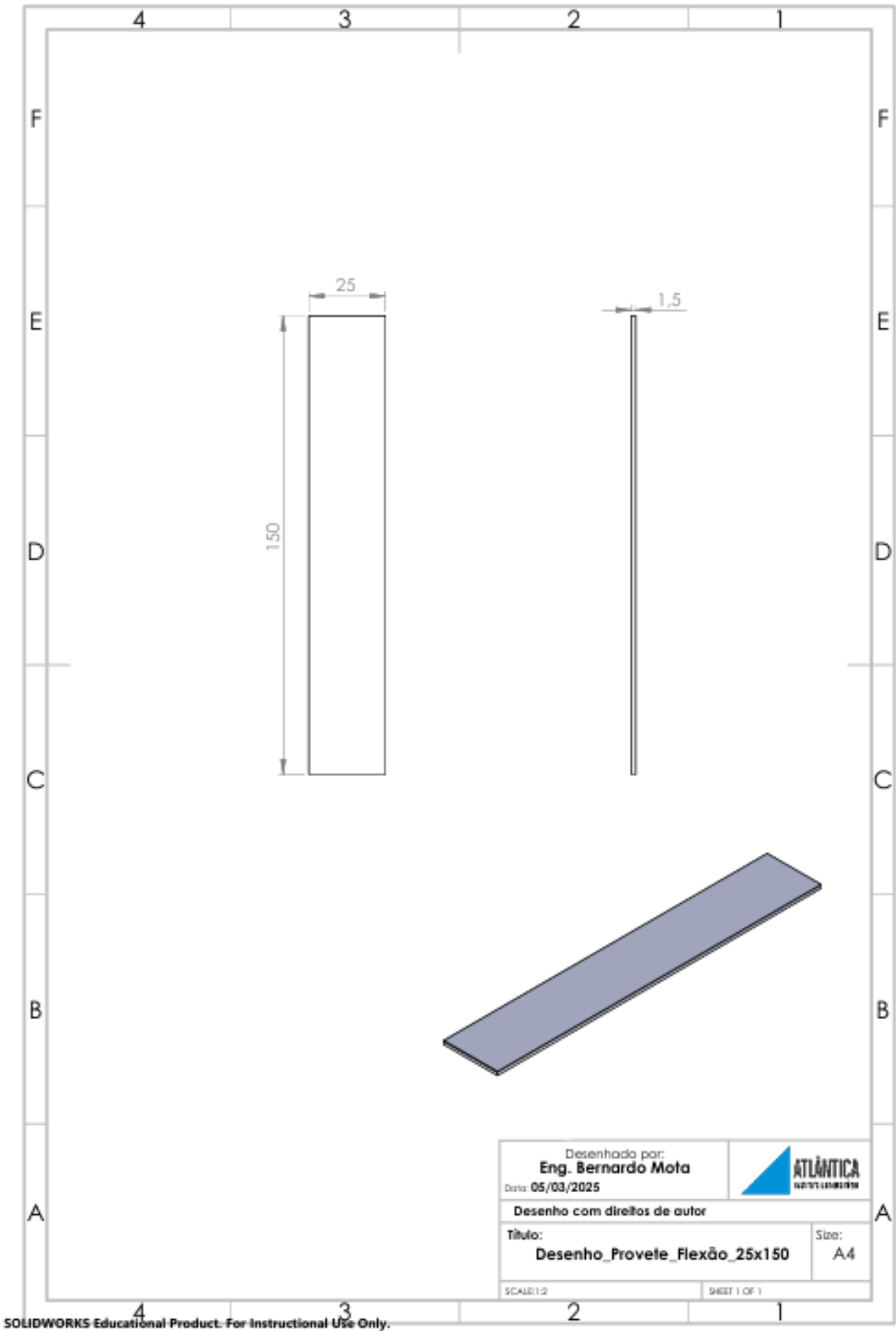
Mechanical Properties ¹				
				
Print direction	Standard	XY	XZ	ZX
		Flat	On its edge	Upright
Stress at 50 % Elongation ²	ISO 527	8.3 MPa / 1.20 ksi	-	7.9 MPa / 1.15 ksi
Stress at 100% Elongation ²	ISO 527	10.5 MPa / 1.52 ksi	-	9.9 MPa / 1.44 ksi
Stress at 300% Elongation ²	ISO 527	20.3 MPa / 2.94 ksi	-	-
Stress at Break, TPE ²	ISO 527	44.2 MPa / 6.41 ksi	-	12.2 MPa / 1.77 ksi
Elongation at Break, TPE ²	ISO 527	661 %	-	192 %
Young's Modulus ³	ISO 527	48.4 MPa / 7.0 ksi	-	46.7 MPa / 6.8 ksi
Impact Strength Charpy (notched)	ISO 179-2	No break	No break	16.8 kJ/m ²
Impact Strength Charpy (notched) @ -30°C	ISO 179-2	128 kJ/m ²	120 kJ/m ²	14.9 kJ/m ²
Impact Strength Izod (notched)	ISO 180	No break	No break	No break
Tensile Notched Impact Strength	ISO 8256/1	No break	No Break	No break
Tear Strength	ISO 34-1A	90 kN/m	8 kN/m	14 kN/m

¹Conditioning of the specimens: Tempering (100°C, 20h) Standard climate (23°C, 50% RH, 72h)²Testing speed: 200 mm/min³Testing speed: 1 mm/min

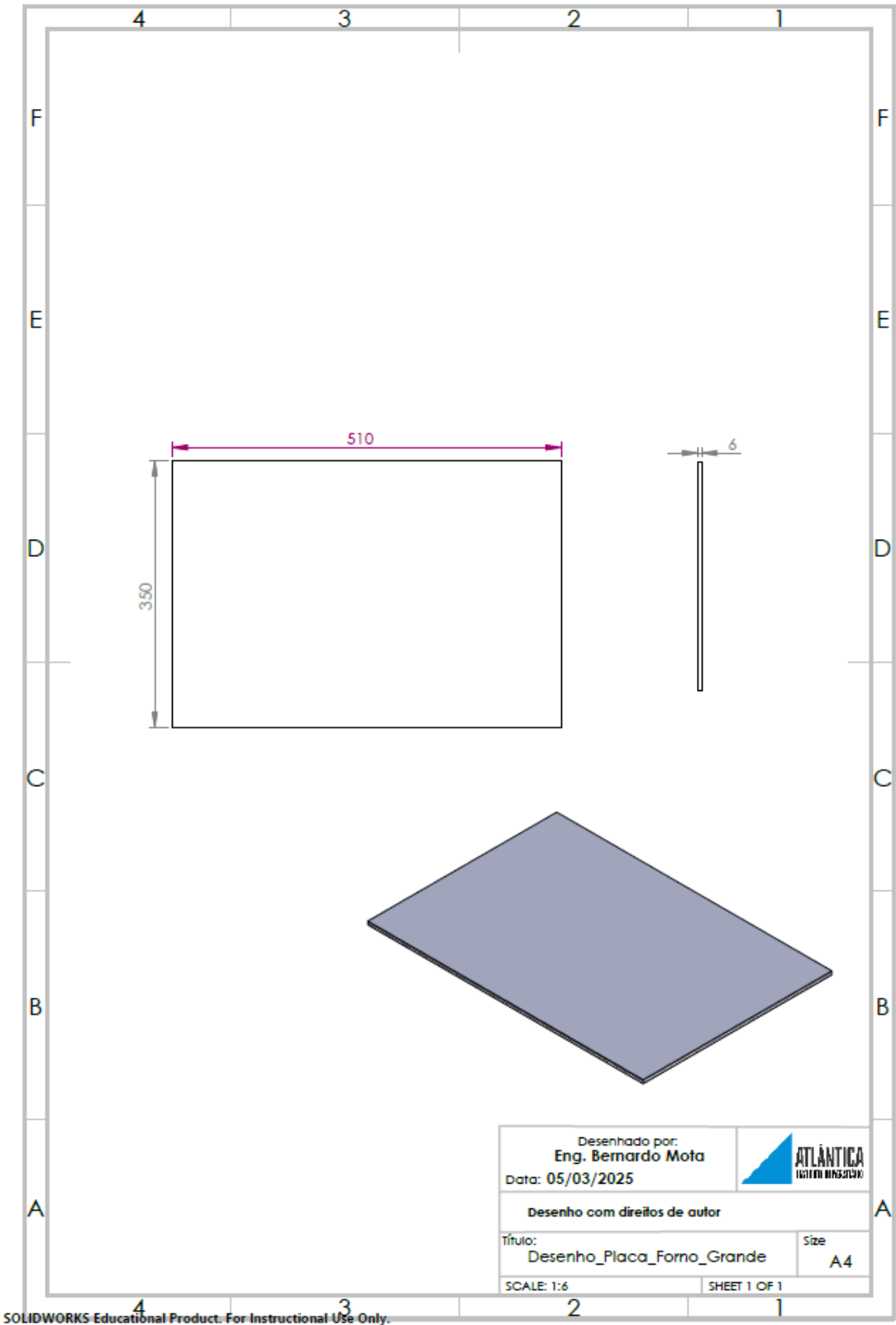
Anexo D. Desenhos técnicos dos provetes



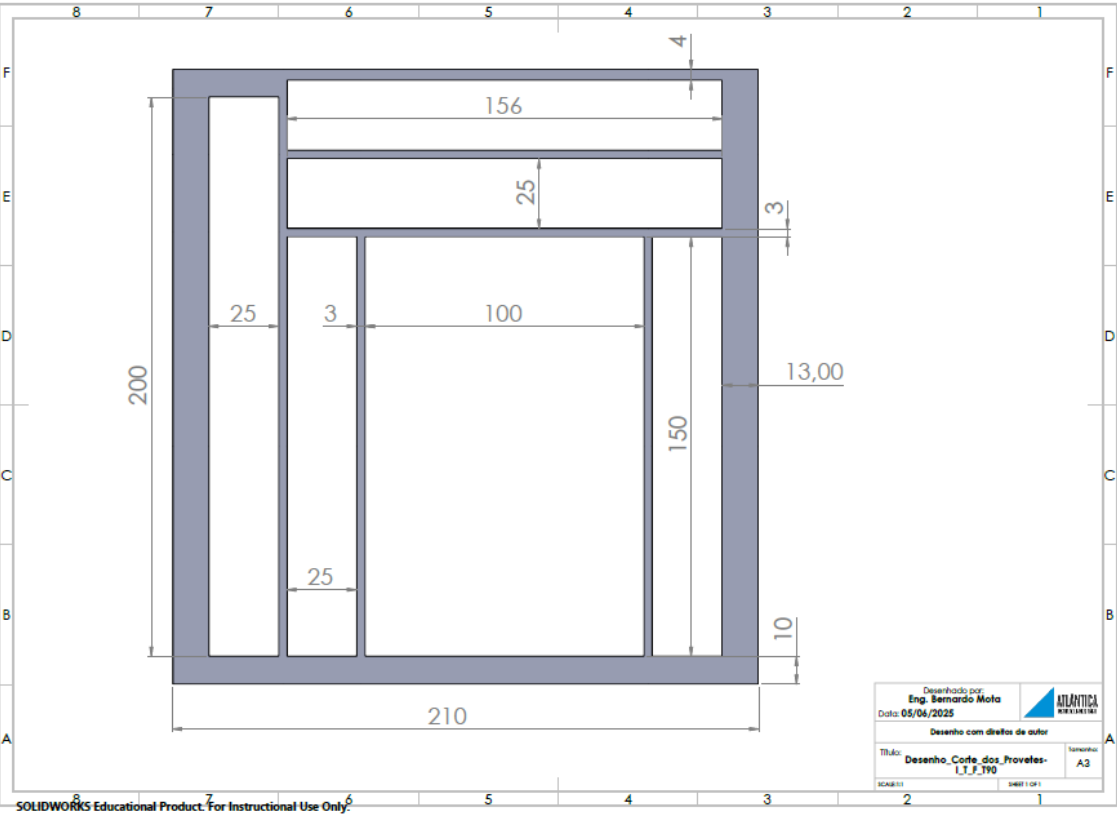
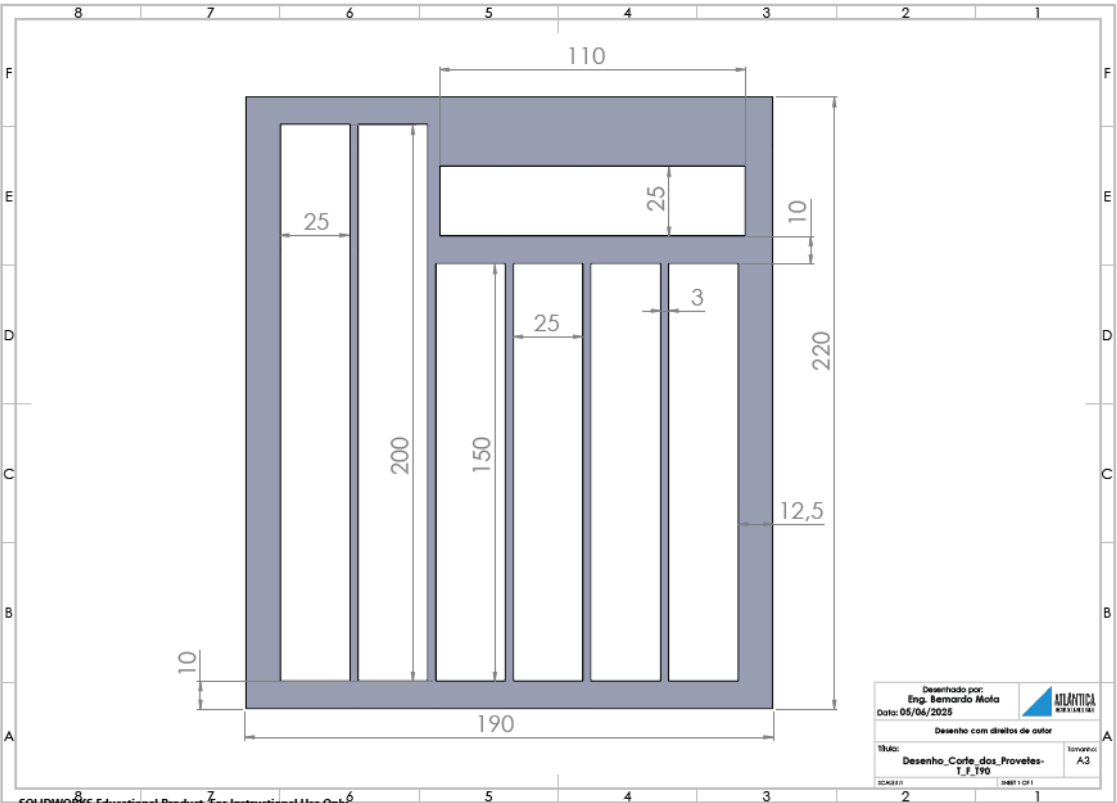


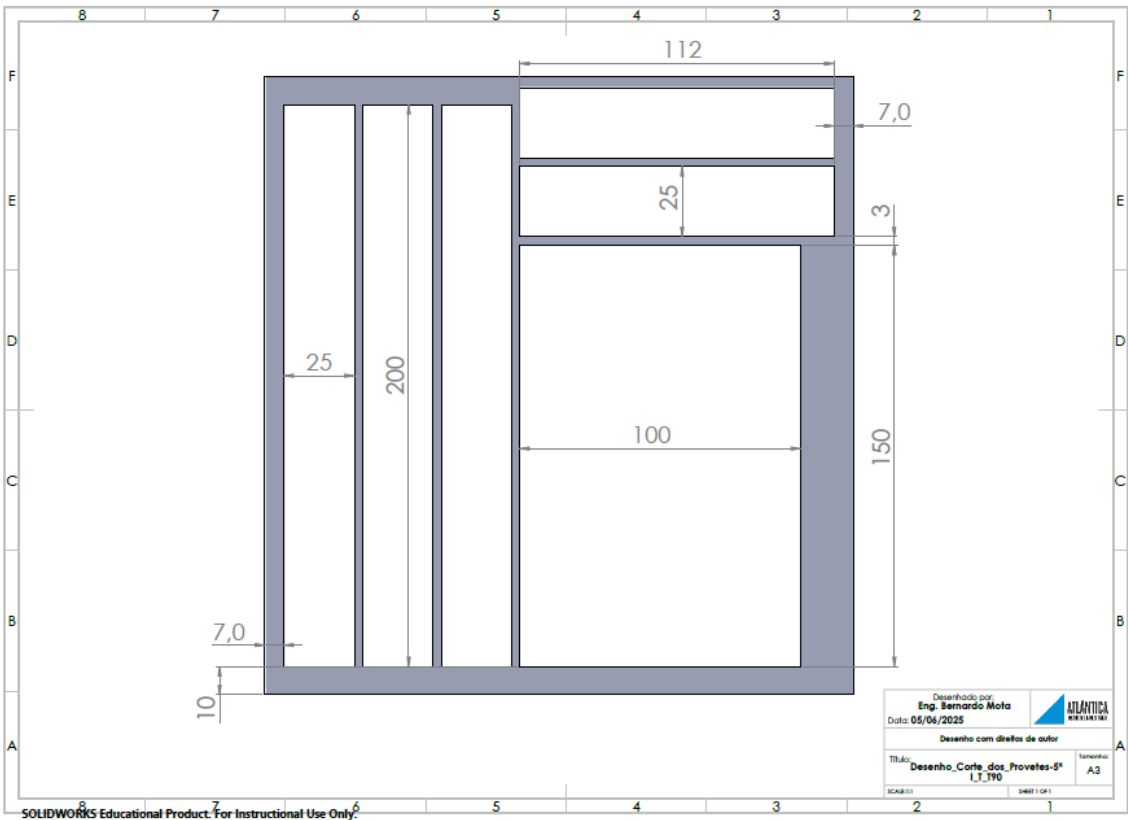


Anexo E. Desenhos técnicos da placa usada



Anexo F. Desenho Técnico do corte dos provetes





Anexo G. Forno – Memmert UNB-500 - Ficha Técnica

Universal Ovens, Memmert

BASIC:

with microprocessor PID temperature controller with integral autodiagnostic system for rapid fault identification, 1 high-grade Pt100 sensor DIN Class A in 4-wire-circuit, digital timer to switch off heating (1 min. up to 99 h 59 min), incl. digital LED-display of set and actual temperature as well as residual time; double overtemperature protection - in case of a faulty sensor or the total breakdown of the controller the heating is switched off approx. 10°C above the set temperature and additionally at approx. 10°C above the max. oven temperature by the mechanical temperature limiter TB protection class 1.

EXCELLENT:

with fuzzy-supported microprocessor PID controller with integral autodiagnostic system for rapid fault identification, 2 high-grade Pt100 sensors DIN Class A in 4-wire circuit, mutually monitoring and taking over the performance, digital 7-day-program timer with real time clock with group function (e.g. weekdays) for one set value or in combination with the integrated digital timer (with residual time) for ramp operating with max. 4 segments: DELAYED ON, HEATING UP, HOLD or HOLD set-temperature-dependent (guaranteeing the hold period), COOLING DOWN - each segment adjustable from 1 min to 999 hours. Integrated long-term documenting (ring store) of all relevant data, GLP-conforming as data logger - 1024 kB as well as serial computer interface RS232 with software „Celsius“. Triple overtemperature protection: in case of overtemperature due to failure, the heating is switched off at approx. 10°C above the set temperature (fixed value), digitally adjustable electronic overtemperature controller, TWW, protection class 3.1, and mechanical temperature limiter, TB, protection class 1, switching the heating off at approx. 10°C above max. oven temperature. Works calibration certificate for one temperature, 160°C (chamber center).

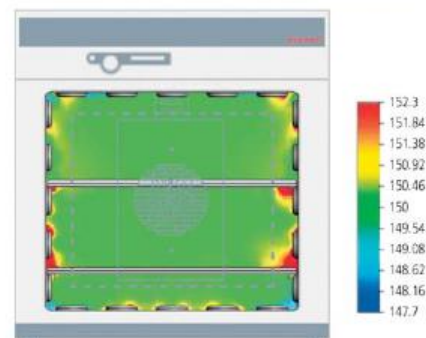
PERFECT:

adaptive, fuzzy-supported, multifunctional and digital microprocessor PID-controller and integral autodiagnostic system for rapid fault identification, 2 high-grade Pt100 sensor DIN Class A in 4-wire-circuit, mutually monitoring and taking over the performance, digital 7-day-program timer with real time clock with group function (e.g. weekdays), integrated timer (with residual time) for thermostating profiles of up to 40 ramps, each segment adjustable from 1 min. up to 999 hours (residual time); air flap adjustable in 10% steps, on UF models fan speed adjustable in 10% steps, as well as setpoint dependent operation easily programmable, via set-up) visualizing also all set parameters. Integrated long-term documenting (ring store) of all relevant data, GLP-conforming as data logger - 1024 kB (protected against manipulation); parallel printer interface with real-time clock for all Pci3-compatible ink-jet printers, serial interface RS232 (upon request - without extra charge - RS485) incl. software „Celsius“ as well as MEMORY Card with 32 kB. Multiple overtemperature protection with audible and visual alarm, digitally adjustable electronic protection with audible and visual alarm, digitally adjustable electronic microprocessor overtemperature controller TWW protection class 3.1 - maximum value for overtemperature - minimum value for undertemperature, additionally adjustable auto-safety-function „ASF“ for over-and undertemperature automatically following the set value at a preset tolerance range; audible alarm is activated in case of over- or undertemperature, heating is switched off in case of overtemperature, additional mechanical temperature limiter, TB, protection class 1, switching the heating off at approx. 10°C above max. oven temperature. Work calibration certificate for one temperature, 160°C (chamber center).

Technical data:

Interior:	made of stainless steel No. 1.4301 (ASTM 304), high stability by deep-drawn ribbing, easy to clean and drip-water proof.
Housing (exterior):	textured stainless steel, rear zinc-plated steel: (UNE/UFE/UNP/UFP 800 on lockable castors).
Temperature ranges:	basic equipment from 30°C (however, at least 5°C above room temperature) up to 220°C (BASIC) up to 250°C (EXCELLENT and PERFECT). Special equipment up to 300°C (only for EXCELLENT and PERFECT) at extra cost.
Temperature deviations:	at 150°C accuracy BASIC/EXCELLENT and PERFECT better than $\pm 0.5^\circ\text{C}$, uniformity at 150°C BASIC/EXCELLENT and PERFECT better than $\pm 2.7^\circ\text{C}/2.2^\circ\text{C}$
Electrical supply:	230 V ($\pm 10\%$) up to model size 600, from model size 700 three-phase current 400 V 3 ph N (CEE plug, 16-A version). Other voltages to special order.

Available models and sizes with fully insulated stainless steel door with double locking:



Wärmeverteilung UFE 400 bei 150°C $\pm 1.3^\circ\text{C}$



Series UNB¹⁾, ²⁾

With natural air circulation and electronic PID control.

Type	Outer W x D x H mm	Inner W x D x H mm	Vol. approx. l	Wght approx. kg	P rating approx. W	Order No.
UNB 100	470x325x520	320x175x240	14	20	600	41 26 00100
① UNB 200	550x400x600	400x250x320	32	28	1100	41 26 00200
UNB 300	630x400x600	480x250x320	39	30	1200	41 26 00300
UNB 400	550x480x680	400x330x400	53	35	1400	41 26 00400
UNB 500	710x550x760	560x400x480	108	50	2000	41 26 00500

Series UNE¹⁾, ²⁾

With natural air circulation and electronic PID control with fuzzy support.

Type	Outer W x D x H mm	Inner W x D x H mm	Vol. approx. l	Wght approx. kg	P rating approx. W	Order No.
UNE 200	550x400x600	400x250x320	32	28	1100	41 26 10200
UNE 300	630x400x600	480x250x320	39	30	1200	41 26 10300
② UNE 400	550x480x680	400x330x400	53	35	1400	41 26 10400
UNE 500	710x550x760	560x400x480	108	50	2000	41 26 10500
UNE 600	950x650x920	800x500x640	256	87	2400	41 26 10600
UNE 700	1190x650x1080	1040x500x800	416	121	4000	41 26 10700
UNE 800	1190x750x1620	1040x600x1200	749	170	4800	41 26 10800

Series UNP¹⁾, ²⁾

With natural air circulation and multifunctional PID Process controller with fuzzy support.

Type	Outer W x D x H mm	Inner W x D x H mm	Vol. approx. l	Wght approx. kg	P rating approx. W	Order No.
UNP 200	550x400x600	400x250x320	32	28	1100	41 26 20200
UNP 300	630x400x600	480x250x320	39	30	1200	41 26 20300
UNP 400	550x480x680	400x330x400	53	35	1400	41 26 20400
UNP 500	710x550x760	560x400x480	108	50	2000	41 26 20500
UNP 600	950x650x920	800x500x640	256	87	2400	41 26 20600
UNP 700	1190x650x1080	1040x500x800	416	121	4000	41 26 20700
UNP 800	1190x750x1620	1040x600x1200	749	170	4800	41 26 20800

Series UFB¹⁾, ²⁾

With enforced air circulation and electronic PID control.

Type	Outer W x D x H mm	Inner W x D x H mm	Vol. approx. l	Wght approx. kg	P rating approx. W	Order No.
UFB 400	550x480x680	400x330x400	53	35	1400	41 26 30200
UFB 500	710x550x760	560x400x480	108	50	2000	41 26 30300

Series UFE¹⁾, ²⁾

With enforced air circulation and electronic PID control with fuzzy support.

Type	Outer W x D x H mm	Inner W x D x H mm	Vol. ap- prox. l	Wght approx. kg	P rating approx. W	Order No.
UFE 400	550x480x680	400x330x400	53	35	1400	41 26 40400
③ UFE 500	710x550x760	560x400x480	108	50	2000	41 26 40500
UFE 600	950x650x920	800x500x640	256	87	2400	41 26 40600
UFE 700	1190x650x1080	1040x500x800	416	121	4000	41 26 40700
UFE 800	1190x750x1620	1040x600x1200	749	170	4800	41 26 40800

Series UFP¹⁾, ²⁾

With enforced air circulation and multifunctional PID process controller with fuzzy support.

Type	Outer W x D x H mm	Inner W x D x H mm	Vol. ap- prox. l	Wght approx. kg	P rating approx. W	Order No.
UFP 400	550x480x680	400x330x400	53	35	1400	41 26 50400
UFP 500	710x550x760	560x400x480	108	50	2000	41 26 50500
④ UFP 600	950x650x920	800x500x640	256	87	2400	41 26 50600
UFP 700	1190x650x1080	1040x500x800	416	121	4000	41 26 50700
UFP 800	1190x750x1620	1040x600x1200	749	170	4800	41 26 50800

1) External dimensions: Depth without door handle, depth of door handle 38 mm.

2) Inner dimensions (Depth): On models with air turbine the depth is reduced through the air duct in the middle of the back wall: up to size 600: 30 mm, size 700/800: 45 mm

All universal ovens are designed acc. to DIN 12880:2007-05 and standard units carry the marks: EMV / VDE / GS / CE / GOST



③



④



Accessories for models BASIC-, EXCELLENT- and PERFECT**Stainless steel shelves, perforated**

for type	Qty max.	Order No.	for type	Qty max.	Order No.
100	2	41 26 00010	500	5	41 26 00050
200	3	41 26 00020	600	7	41 26 00060
300	3	41 26 00030	700	9	41 26 00070
400	4	41 26 00040	800	14	41 26 00080

Stainless steel shelves, non-perforated, non-tipping, 15 mm rim

for type	Qty max.	Order No.	for type	Qty max.	Order No.
100	2	41 26 10010	500	5	41 26 10050
200	3	41 26 10020	600	7	41 26 10060
300	3	41 26 10030	700	9	41 26 10070
400	4	41 26 10040	800	14	41 26 10080

Special equipment only for models EXCELLENT- and PERFECT

Checklists with works test data for oven as support for validation by customer.

Article	Order No.
IQ checklist with works test data as support for validation by customer.	41 26 11011
OQ checklist (size 200 and 300) with works test data, incl. a selectable temp. distribution measurement for 9 measuring points acc. to DIN 12880:2007-05	10 26 01016
OQ checklist (size 400 up to 800) with works test data, incl. a selectable temp. distribution measurement for 27 measuring points acc. to DIN 12880:2007-05	10 26 01017
USB interface instead of RS232	10 26 01014

Special equipment only for model PERFECT

Article	Order No.
Celsius FDA-Edition Software conforming to FDA	41 26 11013
Oven-related user authorization card prevents undesired manipulation by unauthorized third parties	41 26 11021
Ethernet interface instead of RS232 incl. software „Celsius Ethernet Edition“	10 26 01015

Further special equipment for EXCELLENT and PERFECT Class, such as full-sight glass door, temperature-range up to 300°C, entry ports, Pt 100 for external temperature recording, a.s.o. upon request.

We reserve the right to make changes in technical specifications. Dimensions subject to confirmation.

Anexo H. HITACHI STA 7200 – Ficha Técnica/ Especificações



The advertisement features a dark background with a purple header bar on the left. The header bar contains a logo of three spheres and the text "Simultaneous Thermogravimetric Analyzer STA7000 SERIES". On the right, the Hitachi logo is displayed with the tagline "Inspire the Next". The main title "STA7000 SERIES" is prominently shown in large white letters, followed by the subtitle "The New Standard in Horizontal Differential TG/DTA/DSC". Below this, the text "The Horizontal Digital Dual Beam System" is followed by "Drift Free Baseline, Unrivalled Stability and Low Noise Level" in orange. The advertisement lists four key features with their respective bullet points: "New Balance Control Electronics", "Optimized Reaction Gas Control", "New Temperature Control Electronics", and "Low Mass – Low Heat Capacity Furnace". A photograph of the STA7000 Series analyzer is shown on the right side. The Hitachi High-Tech Science logo is at the bottom.

**Simultaneous Thermogravimetric Analyzer
STA7000 SERIES**

HITACHI
Inspire the Next

STA7000 SERIES

The New Standard in Horizontal Differential TG/DTA/DSC

The Horizontal Digital Dual Beam System
Drift Free Baseline, Unrivalled Stability and Low Noise Level

New Balance Control Electronics

- Drift free baseline
- Wide measurement range
- Low noise, highly sensitive TG-Signal

Optimized Reaction Gas Control

- Mass flow controller for reaction gases
- High precision flow rate control
- Rapid atmosphere exchange

New Temperature Control Electronics

- Highly accurate heating and cooling profiles
- Precise temperature readings

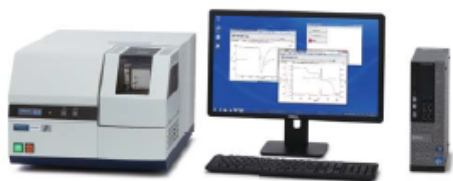
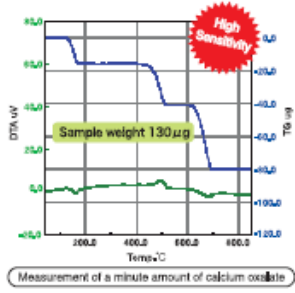
Low Mass – Low Heat Capacity Furnace

- Fast heating and cooling rates
- Automatic cooling functions
- High throughput measurements

Hitachi High-Tech Science

STA7000 SERIES

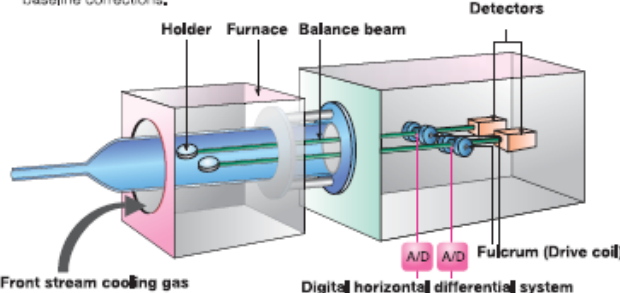
Simultaneous Thermogravimetric Analyzer

Measurement of a minute amount of calcium oxide

New Balance Control Technology - Horizontal Digital Dual Beam System -

The newly-developed "Horizontal Digital Dual Beam System" guarantees the highest baseline stability and the lowest noise levels ever seen in TG/DTA/DSC Analysis. The highly sophisticated digital analysis of the weight and DTA/DSC difference of the dual beam system allows it to correct any environmental influences such as furnace and detector positions and thermal expansion of the beams. Even minor weight changes of low sample masses can be measured and analyzed without any time consuming baseline corrections.



Digital horizontal differential system

New Temperature Control Functions

This revolutionary temperature control circuit minimises the temperature difference between program and sample temperature. The heating and cooling rate accuracy further improve the quality of the DTA/DSC and TG signal and guarantee high precision temperature readings.

Reduced Inner Dimensions

The technological improvements have made it possible to reduce the volume of the balance housing by 2/3 compared to the previous models. The benefits are the possibility of achieving an inert atmosphere without evacuation and a rapid atmosphere exchange after gas switching.

The New Cooling Method "Front Stream Cooling Gas Flow"

The compressed air flows around the furnace were optimized to increase the cooling efficiency. This drastically reduces cooling time and therefore enlarges the sample throughput.

Model name	STA7200	STA7300
Balance system	Horizontal differential type	
Temperature range	Ambient to 1100°C	Ambient to 1500°C
TG range	±400mg	
TG RMS noise / sensitivity	0.1 µg / 0.2 µg	
DTA range	±1000 µV	
DTA RMS noise / sensitivity	0.03 µV / 0.06 µV	
Scanning rates	0.01 to 150°C/min	0.01 to 100°C/min
Maximum sample weight	200mg	
Atmosphere	Air; inert gas flow; Vacuum (to 1.3Pa)	
Purge gas flow rate	0 to 1000ml/min	
Cooling time	From 1000°C to 50°C within 12minutes	
Gas purge control (option)	Flow Meter, Gas Controller, Mass Flow Controller	
Auto sampler (option)	50 samples; mechanical arm transport	
Dimensions	420(W) × 600(D) × 315(H)mm, With auto-sampler attached: 420(W) × 600(D) × 640(H)mm	

Hitachi High-Tech Science Corporation

<http://www.hitachi-hightech.com/hhs/>

Head Office Sales Division
24-14, Nishi-shimbashi, 1-chome, Minato-ku Tokyo 105-0003, Japan

Hitachi Instruments (Shanghai) Co., Ltd.
Hitachi High-Technologies America, Inc.
Hitachi High-Technologies Europe GmbH [Mannheim office]

Telephone : +81-3-6280-0062

<http://www.hitachi-hightech.com/hig/>
<http://www.hitachi-hta.com/>
<http://www.hht-eu.com>

2014-015-TAE3

Anexo I. INSTRON 5966 – Ficha Técnica/Especificações



5960 Series | Dual Column Tabletop

5960 Series systems perform tensile, compression, bend, peel, tear, puncture, creep, and cyclic tests on all raw materials and finished goods. These testing instruments are engineered for precision, built for durability, and offer flexibility for changing requirements. They are designed with features that increase testing efficiency and improve the testing experience for the operator.

The performance and versatility of the 5960 Series systems makes them the industry standard throughout the biomedical, automotive, and electronics industries to test materials and products made from plastics, metals, elastomers, adhesives, biomedical devices, composites, textiles, and more. The wide variety of global testing applications has led us to offer multiple height and width systems in a range of maximum force capacities such as 5, 10, 30, and 50 kN.

Features

- Meets or exceeds requirements of all national and international standards; namely ISO, ASTM, BS, DIN, EN, and AFNOR
- Thousands of accessories to meet test requirements in almost any application or industry: biomedical, automotive, electronics, plastics, metals, composites, elastomers, aerospace, textiles, and many more
- Supported by the largest global Service organization in the industry; delivering high-quality calibrations, training, preventative maintenance, and technical support
- Productivity Panel with Live Display, Soft keys and Specimen Protect for enhanced usability and productivity



Bluehill® Universal and Instron® Connect

Designed from the ground up for touch, Instron's static testing software, Bluehill Universal, is easy-to-use, increases testing efficiency, and contains modular features that enable users to run the most complex of tests.

With ISO 9001 accreditation, our goal is to provide the best ownership experience by delivering the highest quality products, expert support, and world-class service. Instron Connect provides users with a powerful communication platform via a secure connection between the Instron system at your facility and Instron's global technical support engineers. With Instron Connect, users receive faster remote technical support, reduce risk with schedule verification and preventive maintenance reminders, and are effortlessly able to keep up to date with the latest software features.

Products for Materials Testing

Specifications

		5965	5966	5967	5969
Force Capacity ¹	kN	5	10	30	50
	lbf	1125	2250	6750	11250
Vertical Test Space ^{3,8}	mm	1256 (E1) 1756 (E2)	1256 (E1) 1756 (E2)	1212 (E1) 1712 (E2)	1212 (E1) 1712 (E2)
	in	49.4 (E1) 69.1 (E2)	49.4 (E1) 69.1 (E2)	47.7 (E1) 67.4 (E2)	47.7 (E1) 67.4 (E2)
Horizontal Test Space ⁴	mm	418	418	418 (F1) 946 (F2)	418
	in	16.4	16.4	16.4 (F1) 37.1 (F2)	16.4
Testing Speed Range Min-Max (Return)	mm/min	0.001-3000 (3200)	0.001-1500 (1700)	0.001-1000 (1000)	0.001-600 (600)
	in/min	0.00004-120 (128)	0.00004-60 (67)	0.00004-40 (40)	0.00004-24 (24)
Position Control Resolution	nm	167	86	45	27
	µin	6.6	3.4	1.8	1.1
Frame Axial Stiffness	kN/mm	60	60	115 (F1) 75 (F2)	180
	lb/in	342600	342600	657000 (F1) 428300 (F2)	1027800
Maximum Force at Full Speed	kN	5	10	30	50
	lbf	1125	2250	6750	11250
Maximum Speed at Full Force	mm/min	3000	1500	1000	600
	in/min	120	60	40	24
Height	cm	163 (E1) 216 (E2)	163 (E1) 216 (E2)	163 (E1) 216 (E2)	163 (E1) 216 (E2)
	in	64 (E1) 85 (E2)	64 (E1) 85 (E2)	64 (E1) 85 (E2)	64 (E1) 85 (E2)
Width ⁵	cm	78	78	78 (F1) 128 (F2)	78
	in	31	31	31 (F1) 51 (F2)	31
Depth	cm	73	73	73	73
	in	29	29	29	29
Weight	kg	146 (E1) 161 (E2)	146 (E1) 161 (E2)	192 (E1+F1), 210 (E2+F1), 435 (E1+F2), 453 (E2+F2)	250 (E1) 273 (E2)
	lbs	322 (E1) 355 (E2)	322 (E1) 355 (E2)	423 (E1+F1), 463 (E2+F1), 959 (E1+F2), 999 (E2+F2)	551 (E1) 602 (E2)
Maximum Power Requirement	VA	900	900	900	900

Notes:

1. Meets or exceeds ASTM E4, BS 1810, DIN 51221, ISO 7500-1, EN 10002-2, JIS B7721, JIS B7733, and AFNOR A03-501 standards. Instron recommends that systems are verified on-site at the time of installation as required by ASTM E4 (par. 20.3) and ISO 7500-1 section 8) standards.
2. All systems conform to all relevant European standards and carry a CE mark.
3. Vertical test space on all systems is the distance from the top surface of the base platen to the bottom surface of the moving crosshead, excluding load cell grips and fixtures.
4. Horizontal test space on dual column systems is the distance between the inside edge of the columns.
5. This is the system footprint width. The Operator Dashboard monitor may add 300mm (12in) to the overall width of the frame.
6. These specifications were developed in accordance with Instron's standard procedures and are subject to change without notice.
7. Extra-high or wide load frames and extra-high or low speed drive systems are also available. Contact your nearest Instron office for details.
8. F2 width option on 5967 uses a thicker crosshead and base beam reducing vertical test space by 10mm

5960 Series | Dual Column Tabletop

Common Specifications

Force Measurement Accuracy:
± 0.4% of reading down to 1/100 of load cell capacity with 2525, 2530 or 2580 Series load cells; ± 0.5% of reading down to 1/1000 of load cell capacity with 2580 Series load cells (with Advanced Performance Option); ± 0.5% of reading down to 1/500 of load cell capacity with 2580 Series load cells; ± 0.5% of reading to 1/250 of load cell capacity with 2525 or 2530 Series load cells. ¹

Displacement Measurement Accuracy:
±0.01 mm or 0.05% of displacement (whichever is greater)

Strain Measurement Accuracy:
Meets or surpasses the following standards:
ASTM E83, ISO 9513, and EN 10002-4.

Testing Speed Accuracy:
(Zero or constant load): ±0.1% of set speed

Data Acquisition Rate at the PC:
Up to 2.5 kHz (Advanced option) simultaneous on force, displacement, and strain channels, 1 kHz (Standard)

Facility Requirements and Operating Environment

Single Phase Voltage:
100, 120, 220, or 240 VAC ±10%, 47 to 63 Hz.
Power supply must be free of spikes, surges or sags exceeding 10% of the average voltage.

Operating Temperature:
+10 to +38 °C (+50 to +100 °F)

Storage Temperature:
-40 to +66 °C (-40 to +150 °F)

Humidity Range:
+10 to +90%, non-condensing

Atmosphere:
Designed for use under normal laboratory conditions. Protective measures may be required if excessive dust, corrosive fumes, electromagnetic field, or hazardous conditions are encountered.

www.instron.com


Worldwide Headquarters
825 University Ave, Norwood, MA 02062-2643, USA
Tel: +1 800 564 8378 or +1 781 575 5000

European Headquarters
Coronation Road, High Wycombe, Bucks HP12 3BY, UK
Tel: +44 1494 464646

Instron is a registered trademark of Illinois Tool Works Inc. (ITW). Other names, logos, icons and marks identifying Instron products and services referenced herein are trademarks of ITW and may not be used without the prior written permission of ITW. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. Copyright © 2017 Illinois Tool Works Inc. All rights reserved. All of the specifications shown in this document are subject to change without notice.

5960SeriesDualColumnTabletop_FodV8

Anexo J. Ficha Técnica - Chemlease PMR HS EU



Chemlease® PMR HS EU Solvent-Based Semi-Permanent Release Agent



Description

Chemlease® PMR HS EU is the latest evolution of the trusted PMR family of semi-permanent release agents for composites molding applications. Chemlease® PMR HS EU is a high slip semi-permanent release agent specifically formulated to release the most challenging resins used in composites molding. This product is especially useful for closed mold applications. Chemlease® PMR HS EU is an ideal choice for releasing abrasive low draft parts, while maintaining a Class A, high gloss mold finish.

Benefits

- Multiple releases between applications
- Easy to apply
- Reduces labor time and costs
- Minimizes resin build-up

Mold Preparation

1. Mold surfaces should be thoroughly cleaned to remove all traces of wax, release agents, sealers and buffing compounds. Do a final cleaning of mold surface with the appropriate Chemlease® Mold Cleaner.
2. It is not necessary to seal the mold with a traditional mold sealer. If, however the mold is very porous, such as with tooling boards or 3D printed substrates, treatment with the appropriate Chemlease® mold primer is recommended, prior to application of release agent.

Application

1. Saturate clean cotton cloth (not dripping) and wipe on a smooth continuous film. Apply no more than a few square feet at a time.
2. When the film begins to evaporate at the edge, wipe the surface with a second clean dry cotton cloth. Use a circular motion from the outside, working inwards until film is left dry and clear. See Note.
3. Continue in this manner until entire mold surface has been covered.
4. Apply 3 - 5 total coats, allowing a minimum of 15 minutes to cure between each complete coat.
5. Allow 30 minutes for full cure, prior to gel coat application, layup, or molding.
6. When release becomes difficult, reapply 1 or more coats of Chemlease® PMR HS EU in the same manner, allowing 15 minutes between and 30 minutes after the final coat.

Note

Time will vary with room and mold temperature. Wipe off as the solvent begins to evaporate. If the release agent is left on too long, you may notice some smearing or streaking. To remove the smear or streak, wipe the affected area with the same Chemlease® release agent, then wipe off the area immediately following.

Important

The recommended number of coats and cure times are a general guideline found to be more than sufficient in a broad spectrum of molding conditions. When molding products with extreme geometries or experiencing low-humidity conditions in the shop, the customer may find the need to extend the cure time between coats and increase the number of coats applied to the mold. The efficiency of a release film is best determined through a combination of tape tests and experimentation.

Storage

Do not store at temperatures above 49°C/120°F. Keep container tightly sealed to prevent evaporation and/or contamination. If stored in cold temperatures allow warming to room temperature before using.

Packaging

Chemlease® PMR HS EU is available in a variety of package sizes. Please contact Chem-Trend customer service for details.

Safety Data

Safety Data Sheets are available for all Chemlease® products and should be consulted prior to use of the product.

Further Information

Request information on our complete range of materials for this industry.

Legal Notice

The technical information and suggestions for use contained herein is based on our general experience and knowledge at the time of publication and is intended to give information of possible applications to a professional with technical experience. It does not release the customer from the obligation of performing own tests with the product selected for a specific application. While the information and suggestions are believed to be accurate and reliable, nothing stated in this bulletin is to be taken as a warranty either expressed or implied.



Chem-Trend (Deutschland) GmbH | Ganghoferstr. 47 | 82216 Maisach-Germlinden, Germany
Tel +49 8142 417 0 | Fax: +49 8142 15884 | ChemTrend.com
Issue: 06/2022, replaces -/-, Page 1 of 1, Chemlease® PMR HS EU

Copyright © Chem-Trend L.P., All Rights Reserved

Anexo K. Ficha Técnica - Chemlease 2693W



TECHNICAL SHEET
Emission date 09/04/2018

PÁGINA 1/2

Solvent-Free Semi-Permanent Release Agent **CHEAMLEASE 2693W**

DESCRIPTION

Chemlease® 2693W is a high performance release coating that has been created to give multiple releases.

Chemlease® 2693W is so versatile that it can be used for most moulding operations.

BENEFITS

- Thermal stability: 260°C (500°F)
- Aerospace approved
- Fast, room temperature application
- Easy recoat / touch-up
- Low odor and solvent-free
- Non-flammable
- High slip / lubricity
- Wipe-applied
- High gloss

USES

Chemlease® 2693W is recommended for releasing epoxies, phenolics, polyester resins, polyamides, polybismaleimides, various rubbers and elastomers. Chemlease® 2693W can be used on moulds that are exposed to wear or abrasion during the moulding and demoulding processes.

APPLICATION

Before applying Chemlease® 2693W: All previous surface treatments, residues, waxes or oils should be removed using the appropriate Chemlease® mould cleaner. The mould should be properly sealed with a Chemlease® mould sealer according to the technical data sheet.

1. Apply one light coat of Chemlease® 2693W to a small area of the mould (approx. 0.2 m²) using a clean, lint-free cloth or hand sprayer.
2. Wait 30 seconds and wipe the mould surface

dry using a separate clean cloth. Make sure the entire mould surface is coated in this manner, slightly over-lapping the last coated area if you are applying in sections. Be certain that all contours are adequately coated.

3. Wait for a minimum of 15 minutes.
4. Apply a second coat of Chemlease® 2693W in the same way, and wait for a minimum of 30 minutes before using mould.
5. For touch-ups, apply a single coat of Chemlease® 2693W as above and allow 30 minutes for cure before using the mould.

STORAGE

Store product between 5°C and 30°C (41°F and 86°F). Shelf life is 18 months from the date of manufacture, in the original unopened container.

HANDLING

We believe Chemlease® 2693W has a low degree of hazard when used as intended. For more information, request a copy of Chem-Trend's Safety Data Sheet.

PACKAGING

Chemlease® 2693W is available in a variety of package sizes. Please contact Chem-Trend customer service for details.

MORE INFORMATION



Chem-Trend (Deutschland) GmbH
Ganghoferstr. 47
82216 Maisach-Gernlinden, Germany

RESINAS CASTRO S.L.
Pol. Ind. A Granxa, 3ª Paralela
C/Cies 190, 36400 O Porriño – ESPAÑA

Tlf.: +34 986 342 955 Fax: +34 986 342 520
E-mail: shop@castrocomposites.com
Web: www.castrocomposites.com



TECHNICAL SHEET
Emission date 09/04/2018

PÁGINA 2/2

Tel +49 8142 417 0 | Fax: +49 8142 15884
www.ChemTrend.com
Issue: 03/2018 replaces -/-

LEGAL NOTICE

The information contained in this document is given in good faith based on our current knowledge. It is **only an indication and in no way binding**, particularly as regards infringement of or prejudice to third party rights through the use of our products. Chem- Trend warrants only that it's products will meet it's sales specifications. This information must on no account be used as a substitute for necessary prior tests which alone can ensure that a product is suitable for a given use. Users are requested to check that they are in possession of the latest version of this document and Chem-Trend is at their disposal to supply any additional information.

RESINAS CASTRO S.L.
Pol. Ind. A Granxa, 3ª Paralela
C/Cíes 190, 36400 O Porriño – ESPAÑA

Tlf.: +34 986 342 955 Fax: +34 986 342 520
E-mail: shop@castrocomposites.com
Web: www.castrocomposites.com