



Pultrusão de Compósitos Termoplásticos com Pré-impregnados Tape e Towpreg

JOÃO MACHADO RAMOS

outubro de 2024

**Pultrusão de Compósitos Termoplásticos com Pré-impregnados
Tape e Towpreg**

João Machado Ramos

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Construções Mecânicas**

Orientador: Puria Esfandiari

Júri: Luís Miranda

Presidente: Raúl Campilho

Porto, setembro 2024

Porto, setembro 2024

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradecer aos meus pais, Maria José e Rui, por tudo o que fizeram e abdicaram para que fosse possível eu adquirir uma boa formação e este grau académico. Gostaria de agradecer também às minhas irmãs, Adriana e Rita, por me sempre apoiarem nas minhas decisões e estarem sempre lá para me ajudar e motivar. Agradecer também à minha avó, Maria Madalena, que certamente estará orgulhosa por todo o meu percurso.

A realização deste trabalho foi só possível pela preciosa ajuda do Professor Doutor Púria Esfandiari, que apesar de todas as adversidades ocorridas durante a realização da dissertação, sempre transmitiu segurança e confiança na resolução dos problemas. Um profundo agradecimento por todos os conhecimentos que transmitiu e pela amizade na realização da dissertação.

Um profundo agradecimento à Professora Ana Rita Caixeiro Dias Carreiras, por toda a disponibilidade demonstrada na realização deste trabalho e pela sua amizade. O seu papel foi crucial para a realização deste trabalho e por isso queira destacar a minha gratidão.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, em especial aos docentes e técnicos dos laboratórios pelo apoio.

Por fim deixar o meu agradecimento a todas as pessoas que me acompanharam no meu percurso académico, mas especialmente aos amigos que o ISEP me proporcionou, Gui Yang Fu, Diogo Moreira, Bruno Teles e Diogo Santos. Agradecer-vos pelo vosso apoio, amizade e pelas vivências que partilhamos nestes últimos 5 anos.

Resumo

A pultrusão de compósitos termoplásticos com a utilização de pré-impregnados tape e towpreg é uma técnica moderna de fabricação de materiais compósitos leves e resistentes. No processo de pultrusão, as fibras de reforço são puxadas continuamente e são impregnadas com polímero termoplástico, e por fim consolidadas em vários tipos de perfis com forma constante.

Os termoplásticos, quando usados como matriz, oferecem vantagens em relação aos materiais termoendurecíveis, onde permitem a aquisição de maior resistência ao impacto, melhor capacidade de reciclagem e tempos de processamento mais curtos, uma vez que a cura química não é necessária. No entanto, o processo de pultrusão requer um controle preciso da temperatura, da velocidade de puxo durante a fusão, a consolidação e adesão entre a matriz termoplástica e as fibras de reforço.

Nesta dissertação, foi realizado a produção de pré-impregnados de fibras com matriz termoplástica, para serem transformados pelo processo de pultrusão. As fibras de carbono (FC) e de vidro (FV) foram utilizadas como reforço, enquanto o polipropileno (PP) e o polietileno tereftalato de etileno (rPET) foram as matrizes termoplásticas utilizadas, constituindo assim compósitos híbridos

Durante a produção de perfis compósitos, as condições de processamento foram otimizadas para estudar a influência da variação dos parâmetros nas propriedades finais dos compósitos. Ensaio de flexão e tração foram realizados, juntamente com testes de calcinação para ser possível a determinação de frações mássicas e volumétricas das fibras, permitindo a comparação entre as propriedades esperadas teoricamente com as obtidas experimentalmente.

Palavras-chave: Pultrusão, Compósitos Termoplásticos, Pré-impregnados, Fibras Towpreg, Polipropileno, PET reciclado

Abstract

Pultrusion of thermoplastic composites using tape and towpreg is a modern technique for manufacturing lightweight and resistant composite materials. In the pultrusion process, the reinforcing fibres are pulled continuously and are impregnated with thermoplastic polymer, and finally consolidated into various types of profiles with a constant shape.

Thermoplastics, when used as a matrix, offer advantages over thermosetting materials, where they enable the acquisition of greater impact resistance, better recyclability and shorter processing times, since chemical curing is not necessary. However, the pultrusion process requires precise control of the temperature, the pulling speed during melting, consolidation and adhesion between the thermoplastic matrix and the reinforcing fibre, thus constituting hybrid compounds.

In this dissertation, the production of fibre prepregs with a thermoplastic matrix was carried out, to be transformed by the pultrusion process. Carbon fibres (CF) and glass fibres (GF) were used as reinforcements, while polypropylene (PP) and polyethylene terephthalate (rPET) were the thermoplastic matrices used.

During the production of composite profiles, processing conditions were optimised to study the influence of parameter variations on the final properties of the composites. Bending and tensile tests were carried out, along with calcination tests to determine the mass and volume fractions of the fibres, enabling a comparison between the properties expected theoretically and those obtained experimentally.

KEYWORDS: Pultrusion, Thermoplastic composites, Prepregs, Towpreg, Polypropylene, Recycled PET.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Compósitos de Matriz Polimérica	5
2.1.1. Mercado de compósitos termoplásticos	5
2.2. Pré-impregnados de Matriz Termoplástica.....	8
2.2.1. Fibras de reforço	9
2.3. Semi-Produtos.....	12
2.3.1. Compostos de moldação	12
2.3.2. Pré-impregnados	13
2.4. Produção de Pré-impregnados de matriz termoplástica	14
2.4.1. Produção de pré-impregnados de matriz termoplástica com fibras contínuas .	15
2.5. Transformação de Compósitos Termoplástico	21
2.5.1. Pultrusão	22
2.6. Sustentabilidade e reciclabilidade do processo de pultrusão.....	24
3. Procedimento Experimental	27
Matérias-Primas.....	27
3.1.1. Fibras de Reforço	27
3.1.2. Matriz termoplástica.....	29
3.2. Transformação dos Pré-impregnados.....	31
3.2.1. Produção de compósitos por Pultrusão.....	31
3.3. Ensaio Mecânicos e Analíticos	35
3.3.1. Ensaio de Calcinação.....	36
3.3.2. Ensaio de Tração.....	39
3.3.3. Ensaio de Flexão	41
4. Apresentação e análise dos resultados obtidos	45
4.1. Transformação por Pultrusão.....	45
4.2. Produção dos perfis pultrudidos com <i>towpreg</i>	48
4.3. Produção como Tapes rPET/FC	50
4.4. Ensaio de Calcinação	51
4.5. Caracterização Mecânica	52
4.5.1. Ensaio de Tração	52
4.5.2. Ensaio de Flexão.....	54
4.6. Comparação das propriedades obtidos experimentalmente com os valores teóricos	56
5. Conclusão.....	59

5.1. Conclusões finais.....	59
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	60

Lista de Figuras

Figura 1 - Consumo dos compósitos termoplásticos 2021, adaptado de [4].....	6
Figura 2 – Tendência dos mercados de compósitos termoplásticos [5].....	7
Figura 3 - Mercado de materiais compósitos no mundo 2020, adaptado de [6]	7
Figura 4 - Representação esquemática da produção de fibras de vidro, adaptado de [3].....	9
Figura 5 - Processo de produção de fibras de carbono a partir do PAN, adaptado de [3]	11
Figura 6 – Impregnação de fibras por um termoplástico, sob ação de uma pressão eterna [1] 14	
Figura 7 - Procedimento para a impregnação por solução [18]	16
Figura 8 - Representação esquemática do procedimento de produção de fitas pré-impregnados [13].....	17
Figura 9 - <i>Commingled Fibers</i> [21]	18
Figura 10 – Processo alternativo de <i>commingling</i>	18
Figura 11 - Produção de <i>commingled fibres</i> [23]	19
Figura 12 - Representação esquemática do <i>Towpreg</i> [13]	20
Figura 13 – Configuração do processo esquemático do processo de impregnação por pó [24] 20	
Figura 14 – Gráfico de relação entre tempo e temperatura (janela de processamento) [23] ..	21
Figura 15 – Representação esquemática da moldação por pultrusão termoendurecíveis [3]..	23
Figura 16 – Pultrusão de Pré-impregnados Termoplásticos [24].....	23
Figura 17 – Ciclo económico do plástico [30]	24
Figura 18 – Polipropileno em pó	29
Figura 19 – Máquina de Pultrusão ISEP	31
Figura 20 – Carrinho de abastecimento com bobines	32
Figura 21 – Forno de pré-aquecimento	33
Figura 22 – Fieira de aquecimento com as resistências.....	34
Figura 23 – Fieira de arrefecimento.....	34
Figura 24- -Carrinhos do sistema de puxo	35
Figura 25 - Forno mufla NABERTHERM LHT08/16	36
Figura 26 – Balança de Precisão [23]	36
Figura 27 – Equipamento de ensaios SHIMADZU AG-X 100 kN [23].....	39
Figura 28 - Equipamento de Ensaio Mecânicos Shimadzu	41
Figura 29 – Esquema ensaio flexão em 3 pontos.....	42
Figura 30 – Dimensões da secção dos perfis produzidos.....	46
Figura 31 – Posicionamento do provete para o ensaio de tração	52
Figura 32 - Resultados dos ensaios de tração.....	57
Figura 33 – Resultados dos ensaios de flexão.....	58

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades das fibras de vidro, adaptado de [8]	9
Tabela 2 - Propriedades mecânicas das fibras de carbono [3]	10
Tabela 3 - Propriedades mecânicas das Fibras de Aramida, adaptado de [11]	12
Tabela 4 – Propriedades mecânicas da Fibra de carbono [33]	28
Tabela 5 – Propriedades mecânicas da Fibra de vidro [35]	28
Tabela 6 – Propriedades ICORENE® 4014 (PP)	30
Tabela 7 – Propriedades do rPET	30
Tabela 8 –Número de Bobines do material do Towpreg FC/PP e FV/PP	47
Tabela 9 - Número de Bobines tape rPET/FC.....	47
Tabela 10 – Condições e parâmetros do processo de pultrusão Towpreg	49
Tabela 11 - Condições e parâmetros do processo de pultrusão Prepreg	50
Tabela 12 - Resultados obtidos pelo ensaio de calcinação	51
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de tração	53
Tabela 14 – Tensão de Rotura máxima	53
Tabela 15 - Propriedades obtidas pelos ensaios de flexão	54
Tabela 16 – Comparação dos resultados experimentais com teóricos	56

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

CFRT	Contínuos Fibre Reinforced Thermoplastic
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LFRP	Long Fibre Reinforced Plastic
LFRT	Long Fibre Reinforced Thermoplastic
CFRP	Plástico reforçado com fibra de carbono
PA	Poliamida
PAN	poliacrilonitrilo
PC	Policarbonato
PP	Pilitileno tereftalato
PE	Polietileno
RTM	Resin Transfer Moulding
SFRT	Short Fibre Reinforced Thermoplastic
SMC	Sheet Molding Compound
BMC	Bulk Molding Compound
TMC	Thick Molding Compound
DMC	Dough Molding Compound
GMT	Granular Molding Compound
EMC	Epoxy Molding Compound
FC	Fibras de Carbono

Lista de Símbolos

cm	centímetro
GPa	gigapascal
°C	grau Celsius
kg	quilograma
MPa	megapascal
m	metro
mm	milímetro
N	newton
ton	tonelada

1. Introdução

Neste capítulo será efetuado uma contextualização do tema de investigação, como também serão demonstrados os principais objetivos para a sua realização deste trabalho.

1.1. Contextualização

Um material compósito consiste numa combinação de dois ou mais materiais distintos, em que através dessa ligação se permite a obtenção de propriedades mecânicas e físicas mais interessantes às dos constituintes separadamente.

A facilidade de processamento e a baixa densidade dos polímeros fazem com que os compósitos de matriz polimérica sejam atualmente os mais importantes em termos de desempenho, nas aplicações de engenharia. São muitas indústrias que têm utilizado os materiais compósitos como forma de tirar proveito das propriedades mecânicas que permitem obter, como por exemplo a indústria aeronáutica, aeroespacial, automóvel, naval e mesmo construção civil.

As matrizes poliméricas podem ser divididas em termoplásticas e termoendurecíveis. Apesar dos polímeros termoendurecíveis serem mais fáceis de processar pela baixa viscosidade durante processamento, a reciclagem e reprocessamento nestes materiais não é possível. Os termoplásticos, de forma geral, apresentam melhor resistência ao impacto e melhor tenacidade e ductilidade, quando comparados com os termoendurecíveis. Permitem também ambientes de trabalho mais limpos, devido à inexistência de emissões de estireno que podem afetar a saúde dos operadores, garantem uma maior facilidade na reciclagem do reprocessamento e de reparação de peças.

O principal problema da utilização de matrizes termoplásticas para compósitos, é a dificuldade de impregnação do reforço fibroso com este tipo de polímero que apresenta elevada viscosidade durante processamento, afetando a consolidação do compósito final, onde com o aparecimento de novas tecnologias de transformação que permite o fabrico de compósitos de matriz termoplástica, requer essencialmente a aplicação de temperatura e pressão

Introdução

Apesar da utilização de compósitos de matriz termoplástica de fibras curtas continuarem a ter uma grande relevância no mercado, a procura de termoplásticos com fibras longas e contínuas tem sido cada vez mais requisitada maior tendo em conta a melhoria das características. Sendo assim, têm sido cada vez mais estudados ao longo dos anos

realizados vários estudos, com o objetivo de ultrapassar as dificuldades de processamento destes materiais de forma a torná-los mais rentáveis na sua produção.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como principal intuito dar continuidade à investigação que tem sido realizada sobre os materiais compósitos de matriz termoplásticas obtidos pelo processo de pultrusão.

Cada vez mais na atualidade, com a evolução e especialização da engenharia torna-se necessário o estudo dos processos de fabrico e o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais compósitos.

Espera-se que, embora modesto, este trabalho tenha algum contributo para alargar o mercado dos compósitos de matriz termoplástica reforçada com fibras contínuas e permita dar uma resposta mais eficaz e competitiva aos requisitos cada vez mais exigentes de uma procura onde começam a existir alguns produtos.

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Produção de perfis compósitos com Pré-impregnados *Tape* e *Towpreg* pelo processo de pultrusão, no equipamento instalado no Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP;
- Definição de requisitos e seleção de materiais;
- Análise do processo de pultrusão de compósitos termoplásticos;
- Análise e otimização dos parâmetros de processo;
- Caracterização mecânica dos perfis de pultrusão;
- Análise de resultados e comparativo com outro tipo de perfis de pultrusão;

Introdução

2. Revisão Bibliográfica

O capítulo de revisão bibliográfica consiste em demonstrar os processos de fabrico de materiais compósitos, abordando especialmente a pultrusão, e enquadrando-a na categoria de produtos que permite fabricar.

2.1. Compósitos de Matriz Polimérica

Os Materiais Compósitos podem ser definidos como materiais constituídos por duas fases distintas, as quais se podem distinguir por fase de reforço e matriz.

O reforço é a fase que se caracteriza por possuir maior rigidez, dureza e resistência mecânica. Sendo praticamente todos os reforços atualmente usados sob a forma de fibras (de vidro, carbono, aramida), é papel fundamental a matriz garantir uma adequada transmissão e repartição dos esforços pelo reforço [1].

Os materiais mais usados como matriz são de natureza polimérica, tanto de tipo termoplástico como termoendurecível. Os termoplásticos caracterizam-se por durante o processamento fundir, reprocessar e apresentarem viscosidades mais elevadas. Os termoendurecíveis, pelo contrário, não fundem e apresentam viscosidades mais baixas antes da polimerização [1].

Os problemas que os termoplásticos apresentam em termos de impregnação são o principal motivo para os termoendurecíveis dominarem industrialmente o mundo dos compósitos. A difícil impregnação das matrizes termoplásticas com reforços de fibras contínuas, resulta numa fraca impregnação entre a fibra e a matriz o que confer ao compósito propriedades mecânicas fracas aquém do expectável [2]. No entanto o interesse na utilização de compósitos termoplásticos tem-se acentuado nos últimos anos. Estes materiais oferecem algumas vantagens relativamente aos compósitos de matriz termoendurecível, nomeadamente porque podem ser reprocessados, apresentam melhor tenacidade, proporcionam ambientes de trabalhos mais limpos e menos preocupações no armazenamento e permitem reparação [3].

2.1.1. Mercado de compósitos termoplásticos

A procura pelos compósitos termoplásticos, tem aumentado ao longo dos anos tendo em conta as ótimas propriedades que fornecem, para a sua aplicabilidade em diversos setores da indústria.

O mercado de materiais compósitos termoplásticos, tem crescido gradualmente nos últimos anos. Na Figura 1, pode ser visível o consumo em toneladas (TON), desde 2021 até um valor estimativo para o ano de 2030. No ano de 2021 foi alcançado um consumo aproximado de 7000 toneladas, onde nos anos seguintes pode ser visível um decréscimo dos valores consumidos, proveniente da ação da COVID-19. A partir do ano de 2022 até 2030, é notória a previsão de subida considerável do consumo dos materiais compósitos de matriz termoplástica.

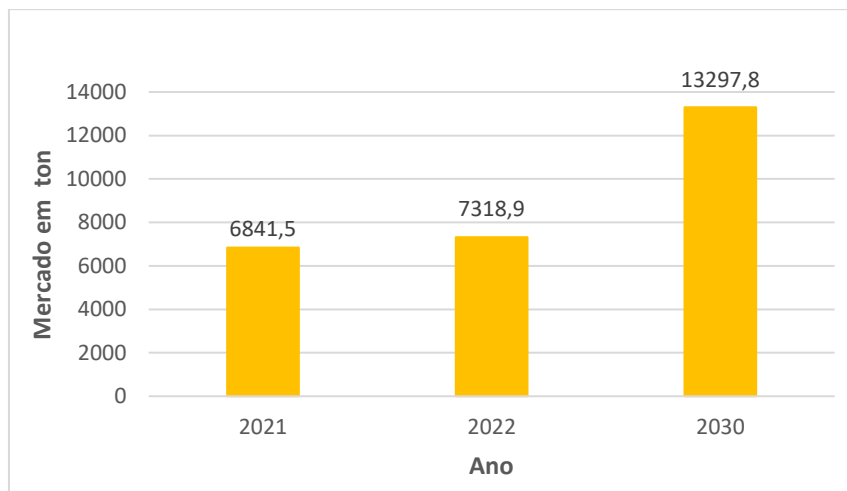


Figura 1 - Consumo dos compósitos termoplásticos 2021, adaptado de [4]

A forte procura devido às propriedades que estes materiais fornecem, tem impulsionado diferentes indústrias implementem cada vez o uso de materiais compósitos termoplásticos. Na Figura 2, é possível verificar que a indústria automóvel e aeroespacial apresentam uma maior percentagem da utilização de materiais compósitos termoplásticos.

Na indústria automóvel o uso de materiais compósitos é feito como alternativa para a redução do peso e com o objetivo de aumentar a rigidez do veículo. Estes materiais são usados em diversos componentes estruturais, como por exemplo no capô, nas portas e nos painéis de instrumentos.

Na indústria aeroespacial ao contrário da indústria automóvel que procuram essencialmente materiais com baixo custo de fabrico e com elevadas cadências de produção, a indústria aeroespacial procura essencialmente a combinação entre redução de peso e de custos operacionais, tendo em conta que são materiais em que aplicabilidade irá exigir maior desempenho.

A incorporação de materiais compósitos nas diferentes indústrias permitem uma maior eficácia e cumprimento em relação aos padrões ambientais estabelecidos pelas entidades políticas, isto reflete-se pela possibilidade de processamento de geometrias complexas com o fornecimento de ótimas propriedades e pelo seu processo ser mais favorável ambientalmente [1].

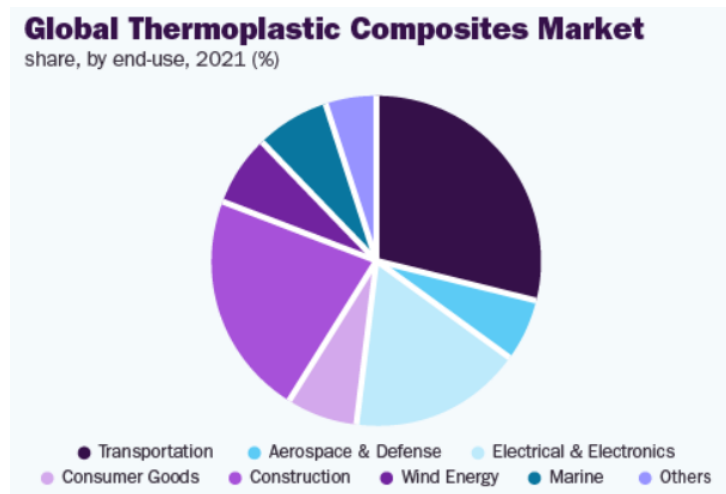


Figura 2 – Tendência dos mercados de compósitos termoplásticos [5]

Na Figura 3, é visível que os Estados Unidos da América (EUA) destacam-se a nível mundial pelo consumo de materiais compósitos, possuindo uma participação de 31% da receita global em 2020. Com a presença dos EUA e através dos fortes meios tecnológicos que são possuidores, é esperado que o estudo e a investigação de materiais compósitos mais sustentáveis e recicláveis, impulsionam ainda mais o interesse para outros mercados.

Ainda na Figura 3, é ilustrado que a secção BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China) apresentam uma participação de cerca de 32%. Relativamente ao mercado Ásia-Pacífico espera-se que apresentem um grande crescimento do consumo e desenvolvimento de materiais compósitos, visto que muitas indústrias encontram-se estabelecidas nessa região, como por exemplo a indústria automóvel, aeroespacial e de defesa [6].

Por último, o mercado europeu apresenta uma participação de cerca de 27%, onde os mercados alemães detêm grande parte da participação, onde é acompanhado pelo mercado francês que apresenta um constante crescimento, o que se relaciona pela forte procura de produtos sustentáveis.

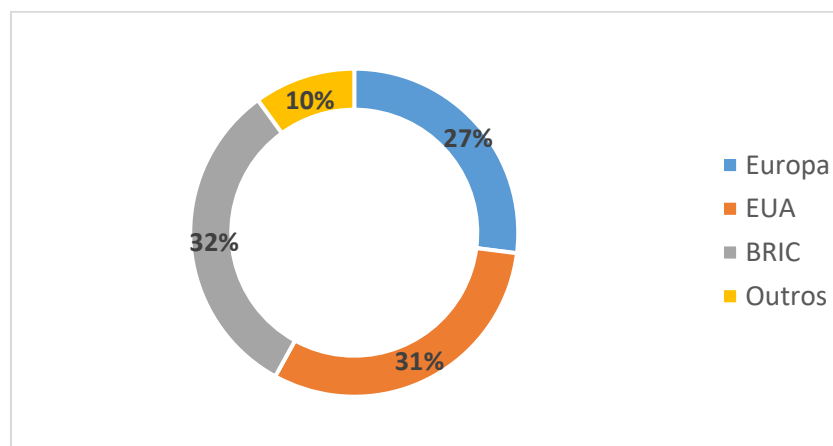


Figura 3 - Mercado de materiais compósitos no mundo 2020, adaptado de [6]

2.2. Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica

Os pré-impregnados de matriz termoplástica podem ser classificados de três tipos com base no comprimento característico das fibras de reforço. Podem ser classificadas em SFRT (*Short Fibre Reinforced Thermoplastic*), os de fibras longas LFRT (*Long Fibre Reinforced Thermoplastic*) e as fibras contínuas CFRT (*Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic*).

Os termoplásticos de SFRT (*Short Fibre Reinforced Thermoplastic*) são produzidos na forma de grânulos, obtidos através da mistura das fibras com termoplástico numa extrusora [1].

Os termoplásticos reforçados com fibras curtas oferecem vantagens em termos de custo e peso em comparação com materiais de engenharia tradicionais, como metais. Porém como as fibras apresentam poucos milímetros de comprimento a ocorrência da quebra e da degradação é maior e apenas é possível obter grânulos com alguns milímetros de comprimento [2].

Os LFRT's (*Long Fiber Reinforced Thermoplastics*) são materiais constituídos por fibras longas, geralmente superiores a seis milímetros. Estes materiais são geralmente fabricados através de processos de moldação por injeção e co-extrusão, que são técnicas normalmente empregues na impregnação das mechas de fibras com polímero que, sendo seguidamente cortadas no comprimento desejado, dão origem a grânulos cilíndricos alongados, designados no idioma anglo-saxónico por *pellets*. Por ocasionarem muito menor degradação das fibras que os métodos de produção dos SFRT, estes processos permitem obter pré-impregnados com propriedades mecânicas bastante superiores, que se encontram a ganhar cotas de mercado cada vez maiores [1].

As fibras contínuas CFRT (*Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic*) podem-se dividir em duas classes tendo em conta a sua flexibilidade, ou seja, podem ser fibras de reforço pré-impregnadas com impregnação parcial (não apresentam as fibras totalmente impregnadas) ou fibras de reforço pré-impregnadas com impregnação total (reforço totalmente impregnado). Relativamente às fibras de reforço com impregnação parcial, a impregnação do reforço realiza-se durante a sua posterior transformação em conjunto com a consolidação, devido a temperaturas e pressões a que o material é sujeito. Para as fibras de pré-impregnação semirrígidas, a realização da transformação deve-se somente à necessidade de adquirir a forma do produto final, uma vez que o reforço já se encontrava totalmente impregnado [7].

Alguns dos exemplos de pré-impregnados com impregnação parcial são: mechas de reforço impregnadas com termoplástico em pó (designadas por *towpregs*), mechas constituídas por filamentos de termoplástico e reforço dispostos paralelamente (*commingled fibres*) e mistura de mechas de reforço com termoplástico em pó embebidas numa bainha de termoplástico (FIT – *Fibre Impregnated by Thermoplastic*). As técnicas mais utilizadas na transformação destes materiais são a pultrusão, enrolamento filamentar e compressão a quente [1].

2.2.1. Fibras de reforço

Fibras de vidro

As fibras de vidro são o reforço mais utilizado nos materiais compósitos. O processo de fabrico das fibras de vidro como é ilustrado na Figura 4, consiste na distribuição de vidro fundido por canais que conduzem a feiras em que se mantém a cerca de 1250°C, o que permite o seu vazamento por gravidade dando origem a fios com algumas décimas de milímetros.

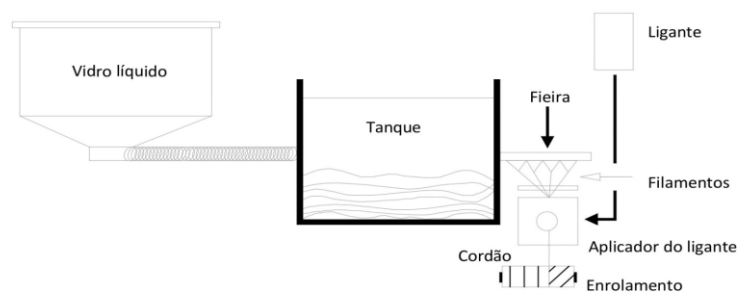


Figura 4 - Representação esquemática da produção de fibras de vidro, adaptado de [3]

As fibras de vidro são constituídas essencialmente pelo composto de sílica, em que a sua composição varia com base nos óxidos que estão presentes na fibra, permitindo a formação de várias propriedades e designações das fibras de vidro.

Tabela 1 - Propriedades das fibras de vidro, adaptado de [8]

PROPRIEDADES	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Módulo de Young (GPa)	72	87	86
Massa Volúmica (g/cm^3)	2,55	2,50	2,55
Deformação na rotura (%)	3,2	4,0	5,2
Tensão na rotura (MPa)	3400	4580	4400

A fibra de vidro E (*electric*) possui boas propriedades elétricas enquanto o vidro S (*strength*) possui maior resistência mecânica. O vidro S é cinco a dez vezes mais caro do que o vidro E, e tem um acréscimo de 20% a 40% nas suas propriedades mecânicas, sendo um dos principais motivos pelo qual apenas é aplicada em indústrias mais exigentes como a militar e aeronáutica. O vidro E é utilizado em 80% das aplicações em compósitos a nível industrial pelas suas boas propriedades mecânicas e elétricas a um custo mais reduzido [2].

Fibras de carbono

As fibras de carbono podem ser agrupadas em dois tipos de fibras, as de percentagem de carbono entre 80 e 95 e as de percentagem de 99 .

As propriedades mecânicas excecionais e a baixa densidade das fibras de carbono tornam este material muito atraente especialmente para indústria mais especializadas como a aeronáutica espacial, militar e desporto automóvel.

O método mais prático de produção de fibras de carbono resulta da decomposição térmica de vários precursores como o poliácridonitrilo (PAN), a celulose e o alcatrão (*pitch*), onde na Tabela 2 é ilustrado as propriedades de cada um dos precursores [9].

Tabela 2 - Propriedades mecânicas das fibras de carbono [3]

PROPRIEDADES	PAN	Pitch	Rayon fibers
Massa volúmica (g/cm³)	1,8	2,0	1,7
Módulo de Young (GPa)	200-400	400	415-680
Tensão de Rotura (MPa)	2180-3100	1550	2070-2760
Deformação na rotura (%)	0,6-1,2	1-1,5	0,5-0,6

A poliácridonitrilo (PAN) é o precursor atualmente mais comum para a produção de fibras de carbono. Na Figura 5, é possível verificar o processo esquemático das respetivas etapas.

Inicialmente passam por um processo de oxidação onde as fibras são submetidas em uma atmosfera ricas em oxigénio e aquecidas até 300°C. De seguida a carbonização em que consiste num tratamento térmico sob atmosfera inerte atingindo-se temperaturas entre os 1000°C e os 1700°C. Depois prossegue-se para a grafitização, tratamento térmico em atmosfera neutra alcançando temperaturas entre 2500°C e 3000°C. Por fim as fibras são sujeitas a um tratamento superficial numa atmosfera de ácido sulfúrico ou ácido nítrico, onde as superfícies são alteradas de forma a ser possível atingirem-se elevados níveis de adesão [9].

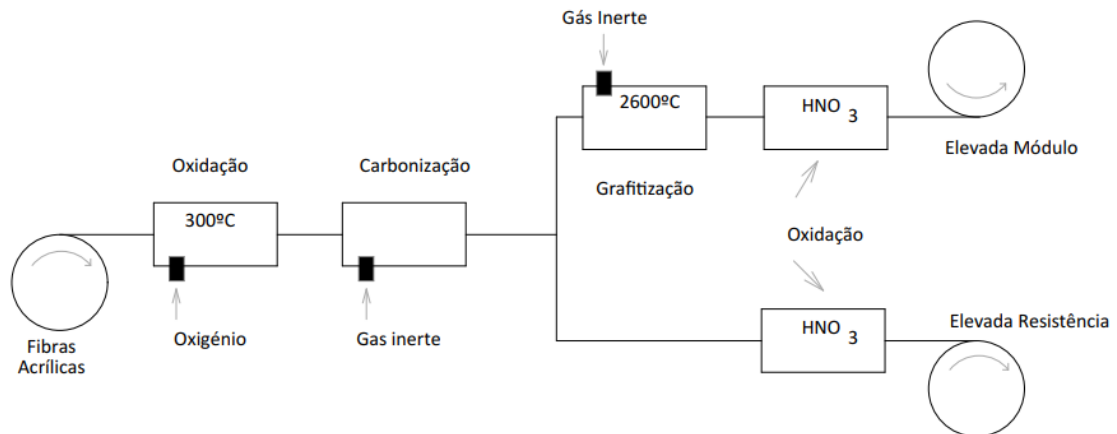


Figura 5 - Processo de produção de fibras de carbono a partir do PAN, adaptado de [3]

As fibras de carbono podem ser classificadas tendo como base a sua resistência mecânica, sendo assim classificadas pelas seguintes designações:

- UHM – fibras de módulo de elasticidade superior a 500 GPa;
- HM – fibras de módulo de elasticidade superior a 300 GPa;
- IM – fibras com módulos de elasticidade até 300 GPa;
- LM – fibras com módulos de elasticidade inferiores a 100 GPa;
- HS – fibras de resistência à tração superiores a 3 GPa;

Fibras de Aramida

As fibras de aramida apresentam propriedades mecânicas muito melhores do que as fibras de vidro, no entanto são das menos empregues devido ao facto de apresentarem fraca aderência a matrizes poliméricas.

Este tipo de fibras são produzidas a partir de poliamidas aromáticas, em que a solução de polímero é mantida a baixas temperaturas (entre -50°C e -80°C), sendo depois extrudida a uma temperatura de aproximadamente de 200°C [3].

As fibras de aramida apresentam como principais características a elevada resistência mecânica, química, são resistentes ao impacto, possuem baixa massa volúmica e uma boa capacidade de amortecimento de vibrações [10].

Tabela 3 - Propriedades mecânicas das Fibras de Aramida, adaptado de [11]

Propriedade	Kevlar® 29	Kevlar® 49	Twaron®
Módulo de Young (GPa)	60	129	60
Massa volúmica (g/ cm ³)	1,44	1,45	1,44
Tensão de rotura (MPa)	3000	3000	2600
Deformação na rotura (%)	3,6	1,9	3

2.3. Semi-Produtos

Os semi-produtos são pré-combinações de fibras que serão processadas para a obtenção de produtos finais. Os semi-produtos podem ser classificados em compostos de moldação ou como pré-impregnados.

2.3.1. Compostos de moldação

Os compostos de moldação consistem em fibras impregnadas combinadas com resina. As fibras podem ser de matriz termoendurecível, EMC (*Epoxy Molding Compound*), ou também podem ser de matriz termoplástica, PMC (*Polyester Molding Compound*).

O composto SMC (*Sheet Molding Compound*) é constituído por fibras e resina envolvidas por folhas de polietileno, em que normalmente apresentam espessuras até cerca de seis milímetros [8].

As peças formadas por SMC, são produzidas através de um processo de moldação por compressão. O processo de moldação permite que as fibras possuem maior resistência e tenacidade da peça final, devido às fibras apresentarem um volume elevado de fibras de vidro longas [8].

O composto TMC (*Thick Molding Compound*) diferencia-se dos compostos SMC, porque apresentam espessuras que podem chegar até aos 50 milímetros. Com a utilização deste composto é possível a produção de peças moldadas mais espessas, evitando a utilização de várias camadas de SMC [3].

O composto DMC (*Dough Molding Compound*) também conhecido por BMC, são compostos de moldação à base de uma mistura volumosa de fibras de vidro cortadas e pastas de resina [3]. A fibra de reforço mais utilizada é a fibra de vidro, estas fibras são cortadas e combinadas com a pasta de resina num misturador, em que depois são extrudidas e cortadas no comprimento desejado [12].

O conteúdo das fibras de vidro BMC são geralmente 5-10% menor que o SMC, fazendo com que as propriedades mecânicas do BMC sejam inferiores às do SMC.

A resistência ao impacto é influenciada pelo comprimento das fibras, no entanto o aumento do comprimento da fibra até cerca de 12,7 milímetros faz com que a resistência ao impacto seja menos significativa [12].

Relativamente aos compósitos termoplásticos, podem apresentar as formas pré-preparadas em GMT (*Glass Mat Thermoplastic*) e ATC (*Advanced Thermoplastic Composites*).

Os termoplásticos reforçados com fibra de vidro (GMT), são muito utilizados na indústria automóvel. São compostos que apresentam excelente tenacidade e possibilidade de reciclagem. Têm uma ampla gama de aplicações resultantes da moldação por compressão termoplástica, para componentes estruturais de veículos modernos [12].

2.3.2. Pré-Impregnados

Os pré-impregnados consistem numa mistura das fibras e do polímero, sendo que este não se encontra já polimerizado no caso dos termoendurecíveis. No caso dos termoplásticos, apesar do polímero já estar polimerizado, é possível reprocessar pela natureza destes. Estes compostos, são materiais que tem sido muito utilizados na indústria espacial, pela elevada exigência nas aplicações a que estes materiais estarão sujeitos.

Nos pré-impregnados termoendurecíveis, são caracterizados por apresentarem maior maneabilidade, facilidade de posicionamento, auto-adesão de camadas no empilhamento e boa conformidade a curvaturas do molde [3]. Sendo o foco deste trabalho os compósitos termoplásticos, serão estes os mais referidos nesta secção do documento

A possibilidade de produzir compósitos por processos contínuos e autônomos torna os pré-impregnados reforçados por fibras contínuas muito atrativas do ponto de vista comercial. Os materiais pré-impregnados reforçados por fibras contínuas são divididas em duas categorias:

- **Impregnação Parcial:** Consiste na combinação de polímero em pó ou filamento e são caracterizados por serem flexíveis, pois o polímero não se encontra totalmente consolidado. O *towpreg* e os *commingled fibers* são exemplos de impregnação parcial [13].
- **Impregnação Total:** Caracteriza-se por terem menor flexibilidade e o polímero é depositado e fundido por sob as fibras. No caso destes pré-impregnados, o polímero é submetido a processos de fusão para reduzir a sua viscosidade, permitindo a impregnação. As fitas pré-impregnadas com matriz são por exemplo, produzidas por este processo, que depois podem ser moldados por métodos de conformação [14].

No entanto é importante destacar, que os materiais pré-impregnados por impregnação parcial apresentam níveis de temperatura e de pressurização no processamento mais elevados do que os pré-impregnados com impregnação total. Os pré-impregnados com impregnação total, apresentam mais vantagens na sua utilização, uma vez que a impregnação é realizada com mais eficácia na fabricação do material pré-impregnado [1].

2.4. Produção de Pré-impregnados de matriz termoplástica

A combinação das fibras com polímero é uma das etapas do processo a prestar bastante atenção, para garantir uma impregnação eficaz do reforço por um polímero.

Os principais fatores a controlar, de forma a garantir uma impregnação adequada são o comprimento a impregnar, a viscosidade do polímero, a pressão a aplicar, a geometria e a disposição especial das fibras [1].

Através da Lei de Darcy, é possível determinar a velocidade do fluxo do polímero num meio poroso na direção longitudinal. Sendo assim, a expressão para a determinação da velocidade de impregnação é ilustrada na Equação 1.

$$u_p = \frac{d_x}{d_t} = \frac{K}{\eta} \frac{dP}{dx} \quad \text{Equação 1}$$

- u_p , corresponde à velocidade do fluxo do polímero (m/s);
- K , corresponde à permeabilidade do meio pelo qual o fluido se desloca (m^2);
- η , corresponde à viscosidade do fluido (Pa.s);
- $\frac{dP}{dx}$, corresponde ao gradiente de pressão (Pa/m);

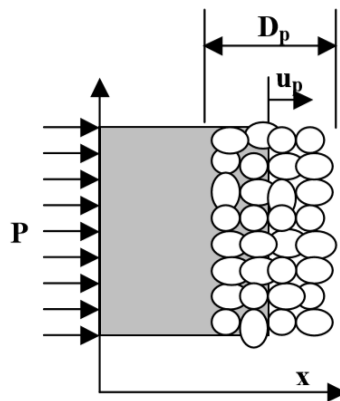


Figura 6 – Impregnação de fibras por um termoplástico, sob ação de uma pressão eterna [1]

Através da integração da Equação 1, considerando o valor correspondente ao gradiente de pressão constante e com as condições de fronteira adequadas, é possível determinar o tempo de impregnação (t_{imp}), como é ilustrado na Equação 2.

$$t_{imp} = \frac{\eta \cdot D_p^2}{2 \cdot K \cdot P} \quad \text{Equação 2}$$

Onde na Equação 2, D_p corresponde ao comprimento a impregnar, em milímetros. Nessa mesma expressão é possível verificar que o comprimento, é o fator com mais peso no tempo impregnação. Dai a razão pela qual na maioria dos processos de produção de pré-impregnados se tenta reduzir o comprimento de impregnação.

Outro ponto importante de referir através da análise da Equação 2 é a viscosidade (η), uma vez que quanto menor for este valor menor será o tempo de impregnação, ou seja mais fácil se torna a impregnação do reforço. Para a diminuição da viscosidade é necessário o aumento da temperatura.

A pressão também é outro parâmetro que pode influenciar no tempo de impregnação. Quanto maior for o valor da pressão aplicada menor o tempo de impregnação. No entanto o aumento da pressão pode dificultar a impregnação das fibras, porque diminui a permeabilidade das fibras

2.4.1. Produção de pré-impregnados de matriz termoplástica com fibras contínuas

Tal como foi mencionado atrás, uma das etapas cruciais na fabricação de materiais compósitos é a impregnação de reforços contínuos de fibra, que irão ter influência direta relativamente às propriedades mecânicas e estruturais do produto final.

Atualmente as técnicas mais utilizadas, para a produção de pré-impregnados de matriz termoplástica reforçado com fibras contínuas são [15]:

- Mistura íntima do polímero em pó com as fibras de reforço;
- Mistura íntima de fibras termoplásticas e de reforço;
- Impregnação por solução;
- Impregnação por fusão dos termoplásticos;

2.4.1.1. Impregnação por solução

Na impregnação por solução, é adicionado um solvente ao termoplástico em pó. O solvente pode conter aditivos de forma a melhorar a aderência entre as fibras e o polímero. O tamanho das partículas de pó do termoplástico e a sua concentração, são os parâmetros com maior importância [16].

Este é um processo, que permite a obtenção de pré-impregnados com boa qualidade, porém as dificuldades associadas à obtenção de solventes adequados para a maioria dos termoplásticos, e capazes de satisfazerem as necessidades perante a remoção do excesso de solvente após a impregnação, são fatores que terão maior impacto na utilização desta técnica.

No entanto o processo de impregnação por solução apresenta como vantagem, o facto não necessitar da fusão do polímero, sendo assim as propriedades térmicas e reológicas do polímero não são necessárias de estudar [17].

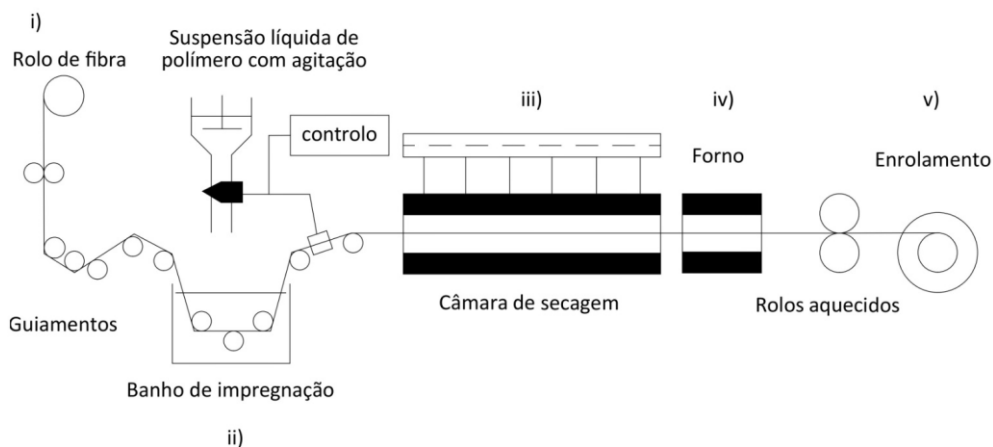


Figura 7 - Procedimento para a impregnação por solução [18]

Esta técnica consiste na realização de cinco etapas, como é ilustrado na Figura 7, em que as respetivas fases são:

- i) Desenrolamento das mechas de fibra;
- ii) Passagem das mechas pelo banho de impregnação contendo uma suspensão aquosa de polímero em pó agitada mecanicamente;
- iii) Passagem das mechas impregnadas por uma câmara de secagem;
- iv) Passagem das mechas por um forno com temperatura controlada;
- v) Por fim um enrolamento do pré-impregnado em bobinas.

2.4.1.2. Impregnação por fusão do termoplástico

Este processo consiste na produção por pré-impregnados por impregnação direta de fibras no polímero em estado fundido, dando origem a fabricação de pré impregnados contínuos, designados por Tapes [19].

A produção das fitas pré-impregnadas consiste na passagem das fibras em polímero fundido. Embora esta técnica pareça relativamente simples de ser realizada, tecnicamente é um processo complexo.

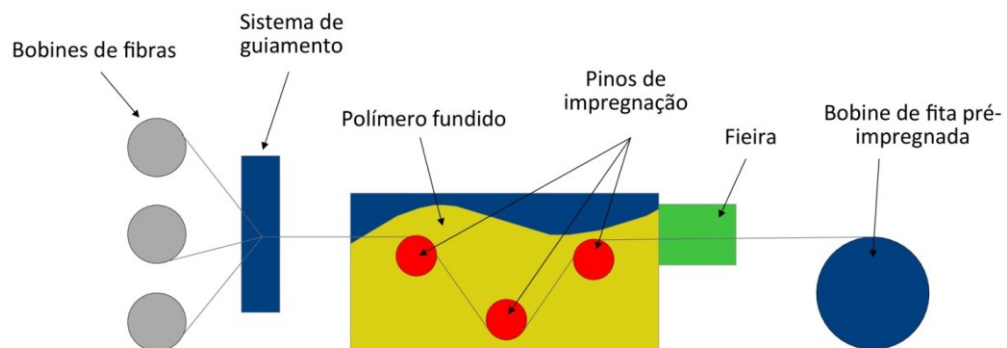


Figura 8 - Representação esquemática do procedimento de produção de fitas pré-impregnadas [13]

Na Figura 8 é ilustrado o procedimento da produção das fitas de pré-impregnadas, o qual se pode dividir em três fases:

- 1) introdução das fibras no banho;
- 2) impregnação no banho de polímero;
- 3) saída das fitas pré-impregnadas.

Na primeira fase, as fibras apresentam-se dispostas numa bobina, em que através do sistema de guiamento as fibras são mergulhadas no bano de polímero. Na segunda fase, as fibras são impregnadas pelo polímero e orientadas por um conjunto de pinos, os quais garantem um maior tempo de impregnação. A terceira fase, as fibras são puxadas através de uma fieira que se encontra à saída do bano do polímero e que é responsável por garantir forma e a geometria do produto final, sendo depois enrolado numa bobina [20].

2.4.1.3. Impregnação por mistura íntima de fibras termoplásticas e de reforço

O contacto íntimo entre as fibras e o polímero pode ser feito, através da combinação das fibras de reforço e de polímero, sistema que é denominado de *commingled fibers*. Neste processo os diâmetros dos filamentos da matriz e dos polímeros deverão ser os mais aproximados possíveis, de modo à impregnação ser mais fácil e mais uniforme [2].

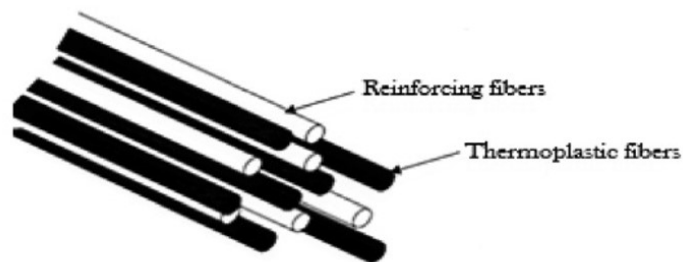


Figura 9 -*Commingled Fibers* [21]

O processo para a obtenção das *commingled fibers*, que ilustrado na Figura 9, é caracterizado por pela obtenção de um pré-impregnado por apresentar bons níveis de dispersão de fibras e polímero, o que particularmente é um benefício para técnicas de transformação contínua como o processo de pultrusão e enrolamento filamental [22].

Uma das técnicas para a produção de pré-impregnados flexíveis *commingled fibers* é através do processo, que é ilustrado na Figura 10. Inicialmente a matriz termoplástica é processada em fibras, onde de seguida a fibra de reforço e a fibra termoplástica são misturadas e no final é obtido um único filamento que é enrolado numa mecha.

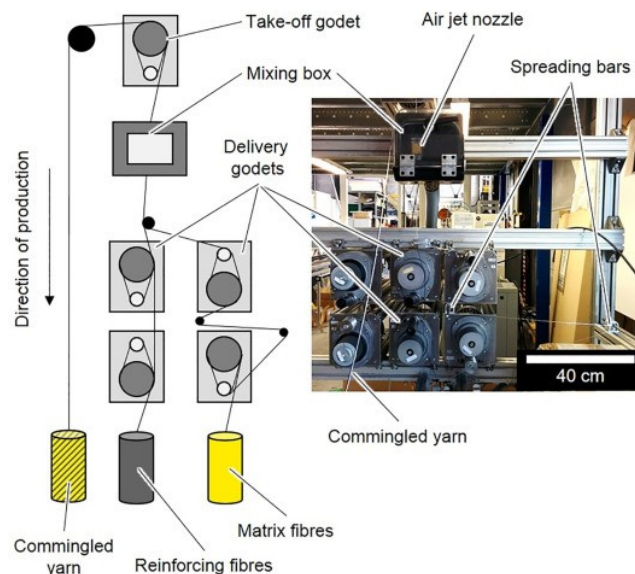


Figura 10 – Processo alternativo de *commingling*

No entanto existe outro processo, que é representado na Figura 11, onde o polímero é inserido numa extrusora, onde é fundido e puxado por uma bomba, dando origem a vários fios. Durante o processamento dos filamentos do polímero, os filamentos da fibra também são processados em fios e depois misturados.

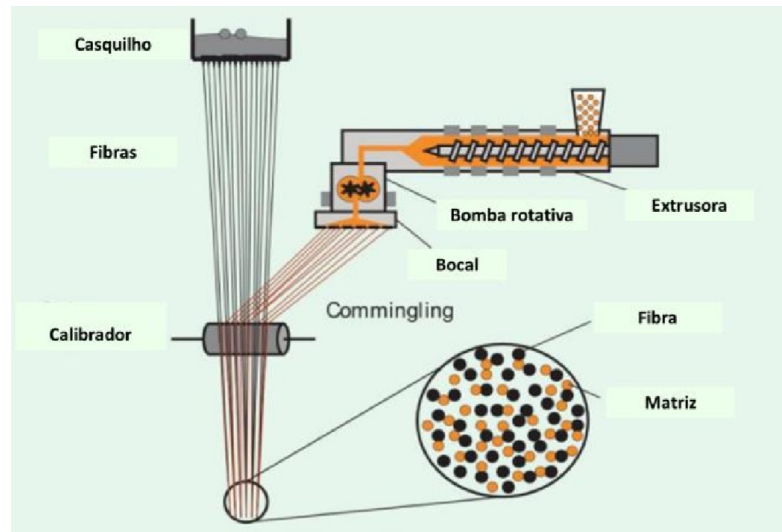


Figura 11 - Produção de *commingled fibres* [23]

Este processo apresenta como principais desvantagens, o facto de o custo de produção ser mais elevado comparativamente com outros pré-impregnados, e da dificuldade de obtenção do material em altas taxas de produção. Por estas razões anteriormente mencionadas e pelo facto das máquinas para fabricação destas fibras serem bastante caras, torna-se um processo com bastantes limitações.

É importante destacar que os polímeros em pó não são abundantemente comercializados e que alguns polímeros são difíceis de granular, tendo em conta ao seu comportamento dúctil que apresentam.

Na produção de *Towpreg* uma das dificuldades em assegurar é a aproximação das dimensões do diâmetro do polímero em pó em relação ao diâmetro das fibras. No caso em que houver uma grande dispersão do diâmetro das partículas do polímero, a quantidade de polímero ao longo do polímero poderá não ser uniforme. Este é um processo que envolve vários já referidos anteriormente como, o processo de aquecimento, o contacto entre as fibras e o polímero, que por consequência podem ser bastantes abrasivos para as fibras e pactuar com as propriedades finais [13].

2.4.1.4. Impregnação por mistura íntima de polímero em pó com fibras de reforço

Este é um processo, que através da deposição e do contacto íntimo entre o pó e as mechas de fibras contínuas, possibilitam a formação de um pré-impregnado flexível, com a designação de *towpreg* [1].

O conjunto resultante da impregnação denomina-se por *Towpreg*, como é verificado na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, em que apresenta na sua constituição fibras de reforço que incluem termoplástico em pó nos seus interstícios.

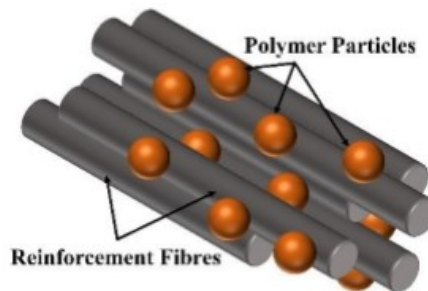


Figura 12 - Representação esquemática do *Towpreg* [13]

A máquina que está representada na Figura 13, pode ser dividida em seis etapas, tendo como principal intuito a deposição do pó nas fibras. As fases para a execução deste processo são:

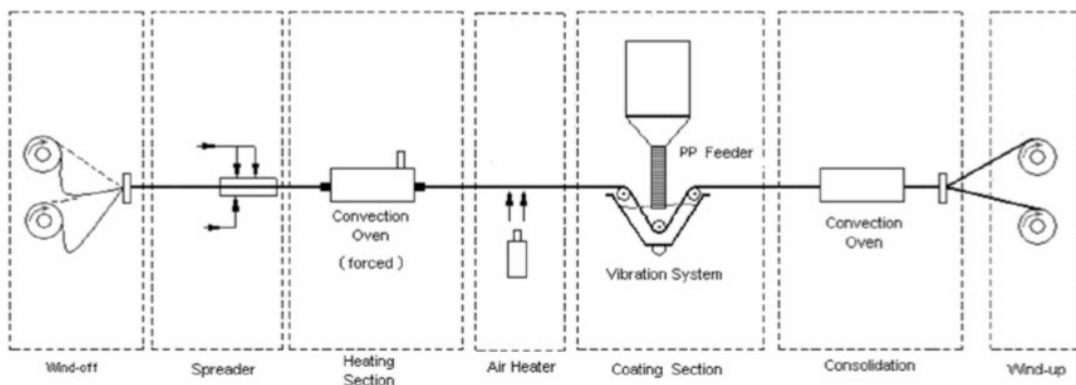


Figura 13 – Configuração do processo esquemático do processo de impregnação por pó [24]

- 1) Desenrolamento das fibras nas bobinas

Numa primeira fase as fibras estão dispostas em rolos onde serão desenroladas.

- 2) Espalhador das fibras

Depois as fibras passarão para um espalhador, que através da ação de ar comprimido permitirá a separação dos filamentos de mecha e por consequência uma melhor impregnação das fibras.

3) Forno de aquecimento

De seguida as fibras passam por um forno de convecção, onde através do aumento da temperatura das fibras possibilitam uma melhor adesão entre as fibras e o pó na próxima etapa.

4) Câmara deposição

A câmara de deposição será o próximo procedimento, nesta etapa as fibras guiadas por um conjunto de rolos são banhadas por polímero em pó.

5) Forno de consolidação

O procedimento seguinte é a passagem por um forno de consolidação, em que consistirá na disposição das fibras a temperaturas superiores às temperaturas de fusão do polímero.

6) Enrolamento das fibras

Por fim o material passará por um conjunto de rolos, que servirão não só como guiamento, mas também para a consolidação do material, onde irão enrolar os towpregs em bobines

2.5. Transformação de Compósitos Termoplástico

Tendo em conta com o que já foi mencionado, os materiais pré-impregnados consistem numa mistura entre fibras e polímeros, com o objetivo de serem submetidos a um processo de transformação para a obtenção do compósito final.

De forma a ser possível alcançar o melhor desempenho e qualidade do componente final, é necessário ter em atenção as propriedades específicas da matriz termoplástica e do equipamento utilizado. Sendo assim, a qualidade e desempenho do compósito final é geralmente associado ao processo de transformação que será submetido, como também ao controlo de precisão dos parâmetros da temperatura, pressão e tempo de processamento.

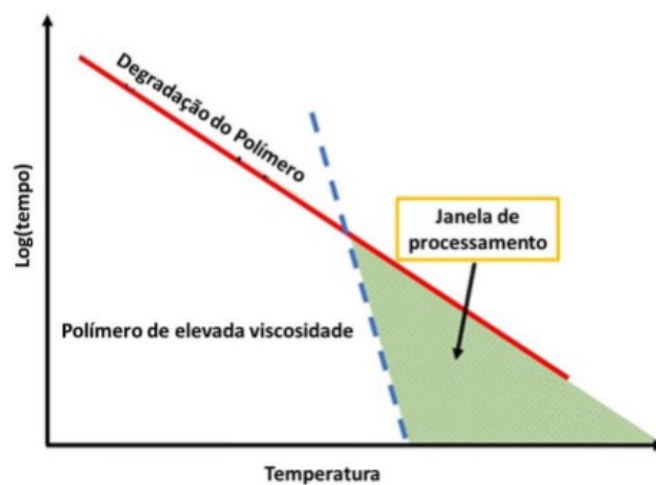


Figura 14 – Gráfico de relação entre tempo e temperatura (janela de processamento) [23]

De acordo com a Figura 14, é possível verificar que a temperatura ao apresentar um valor baixo, a viscosidade para processar um pré-impregnado será elevada. Porém com o aumento da temperatura o tempo de processamento vai diminuindo. Através destas conclusões retiradas pela análise é importante referir, que com o aumento da temperatura é necessário que o tempo de processamento seja reduzido, de forma a evitar a degradação do termoplástico. No entanto os ciclos de tempo com durações mais curtas apresentam uma maior tendência em originar tensões residuais, em oposição com a apresentação de ciclos de duração mais logos em que a produtividade diminui.

Na Figura 14, é possível visualizar uma região que apresenta uma designação de "janela de processamento". Esta região consiste numa zona, em que através da combinação e do ajuste da temperatura em função das propriedades térmicas e reológicas do polímero, permitem a formação de um intervalo de valores que resultam de uma boa combinação entre a viscosidade e temperatura para o processamento do compósito.

Os processos de transformação mais utilizados são a injeção, a termoformação, a compressão a quente, técnicas de enrolamento filamentar e pultrusão [18].

Processos contínuos como por exemplo a pultrusão, enrolamento filamentar, apresentam a tendência por serem menos eficientes relativamente à impregnação e consolidação do produto final. Porém o processo de moldação por compressão a quente permite um controlo da pressão, da temperatura e do tempo mais eficazes [18].

No subcapítulo seguinte, será abordados o processo de transformação de pultrusão, onde terá mencionado várias vezes ao longo desta dissertação.

2.5.1. Pultrusão

A pultrusão é um processo contínuo, que permite a fabricação de produtos com secção transversal constante. As vantagens associadas à utilização desta técnica de fabricação são a sua alta taxa de produção, maior eficiência, baixos custos de produção e a possibilidade de incorporar elevados níveis de automação, tornando o processo mais autónomo [25].

Para a fabricação de materiais compósitos existem dois métodos através do processo de pultrusão, que se diferenciam no seu procedimento. Um dos métodos é usado polímeros termoendurecíveis e o segundo é utilizado polímeros termoplásticos, o qual é o tema de estudo.

No primeiro método ilustrado na Figura 15, que consiste no processo mais convencional a fibra da mecha é puxada e passa por um banho de resina, onde acontece a impregnação com um polímero termoendurecível. Após a impregnação as fibras são conduzidas através de uma fiação de aço pré-aquecida, onde também é designada por molde uma vez que irá conferida a forma do perfil e onde é polimerizado o reforço impregnado. O perfil pultrudido é puxado e no final do processo é submetido a um sistema de corte, que deixará o perfil com o comprimento desejado [26].

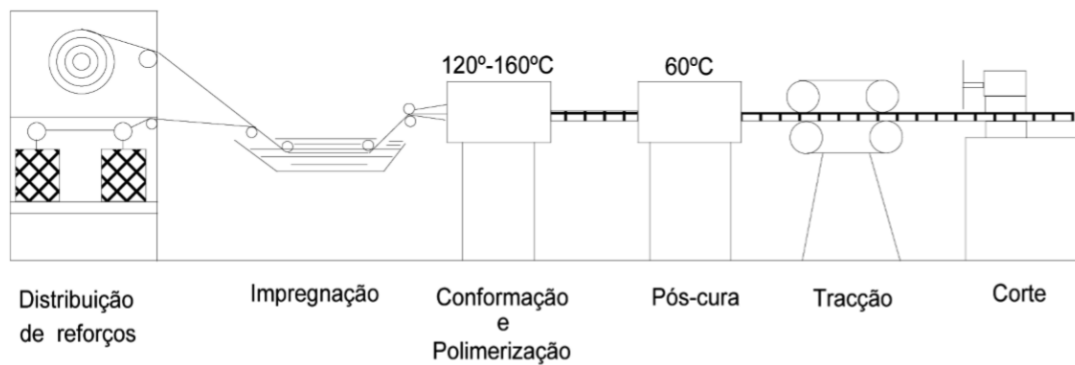


Figura 15 – Representação esquemática da moldagem por pultrusão termoendurecíveis [3]

Contrariamente à pultrusão de termoendurecíveis, em que as fibras são submetidas a um banho de resina, para os termoplásticos pelo de facto não ocorrer polimerização na pultrusão o polímero é aquecido de forma a facilitar a sua impregnação na matriz.

Neste processo, ilustrado na Figura 16, as mechas pré-impregnadas são desenroladas e guiadas até um forno, onde o pré-impregnado será submetido a um pré-aquecimento, com o objetivo de aquecer o polímero até atingir a temperatura de fusão. Depois de atingida a temperatura de fusão o pré-impregnado incorpora num conjunto de feiras. Na primeira é aquecido e submetido à pressão aplicada pelo molde da feira, permitindo garantir a geometria pretendida. Na segunda feira o pré-impregnado será submetido a um processo de arrefecimento, com o principal intuito de manter e assegurar a geometria obtido na primeira feira, como também garantir a solidificação do perfil. No final do processo, é possível cortar este compósito com o comprimento desejado [27].

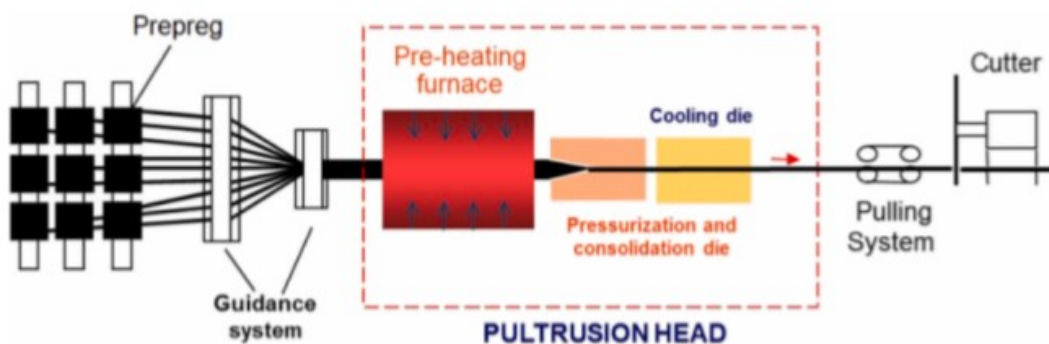


Figura 16 – Pultrusão de Pré-impregnados Termoplásticos [24]

Um das etapas fundamentais em que é necessária uma análise bastante cuidadosa durante o processo de pultrusão, é a pressurização e consolidação da matriz. Neste ponto a seleção do material em fabricação e a geometria da cavidade das feiras, deverão permitir que o material seja capaz de suportar as pressões e temperaturas durante o processo. Sendo assim, de forma a controlar a pressão dentro da matriz é necessária uma seleção adequada da velocidade de tração do processo e da viscosidade do polímero [28].

A temperatura de arrefecimento na segunda feira, também apresentará um papel crucial no processamento do material, visto que será responsável pela estabilização de propriedades mecânicas importantes para a aplicabilidade do material, como também o acabamento superficial do compósito.

2.6. Sustentabilidade e reciclabilidade do processo de pultrusão

A busca por soluções sustentáveis tem sido cada vez mais nos tempos de hoje um tópico que se tem atribuído grande importância, tendo em conta os desafios ambientais que enfrentamos. Com isto a reciclagem de matrizes termoplásticas destacam-se, como sendo uma das possíveis estratégias a ser adquiridas, de forma a reduzir o impacto ambiental e promover a sustentabilidade da indústria.

O aparecimento de materiais compósitos termoplásticos reciclados para uso comercial, têm desafiado cada vez mais as diversas indústrias, onde os altos níveis de precisão que são impostos no processamento dos mesmos, dificultam a previsão do comportamento do compósito [13].

As matrizes termoplásticas como referidos anteriormente apresentam polímeros na sua constituição. Os polímeros mais utilizados são o polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de virilo (PVC) e polietileno tereftalato (PET).

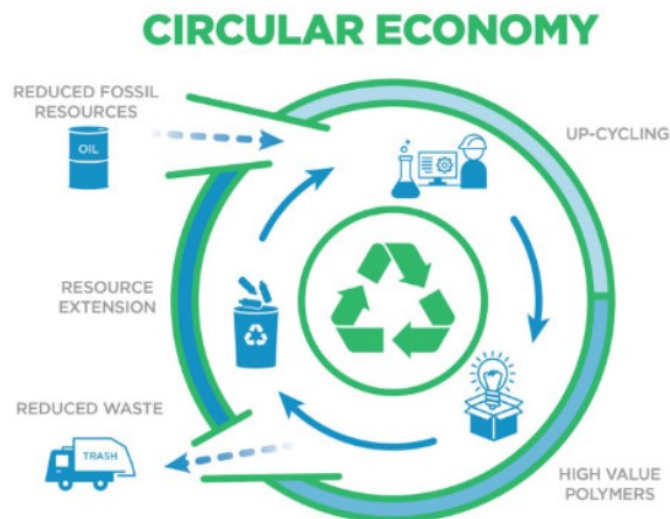


Figura 17 – Ciclo económico do plástico [30]

Com base na Figura 17, é possível visualizar o ciclo de vida dos plásticos desde a sua produção até serem reciclados e colocados novamente em produção. Os materiais compósitos termoplásticos apresentam também a capacidade de serem reciclados, e de certa forma o seu processo produtivo assemelha-se com o ciclo ilustrado na Figura 17.

O processo de transformação de pultrusão que será realizado neste trabalho para a produção de materiais compósitos, terá também como objetivo demonstrar que as principais propriedades mecânicas não irão sofrer grandes alterações quando o polímero utilizado for reciclado.

Apesar dos processos de reciclagem encontrarem-se numa fase inicial de desenvolvimento, tem surgido diversos estudos direcionados para o desenvolvimento de técnicas mais eficazes de reciclagem de materiais compósitos.

Como já mencionado anteriormente a pultrusão caracteriza-se por ser um processo preciso e controlado, o que permite minimizar significativamente uma quantidade considerável de desperdício de material comparativamente com processo mais convencionais.

O uso cada vez maior deste processo, para a produção de materiais compósitos termoplásticos pode vir a ser uma forte aposta para impulsionar cada vez mais a sustentabilidade em diferentes setores industriais.

Revisão Bibliográfica

3. Procedimento Experimental

Neste capítulo o principal intuito será a apresentação de todo o procedimento experimental que levou à elaboração desta dissertação, iniciando-se pela caracterização dos materiais, passando pelo processo de pultrusão, seguindo-se as metodologias de ensaio.

No presente estudo para a realização do processamento de materiais pré-impregnados por processos contínuos, foram utilizadas mechas unidirecionais para a produção de fitas e *towpreg* pré-impregnados, sendo assim para a realização dos perfis pultrudidos foram selecionadas várias fitas e *towpreg* pré-impregnadas que se encontravam produzidas devido à realização e estudo de trabalhos anteriores.

Matérias-Primas

3.1.1. Fibras de Reforço

Para a análise do processamento de materiais pré-impregnados por processos contínuos, foram utilizadas fibras de vidro e de carbono como reforço dos compósitos elaborados neste trabalho. A seleção destes dois materiais deve-se essencialmente à grande diversidade de aplicações a que podem ser usados em várias indústrias.

Um dos materiais que foram utilizados para reforçar as fitas pré-impregnadas, foram as fibras contínuas de carbono fornecidas pelo grupo *SIGRAFIL*, com a referência C30 T050 TP1. As fibras de carbono são feitas à base de poliacrilonitrila (PAN), onde atualmente são utilizados nos setores aeroespacial, automóvel, militar e energia eólica, tendo em conta as propriedades mecânicas como a elevada resistência à tração e boa facilidade de impregnação em matrizes termoplásticas [31], [32].

Tabela 4 – Propriedades mecânicas da Fibra de carbono [33]

Propriedade	Unid.	Fibras de carbono
Massa volúmica	g/cm ³	1,80
Tensão de rotura	MPa	4000
Módulo de Young	GPa	240
Diâmetro do filamento	µm	7
Coefficiente de Poisson		0,27
Densidade linear	Tex	3280

A fibra de vidro fornecida pela *Owens Corning* com a referência 305E-TYPE 30, também foi escolhida para ingressar no estudo deste trabalho, tendo em conta as propriedades que apresentam como alta resistência à flexão, boa rigidez e boa resistência química [34]. Tal como as fibras de carbono as fibras de vidro apresentam uma grande diversidade de aplicações e mercados que demonstram grande interesse, uma vez que é um material que apresentam uma boa relação entre propriedades e custo.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas da Fibra de vidro [35]

Propriedade	Unid.	Fibras de vidro
Massa volúmica	g/cm ³	2,56
Tensão de rotura	MPa	1800
Módulo de Young	GPa	70
Diâmetro do filamento	µm	14
Coefficiente de Poisson		0,26
Densidade linear	Tex	2400

3.1.2. Matriz termoplástica

Polipropileno

Um dos materiais utilizados para a fabricação dos perfis pultrudidos foram a utilização e a combinação de *Towpreg FC/PP* e *Towpreg FV/PP*, onde como matriz foi utilizado polipropileno em pó com cor preta, como é ilustrado na Figura 18.



Figura 18 – Polipropileno em pó

O polipropileno (PP), é um dos termoplásticos mais utilizados para a fabricação de compósitos reforçados e apresenta um custo de aquisição relativamente baixo, quando comparado com outros termoplásticos. Este polímero apresenta uma temperatura baixa de processamento relativamente baixa, a rondar aproximadamente 160°C, no entanto uma das principais dificuldades em trabalhar com o polipropileno (PP) surge pelo facto de apresentar uma alta viscosidade durante o processamento, o que torna a incorporação mais difícil em contexto de impregnação de fibras [36].

Na Tabela 6, são apresentadas as propriedades polímero utilizado, *ICORENE® 4014*, onde é caracterizado por apresentar baixa densidade, boa resistência térmica e química.

Tabela 6 – Propriedades *ICORENE® 4014 (PP)*

Propriedades	Unidades	ICORENE® 4014 (PP)
Massa volúmica	g/cm ³	0,9
Tensão de cedência	MPa	24
Módulo de Elasticidade	GPa	1,05
Temperatura de fusão	°C	165
Dimensões das partículas em pó	µm	400

PET Reciclado

O rPET ou Polietileno Tereftalato Reciclado é um material obtido a partir da reciclagem de garrafas de PET. Este material apresenta um vasto leque de aplicações como por exemplo, em embalagens de alimentos e bebidas, embalagens de cosmética e produtos de cuidados domésticos.

O rPET utilizado apresenta como referência rPET iSS01G, onde as suas propriedades são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades do rPET

Propriedades	Unidades	rPET
Massa volúmica	g/cm ³	1,25
Resistência à tração	MPa	30
Módulo de Elasticidade	GPa	1,0
Temperatura de fusão	°C	245
Alongamento na rotura	%	15
Coefficiente de Poisson	-	0,38

3.2. Transformação dos Pré-impregnados

3.2.1. Produção de compósitos por Pultrusão

A pultrusão como já referido no capítulo 2.5.1 é um processo contínuo e automatizado de fabrico de perfis. Neste estudo a produção dos pré-impregnados já se encontravam efetuados, sendo assim procedeu-se diretamente à transformação dos mesmos.

Durante o processo foi necessário ter atenção a diversos parâmetros, como no caso da temperatura de pré-aquecimento, temperatura da fieira de consolidação e da velocidade de puxo. Estes parâmetros foram sujeitos a variações, de forma a ser possível estudar quais as influências nas propriedades mecânicas dos compósitos a produzir.

Para a concretização deste trabalho foi utilizado a máquina de pultrusão presente no Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP, onde é ilustrado na Figura 19.



Figura 19 – Máquina de Pultrusão ISEP

Métodos e Aplicação

A máquina de pultrusão apresenta várias sistemas e componentes, os quais desempenham diferentes funções durante o processo, que são:

- Secção de abastecimento;
- Forno de pré-aquecimento;
- Fieira de aquecimento e arrefecimento;
- Sistema de puxo;
- Unidade de controlo;

Secção de abastecimento

Um dos primeiros componentes é a secção de abastecimento, onde são colocados os rolos de fibra para o seu desenrolamento. As fibras ao serem desenroladas irão ser orientadas e guiadas através de um guia de passagem, como é ilustrado na Figura 20.



Figura 20 – Carrinho de abastecimento com bobines

Forno de pré-aquecimento

De seguida as fibras passam por um forno, que tem como principal função submeter o material a um pré-aquecimento de forma a facilitar o processo de consolidação a que será sujeito na etapa seguinte, e o forno também apresenta a função de guiamento para a entrada na fieira de aquecimento.



Figura 21 – Forno de pré-aquecimento

Fieira de aquecimento e arrefecimento

Nesta etapa encontram-se duas fieiras, em que a primeira é a fieira de aquecimento e a segunda é a fieira de arrefecimento. Na fieira de aquecimento, é onde acontece a consolidação e pressurização do material, para isso a fieira apresenta 8 cartuchos cilíndricos com 150W de potência elétrica cada um. A temperatura no interior da fieira é controlada através de sensores PT100, que apresentam a capacidade de medir até a uma temperatura aproximadamente de 800°C. Durante a realização do processo de pultrusão na fieira de aquecimento serão colocados tecidos de fibra de vidro, como forma de isolamento para minimização de perdas de calor na fieira, como ilustrado na Figura 22.

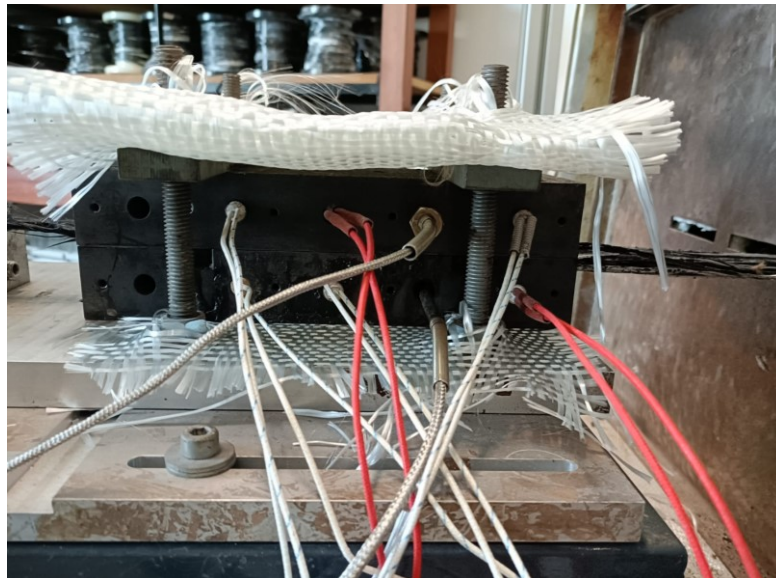


Figura 22 – Feira de aquecimento com as resistências

A segunda feira como mencionado anteriormente é responsável pelo arrefecimento do polímero e de garantir a geometria do perfil a ser pultrudido, através de sistema de circulação de água fria constituído por dois canais onde a água circula no seu interior, Figura 23. A temperatura da água pode ser regulada um termorregulador de Regloplas Modelo 90S/6STP20/1K/RT22.

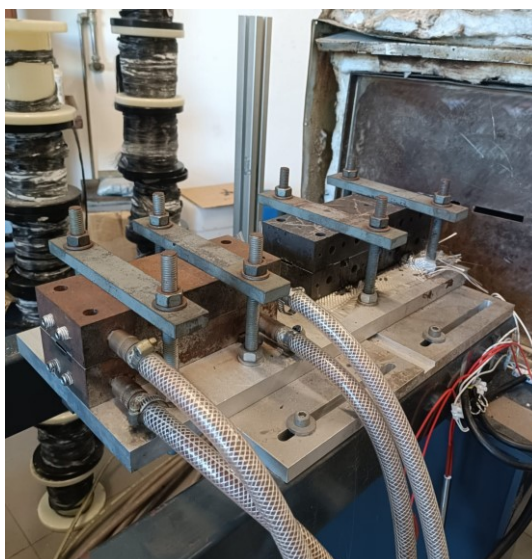


Figura 23 – Feira de arrefecimento

Sistema de puxo

Este sistema é constituído por dois carrinhos e que tem como principal objetivo realizar o controlo de velocidade de puxo constante durante o processo. O sistema de puxo apresenta um motor para cada carrinho, onde permitem a deslocação longitudinal dos mesmos e apresentam também atuadores pneumáticos para prender os perfis. Por fim, é realizado o corte manualmente dos perfis compósitos com as dimensões pretendidas através de uma serra.

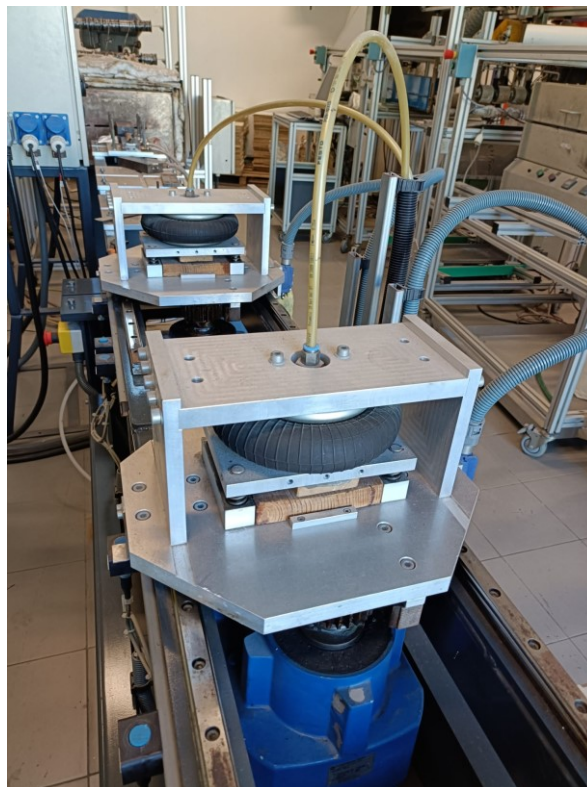


Figura 24- -Carrinhos do sistema de puxo

3.3. Ensaios Mecânicos e Analíticos

Os perfis compósitos obtidos pelo processo pultrusão foram sujeitos a vários ensaios de flexão, tração e calcinação. Neste capítulo são descritos os ensaios a que foram submetidos os provetes produzidos, permitindo a caracterização dos mesmos.

3.3.1. Ensaio de Calcinação

Os ensaios de calcinação foram realizados com o principal intuito de determinar as frações mássicas de fibras e de polímero presentes nos compósitos pultrudidos.

Este ensaio foi realizado no equipamento disponível no Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP, uma mufla NABERTHERM LHT08/16, como é ilustrado na Figura 25.



Figura 25 - Forno mufla NABERTHERM LHT08/16

Com o auxílio de uma balança de alta precisão, como ilustrado na Figura 26, com a designação balança Denver Instruments APX-200, os cadinhos em vazio e com as amostras a ensaiar.



Figura 26 – Balança de Precisão [23]

Na fase inicial deverá ser determinado a massa do cadinho cerâmico, onde este deverá encontrar-se seco e limpo, de forma a possuir uma massa constante durante todo o ensaio. Sendo assim, o cadinho vazio é colocado na mufla, com o principal objetivo de eliminar resíduos que estejam presentes e que a não forem eliminados influenciariam os resultados do ensaio. Depois de algum tempo na mufla, o cadinho é novamente pesado e analisado se apresenta um valor constante, para ser possível prosseguir-se para a próxima fase. Na possibilidade da massa do cadinho não ser constante após a sua colocação na mufla, deverá ser realizado todo o procedimento novamente até ser encontrado uma estabilidade de valores.

Na fase seguinte serão colocados cerca de 2g a 20g das amostras dos compósitos pultrudidos nos cadinhos, onde serão submetidos a um pré-aquecimento para a eliminar a humidade presente nos provetes. Depois do pré-aquecimento, procedeu-se à inceneração do polímero, onde de seguida obtêm-se a massa do cadinho com os resíduos.

Com a determinação de todos os valores é possível através desses dados obter a de perda de massa de material e a fração mássica de fibras.

A percentagem de massa de material pode ser determinada, através da Equação 3.

$$\Delta\% = \frac{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

- $\Delta\%$ - Percentagem da variação de massa;
- m_1 – Massa do cadinho em vazio (g);
- m_2 – Massa do cadinho com a amostra (g);
- m_3 – Massa do cadinho após a inceneração (g);

A fração mássica de fibras pode ser determinado, pela Equação 4.

$$w_f = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

- w_f – Fração mássica das fibras;

Através da lei das misturas e da fração mássica de fibras é possível determinar a fração volúmica das fibras através da Equação 5.

$$v_f = \frac{\frac{w_f}{\rho_f}}{\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{(1 - w_f)}{\rho_p}} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

- v_f – Fração volúmica das fibras;
- ρ_f – Massa volúmica da fibra (g/cm^3);
- ρ_p – Massa volúmica do polímero (g/cm^3);

Com a obtenção dos parâmetros anteriores, é possível determinar o módulo de elasticidade teórico do compósito, com base na Equação 6.

$$E_{comp} = E_f \times v_f + E_p \times (1 - v_f) \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

- E_{comp} – Módulo de elasticidade do compósito (GPa);
- E_f – Módulo de elasticidade das fibras de reforço (GPa);
- E_p – Módulo de elasticidade do polímero (GPa);

3.3.2. Ensaios de Tração

O ensaio de tração foi realizado no equipamento SHIMADZU AG-I 1 com uma célula de carga de 10 kN, como é possível verificar na Figura 27, que se encontra no Laboratório do departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, de acordo com a norma ISO 527-4. Com a realização dos ensaios de tração nos perfis pultrudidos, foi possível determinar propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade, a tensão no limite plástico, tensão no ponto de rotura e a extensão nominal.



Figura 27 – Equipamento de ensaios SHIMADZU AG-X 100 kN [23]

As dimensões dos provetes ensaiados apresentam uma geometria retangular, com 20 mm de largura, 2 mm de espessura e 250 mm de comprimento, tendo como referência a norma 527-4, em que a célula de carga movimenta-se a uma velocidade de 2mm/min.

Antes da realização do ensaio, foi necessário proceder a três medições para a largura e espessura de cada provete ensaiado, com o principal intuito de obter a área de resistência média da secção transversal.

Depois de efetuados os ensaios e com os dados obtidos provenientes no mesmo, como a força aplicada e o deslocamento durante o ensaio, pode ser determinada a resistência à tração através da Equação 7.

Tensão de tração

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

- F – Força aplicada no provete (N);
- A – Área de secção transversal do provete (mm^2);

Deformação resultante

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

- l – Deslocamento num dado instante;
- l_0 – Distância inicial de referência;

Módulo de elasticidade

$$E = \frac{\sigma'' - \sigma'}{\varepsilon'' - \varepsilon'} \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

- ε'' - Deformação longitudinal de 0,0025;
- ε' - Deformação longitudinal de 0,0005;
- σ'' - Tensão correspondente à deformação de 0,0025 (MPa);
- σ' - Tensão correspondente à deformação de 0,0005 (MPa);

Neste trabalho o módulo de tração foi obtido por regressão linear da curva tensão-deformação no intervalo de deformação [0,0005;0,0025], de forma a obter uma melhor precisão do módulo de elasticidade, que por sua vez corresponde ao declive da reta tensão-deformação.

3.3.3. Ensaios de Flexão

Os ensaios de flexão em 3 pontos segundo a norma ISO 14125, foram realizados na máquina de ensaios da *Shimadzu* que se encontra disponível no Laboratório do departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, como é apresentado na Figura 28, com uma célula de carga de 100kN.



Figura 28 - Equipamento de Ensaio Mecânico Shimadzu

O ensaio de flexão teve como base a Norma ISO 14125, onde foram cumpridos todos os requisitos relativos à distância entre os dois apoios do provete e à relação entre apoios/espessura (L/h) como forma de evitar efeitos de corte como a deformabilidade e rotura por corte, onde a norma vincula que o rácio seja de 16:1, 20:1, 40:1 ou 60:1. O rácio estabelecido nos ensaios de flexão foi de 40:1.

Os provetes antes de terem sido ensaiados foram cortados com as dimensões de 20 mm de largura, 2 mm de espessura e 100 mm de comprimento, onde depois de cortados tiveram que secar durante um dia ao ar, visto que a serra elétrica utilizada para cortar os provetes usa água como forma de facilitar a operação, o que leva à necessidade da secagem dos mesmos de modo evitar a presença de humidade nos provetes, e por sua vez influenciar nos resultados.

Na realização dos ensaios a velocidade do ensaio selecionada foi de 2mm/min, com distância entre apoios de 80 mm e foi utilizada uma célula de carga de 5kN.

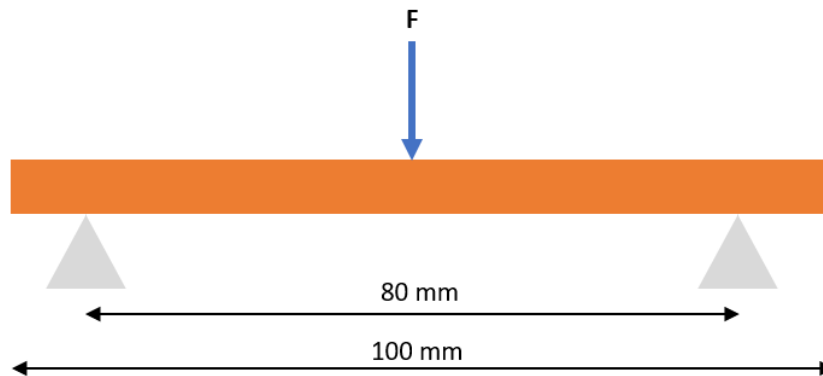


Figura 29 – Esquema ensaio flexão em 3 pontos

Depois de realizada a operação de corte dos provetes, foram efetuadas medições da espessura e largura em três pontos diferentes, com o auxílio de um paquímetro digital com 0,01 de resolução, onde foi determinada a média dos valores, os valores podem ser verificados no APÊNDICE A, de forma a serem utilizados na obtenção de resultados dos ensaios.

Com a realização do ensaio e a determinação da carga a aplicar durante o mesmo, foi possível a obtenção das propriedades à flexão do perfil pultrudido, como a tensão de rotura, módulo à flexão e a deformação, com base nas expressões seguintes.

Tensão de rotura

$$\sigma_f = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times h} \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

- σ_f – é a tensão de rotura à flexão;
- F – é a força máxima aplicada;
- L – é a distância entre apoios;
- b – é a largura média do provete;
- h - é a espessura média do provete;

Deformação

$$\epsilon = \frac{6 \times y \times h}{L^2} \quad \text{Equação 11}$$

Em que:

- ϵ – é a deformação na superfície inferior;
- y – Flecha medida a meio vão;

Módulo de elasticidade à flexão

$$E_f = \frac{L^3}{4 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

- E_f – Módulo de elasticidade de flexão;

O módulo de elasticidade foi obtido através de regressão linear da curva tensão-deformação.

4. Apresentação e análise dos resultados obtidos

Neste capítulo numa primeira fase serão apresentadas as condições de fabrico associados aos compósitos híbridos, que consistiram em provetes constituídos por *towpregs* FV/PP e FC/PP, e as tapes FC/rPET.

Numa segunda fase serão comparadas as propriedades determinadas experimentalmente entre os compósitos finais produzidos, com as propriedades determinadas teoricamente.

4.1. Transformação por Pultrusão

A transformação por pultrusão é um processo que necessita bastante cuidado e atenção na seleção dos diferentes parâmetros tendo em conta o polímero utilizado no fabrico do material.

Para o início da realização do processo é necessário estimar o número de bobines necessárias de pré-impregnado a utilizar para fabrico de um determinado perfil, o que para isso implica a determinação da massa volúmica do compósito final, ρ_{Comp} , através da Lei das Misturas, como é verificado na Equação 13.

$$\rho_{Comp} = \left(\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{1 - w_f}{\rho_P} \right)^{-1} \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

- ρ_f é a massa volúmica das fibras, g/cm^3 ;
- ρ_P é a massa volúmica do polímero, g/cm^3 ;
- w_f é a fração mássica da fibra;

Resultados e Discussão

Os perfis produzidos por este processo apresentam um formato retangular de 20mmx2mm com as dimensões ilustradas na Figura 30, uma vez que as feiras dispostas no equipamento apresentam esta dimensão na sua secção.



Figura 30 – Dimensões da secção dos perfis produzidos

Com o cálculo da massa volúmica do compósito é possível a determinação do número de bobines através da Equação 14.

$$N = \frac{\rho_{Comp} \times w_f \times A}{m_{f \text{ lin}}} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

- ρ_{Comp} é a massa volúmica do compósito final, g/cm^3 ;
- w_f é a fração mássica da fibra, estimada por valor de 0,6 visto ser um compósito unidirecional;
- A é a área da secção transversal do perfil pultrudido, mm^2 ;
- $m_{f \text{ lin}}$ é o peso linear da fibra, g/m ;

A intenção do primeiro material a ser produzido consiste na junção de *towpreg* FC/PP e FV/PP, onde para isso foi necessário o número de bobines com base nas expressões anteriormente verificadas, como é ilustrado na Tabela 8.

Tabela 8 –Número de Bobines do material do *Towpreg* FC/PP e FV/PP

Propriedades das Matérias-Primas			Propriedades do compósito calculadas					Número de Bobines
ρ_{PP} [g/cm ³]	ρ_{FC} [g/cm ³]	$m_{f\ lin}$ [g/m]	w_f	ρ_{Comp} [g/cm ³]	b [mm]	t [mm]	A [mm ²]	
0,9	1,8	3,28	0,60	1,28	20	2	20	9
ρ_{PP} [g/cm ³]	ρ_{Fv} [g/cm ³]	$m_{f\ lin}$ [g/m]	w_f	ρ_{Comp} [g/cm ³]	b [mm]	t [mm]	A [mm ²]	Número de Bobines
0,9	2,56	2,40	0,60	1,53	20	2	40	13

O segundo material produzido foi com a utilização de tapes rPET/FC, onde na Tabela 9 é possível verificar os valores dos diferentes parâmetros e do número de bobines utilizadas para a transformação no processo de pultrusão.

Tabela 9 - Número de Bobines tape rPET/FC

Propriedades das Matérias-Primas			Propriedades do compósito calculadas					Número de Bobines
ρ_{rPET} [g/cm ³]	ρ_{FC} [g/cm ³]	$m_{f\ lin}$ [g/m]	w_f	ρ_{Comp} [g/cm ³]	b [mm]	t [mm]	A [mm ²]	
1,25	1,8	3,28	0,60	1,48	20	2	40	5

4.2. Produção dos perfis pultrudidos com *towpreg*

Na produção dos *towpregs* foram realizados vários provetes, onde foram submetidos a várias condições, de forma a perceber a influência dos principais parâmetros associados ao processo de pultrusão como a velocidade de puxo, a temperatura do forno, a temperatura das fieiras, apresentam nas propriedades finais dos diferentes provetes e também como forma de otimização do processo para o *towpreg* e as *tapes*. A realização de várias condições também permitiu a otimização do processo de produção com o principal objetivo de obter o máximo de impregnação possível de polímero no compósito.

No processamento do *towpreg* foram realizadas no total sete condições, através das quais vários fatores foram alterados ao longo da produção do material, como por exemplo a temperatura de pré-aquecimento, a velocidade de puxo e o número de bobines.

Na Tabela 10, são apresentados todos os parâmetros selecionados para a produção do compósito para cada condição.

A velocidade de puxo selecionada para grande parte do processo foi 0,2 m/min. Este é um parâmetro com grande relevância para propriedades finais do material, uma vez que está diretamente associado à facilidade de impregnação do polímero nas fibras. Nas últimas condições nomeadamente, condição 6 e 7, houve um aumento considerável na velocidade de puxo para 0,8m/min e 1,8m/min respetivamente. O aumento tem como principal intuito entender a influência que este parâmetro apresenta nas propriedades finais do compósito.

A temperatura do forno de pré aquecimento nas primeiras três condições foram iguais a uma temperatura de 100°C. Ao longo do processo de pultrusão houve um aumento da temperatura de pré-aquecimento para 120°C na condição 4 e de 130°C para as restantes condições.

A temperatura da fieira de arrefecimento ao longo de todo o procedimento foi selecionada uma temperatura de 25°C.

Na Tabela 10, a coluna relativa ao Set-point, são apresentados os valores de temperatura inseridos no equipamento de pultrusão, enquanto as colunas R1 e R2 estão apresentados os valores lidos pelos termopares que estão na fieira, onde R1 corresponde a temperatura superior e R2 a temperatura inferior dos termopares.

Tabela 10 – Condições e parâmetros do processo de pultrusão *Towpreg*

Condição	Nº de Bobines	Temperatura [°C]					Velocidade de puxo [m/min]
		Pré-aquecimento	Fieira de aquecimento			Fieira de arrefecimento	
			Set-point (°C)	R1	R2		
1	8 FV 5 FC	100	230	231,8	228,6	25	0,2
2	8 FV 5 FC	100	230	232,2	229,3	25	0,2
3	8 FV 5 FC	100	240	244,5	239,5	25	0,2
4	8 FV 5 FC	120	245	247,8	245,4	25	0,2
5	8 FC 12 FV	130	260	264,9	257,7	25	0,2
6	10 FV 8 FC	130	260	266,1	262,2	25	0,8
7	6 FV 7 FC	130	260	265,9	259,7	25	1,8

Durante o processo da produção dos perfis, foi verificada uma reduzida variação da temperatura da fieira de aquecimento, como pode ser verificado na Tabela 10 entre os valores de Set-point e os valores R1 e R2. Com isto o processo de pultrusão de perfis *Towpreg* na grande maioria das condições decorreu com bastante estabilidade e sem o aparecimento de vestígios de refluxo de polímero na fieira de aquecimento.

Em oposição não aconteceu nas duas últimas condições (condição 6 e 7), onde foi notório em grande parte do processo o aparecimento de refluxo de polímero na secção de entrada da fieira de consolidação, uma vez que o processo demonstrou-se instável com base nos parâmetros selecionados para a produção dos perfis nestas condições.

4.3. Produção como Tapes rPET/FC

No processo de produção de perfis de tapes rPET/FC na fase inicial demonstrou-se ser mais complicado e instável, comparativamente com a produção dos perfis de *towpreg*.

Numa primeira fase do processo foram colocadas cinco tapes a passar nas fieiras, o que por sua vez durante o processo não foi a opção mais adequada, pelo simples facto de ter sido colocado bastante material a passar na fieira de consolidação, o que provocou o seu desalinhamento e a aglomeração de material nas faces de contacto das duas metades da fieira. Os parâmetros seleccionados na fase inicial, foram uma temperatura de pré-aquecimento de 100°C, temperatura de na fieira de consolidação de 280°C e uma velocidade de puxo de 0,2m/min.

Nesta fase como referido foi verificado a presença constante e muitas vezes excessiva de polímero à entrada da fieira de fieira de aquecimento, o que causou em várias vezes a paragem do processo e a limpeza da fieira. O principal motivo para as paragens e a rejeitar os perfis produzidos nesta fase inicial, deveu-se ao facto das tapes apresentarem uma elevada percentagem de polímero e os fatores mencionados anteriormente.

Com isto, nas fases seguintes do processo foram tidos em conta o número de tapes a passar no início do processo, de forma a garantir uma boa passagem e a obtenção das dimensões dos perfis pretendidas e adicionando fibras secas, para tentar minimizar o efeito de refluxo na entrada da fieira de aquecimento.

Com isto a produção dos perfis de *pregreg*, foi retomada com a utilização de cinco bobines de *pregreg*, onde foram produzidos cerca de três metros de *pregreg*. Os parâmetros de processamento na produção do material estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Condições e parâmetros do processo de pultrusão *Pregreg*

Condição	Nº de Bobines	Temperatura [°C]					Velocidade de puxo [m/min]
		Pré-aquecimento	Fieira de aquecimento			Fieira de arrefecimento	
			Set-point (°C)	R1	R2		
1	5	100	280	[275;280]	[275;280]	25	0,2

4.4. Ensaio de Calcinação

Os compósitos produzidos por pultrusão, foram submetidos ao ensaio de calcinação, com o principal objetivo de determinar a fração mássica e fração volúmica de fibras no material produzido. Para a realização do ensaio seguiu-se o procedimento referido no capítulo 3.4.1.

Os resultados obtidos com a realização dos ensaios, são apresentados na Tabela 12, onde foram analisados os diferentes teores mássicos e volúnicos de fibra e polímero presentes no compósito final para as diferentes condições a que foram submetidos no processo de pultrusão.

Após a obtenção das frações mássicas e volúmica de fibra, foi determinado o módulo de elasticidade teórico através das leis das misturas. Com a obtenção deste valor será possível comparar as propriedades mecânicas dos compósitos pultrudidos com os valores experimentais, sendo que a comparação dos resultados é realizada nos capítulos seguintes.

Os provetes de *towpreg* numa primeira etapa foram sujeitos a uma temperatura de 450°C durante 15 minutos de forma a ser possível a incineração do polímero e numa segunda etapa para queimar o carbono os provetes foram sujeito a uma temperatura de 1000°C durante 15 minutos, sobrando no final só as fibras de vidro.

Tabela 12 - Resultados obtidos pelo ensaio de calcinação

Condição	w _f FC (%)	v _f FC (%)	w _f FV (%)	v _f FV (%)	w _f Pol. (%)	v _f Pol. (%)	E _{comp} teórico (GPa)
1	10	8	53	31	37	61	41,54
2	11	10	55	33	34	57	47,7
3	12	11	56	34	32	55	49,77
4	13	12	62	41	25	48	58,00
5	14	12	56	34	31	54	53,17
6	15	12	50	29	36	59	49,72
7	21	19	53	34	26	47	68,89
rPET	45	29	-	-	55	71	70,31

A fração volúmica é a propriedade que melhor caracteriza a impregnação das fibras, onde uma alta percentagem da fração volumétrica das fibras permite tirar indícios da ocorrência de uma fraca impregnação, sendo que o contrário do referido ao apresentar uma baixa percentagem da fração volumétrica de fibra indica a presença de excesso de polímero.

4.5. Caracterização Mecânica

Neste capítulo serão apresentados os valores e as propriedades retiradas com a realização dos ensaios de tração e flexão dos provetes, com o principal intuito de entender o comportamento dos materiais produzidos pelo processo de pultrusão.

4.5.1. Ensaio de Tração

Os compósitos produzidos foram também submetidos a ensaios de tração com o principal objetivo de determinar o módulo de elasticidade, a tensão máxima e a deformação na rotura, deforma a ser possível comparar os valores experimentais com os valores teóricos.

A realização do ensaio de tração não é considerada uma parte crucial deste trabalho, uma vez que a análise e a avaliação das propriedades dos perfis pultrudidos são mais facilmente interpretadas no ensaio de flexão, para determinar a qualidade de impregnação.

O ensaio de tração como referido anteriormente foi realizado no equipamento disponível nas instalações do departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, com a designação *AG-1 SHIMADZU*. Foi utilizado uma célula de carga de 10KN a uma velocidade de 2mm/min e a colocação das maxilas a uma distância de 150mm.

Para a interpretação de resultados foram utilizados extensómetros *MFA 25*, de forma a conseguir retirar os valores do módulo de elasticidade para as diferentes provetes produzidos.

Na Figura 31, é possível verificar o posicionamento de um provete para a realização do ensaio de tração através das maxilas localizadas na parte inferior superior e a implementação dos extensómetros posicionados no centro do provete a distância entre ambos de 50mm.



Figura 31 – Posicionamento do provete para o ensaio de tração

Na Tabela 13, estão apresentados os resultados obtidos para as diferentes condições. No APÊNDICE C, é possível encontrar a totalidade de todos os resultados e gráficos associados ao ensaio de tração. Ainda nesta tabela na primeira coluna são apresentados os valores da temperatura de aquecimento e velocidade de puxo que foram submetidas as diferentes condições.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de tração

Condição	Tensão De Rotura (MPa)	Módulo De Elasticidade (GPa)
1 (100°C / 0,2m/min)	96,9 ± 14,9	34,72 ± 1,52
2 (100°C / 0,2m/min)	122,3 ± 15,3	33,29 ± 0,07
4 (120°C / 0,2m/min)	107,6 ± 11,7	35,91 ± 8,26
5 (130°C / 0,2m/min)	119,0 ± 2,8	34,72 ± 6,50
6 (130°C / 0,8m/min)	55,2 ± 7,2	37,25 ± 3,77
7 (130°C / 1,8m/min)	103,8 ± 14,5	26,98 ± 3,85
rPET (100°C / 0,2m/min)	126,8 ± 11,6	52,44 ± 4,37

Depois de retiradas as propriedades submeteu-se novamente os provetes ao ensaio de tração, mas desta vez para determinar a tensão rotura máxima para cada condição. Na Tabela 14, podem ser visíveis os valores obtidos para este ensaio.

Tabela 14 – Tensão de Rotura máxima

Condição	Força Máxima (N)	Tensão Máxima(MPa)
1	5029,6 ± 374,2	133,7 ± 8,9
2	6366,3 ± 4420,6	170,2 ± 116,6
4	4644,9 ± 2242,9	114,9 ± 54,2
5	4267,0 ± 1560,5	111,7 ± 40,5
6	2164,0 ± 279,5	57,1 ± 6,5
7	5510,8 ± 983,5	147,1 ± 25,0
rPET	17074 ± 1478,3	457,1 ± 40,8

4.5.2. Ensaio de Flexão

Os materiais produzidos por pultrusão foram sujeitos a ensaios de flexão, através da utilização da máquina ensaios *SHIMADZU AG-I* localizado no departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, tendo sido utilizada a célula de carga de 5kN e foram realizados a uma velocidade de descida do punção de 2mm/min e segundo a norma ISO 14125 foi colocada uma distância entre apoios de 80mm.

Com as equações apresentadas no capítulo 3.4.3, foram determinados diferentes parâmetros cruciais para a interpretação do comportamento dos diferentes compósitos produzidos como a tensão de rotura à flexão, o módulo de elasticidade à flexão e a deformação na rotura. Para a determinação do módulo de elasticidade, este foi obtido através do declive no intervalo de valores de deformação [0,0005;0,0025] como referido na norma ISO 14125.

Os gráficos Tensão - Deformação para as diferentes condições realizadas na produção dos compósitos finais, encontram-se no APÊNDICE D, onde permitem a interpretação e análise dos comportamentos dos materiais produzidos.

Na Tabela 15, estão apresentados os valores das propriedades obtidos nas diferentes condições a que foram submetidos os provetes. De destacar que na primeira coluna são apresentados a temperatura de aquecimento e velocidade de puxo que as diferentes condições foram sujeitas.

Tabela 15 - Propriedades obtidas pelos ensaios de flexão

Condição	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação na Rotura (%)
1 (100°C / 0,2m/min)	73,4 ± 11,1	17,8 ± 3,3	0,83 ± 0,11
2 (100°C / 0,2m/min)	63,3 ± 12,0	14,1 ± 4,5	1,02 ± 0,21
3 (100°C / 0,2m/min)	79,1 ± 26,8	17,1 ± 4,1	0,97 ± 0,01
4 (120°C / 0,2m/min)	96,6 ± 14,3	21,5 ± 1,4	0,88 ± 0,08
5 (130°C / 0,2m/min)	119,9 ± 30,5	31,2 ± 6,0	0,77 ± 0,15
6 (130°C / 0,8m/min)	62,4 ± 10,1	17,2 ± 2,8	0,86 ± 0,10
7 (130°C / 1,8m/min)	22,3 ± 3,4	6,2 ± 1,4	0,60 ± 0,18
rPET (100°C / 0,2m/min)	388,6 ± 35,8	35,0 ± 5,2	1,28 ± 0,12

Nas condições anteriormente apresentadas verifica-se que as três primeiras condições apresentam valores com alguma diferença, mas bastante próximos o que justifica o facto de terem sido submetidos com os mesmos parâmetros, como mencionado no capítulo 4.2.

Na condição 4, é possível verificar uma subida acentuada nas propriedades da resistência à flexão e no módulo de elasticidade à flexão. Este aumento pode ser justificado pelo aumento da temperatura no parâmetro do pré-aquecimento em relação à temperatura seleccionada nas três primeiras condições (subida de 100°C para 120°C). Com o aumento da temperatura foi possível uma melhoria das propriedades, proporcionando uma melhor impregnação e consolidação do polímero e consequentemente uma melhoria na distribuição de esforços.

Na condição 5 existe um melhoramento das propriedades em relação às condições anteriores, na qual foram seleccionados como parâmetros a temperatura de pré-aquecimento de 130°C, temperatura na fieira de aquecimento de 260°C e velocidade de puxo de 0,2m/min (mesma velocidade que as condições anteriores). Nesta condição podemos verificar, que mais uma vez a temperatura de pré-aquecimento e temperatura na fieira de consolidação tiveram influência nas propriedades finais dos compósitos produzidos.

A condição 6 foi notório uma descida de valores em relação às condições anteriores, onde os parâmetros seleccionados foram de 130°C como temperatura de pré-aquecimento, 260°C temperatura na fieira de aquecimento e 0,8 m/min de velocidade de puxo. Nesta condição a redução dos valores poderão ser justificados, pelo aumento da velocidade de puxo, a qual teve uma influência na impregnação polímero e o surgimento de refluxo na fieira de aquecimento durante a produção do material.

Na condição 7 segue o mesmo princípio que a condição 6, pelo facto do parâmetro diferenciador ser o aumento da velocidade de puxo de 0,8m/min para 1,8m/min. Na Tabela 15, é visível a redução dos valores obtidos pelos ensaios, onde permitem reforçar que a seleção de uma velocidade de puxo adequada apresenta uma influência direta nas propriedades finais nos compósitos produzidos pelo processo de pultrusão.

Em relação ao *prepreg* FC/rPET produzido, pelos ensaios de flexão as propriedades destes compósitos destacam-se em relação ao material de *towpreg*. Durante a produção deste material, foi perceptível uma maior facilidade de processamento e menor presença de refluxo de polímero durante a produção, sendo assim pode ter sido uma das justificações para a diferença de valores e melhor propriedades deste material.

4.6. Comparação das propriedades obtidos experimentalmente com os valores teóricos

Tendo em conta os valores obtidos na realização dos diferentes ensaios das amostras produzidas foram analisados de forma a entender se os mesmos são adequados e satisfatório, quando comparados com os valores das propriedades calculadas teoricamente.

Na Tabela 16 são apresentados os valores obtidos experimental, como também os valores teóricos. Ainda na tabela são visíveis as percentagens da fração volúmica de fibra no compósito, uma vez que este valor influência as propriedades finais dos compósitos produzido, como é verificado nos resultados.

Tabela 16 – Comparação dos resultados experimentais com teóricos

Condição	Experimental			Teórico
	Módulo de Elasticidade à tração E (GPa)	Módulo à flexão E _f (GPa)	Tensão Máxima (GPa)	E ₁ (MPa)
1 (8% FC / 31% FV)	34,72 ± 1,52	17,8 ± 3,3	73,4 ± 11,1	41,54
2 (10% FC / 33% FV)	33,29 ± 0,07	14,1 ± 4,5	63,3 ± 12,0	47,7
3 (11% FC / 34% FV)	-	17,1 ± 4,1	79,1 ± 26,8	49,77
4 (12% FC / 41% FV)	35,91 ± 8,26	21,5 ± 1,4	96,6 ± 14,3	58,00
5 (12% FC / 34% FV)	34,72 ± 6,50	31,2 ± 6,0	119,9 ± 30,5	53,17
6 (12% FC / 29% FV)	37,25 ± 3,77	17,2 ± 2,8	62,4 ± 10,1	49,72
7 (19% FC / 34% FV)	26,98 ± 3,85	6,2 ± 1,4	22,3 ± 3,4	68,89
rPET (29% FC)	52,44 ± 4,37	35,0 ± 5,2	388,6 ± 35,8	70,31

Pelos valores verificou-se que os resultados obtidos experimentalmente são muito inferiores aos resultados determinados teoricamente, sendo que em nenhuma das condições se atinge ou ultrapassa o valor teórico do módulo de elasticidade. Na Figura 32 e Figura 33, são demonstrados os resultados para as diferentes condições, para facilitar a interpretação e análise dos resultados.

Os resultados podem ser justificados com base na má impregnação e consolidação do polímero durante o processamento, o que proporcionou no conjunto de compósitos produzidos com pouca rigidez.

Na condição 7 o valor do módulo de elasticidade à flexão é o mais baixo comparativamente com as restantes condições, isto deve-se ao facto de ser submetido a uma velocidade de 1,8 m/min e onde a temperatura na feira de aquecimento era de 260°C, o que implicou numa fraca impregnação do polímero durante o processo. Desta condição retira-se a conclusão que as velocidades acima de 1m/min tornam as propriedades do compósito mais fragilizadas, tendo em conta o tempo e a qualidade de impregnação do polímero.

Ainda na Tabela 16 na primeira coluna, são visíveis a percentagem da fração volúmica das fibras presentes nos compósitos. Com a análise destes valores é perceptível que os teores relativos à percentagem de fibras são inferiores em relação à percentagem de polímero, permitindo concluir que existe um excesso de teor de polímero, ou seja não existe uma correta impregnação e consolidação do polímero o que não permite uma devida distribuição e transmissão de forças ao compósito.

Na condição 6 a velocidade de puxo foi de 0,8m/min, mas ao contrário da condição 7 o valor do módulo de elasticidade à flexão encontra-se muito próximo das restantes condições. Uma das razões para a proximidade do valor, será o curto tempo do processo de pultrusão quando submetido com os parâmetros da condição 6.

Na condição 8 onde se produziu FC/rPET, foi onde se obteve os valores mais próximos dos valores calculados teoricamente. Nesta situação verificou-se que os parâmetros selecionados no processo foram adequados, de forma a garantir uma boa consolidação e impregnação do polímero nas fibras, o que permitiu aquisição de boas propriedades e a aproximação dos valores teóricos.

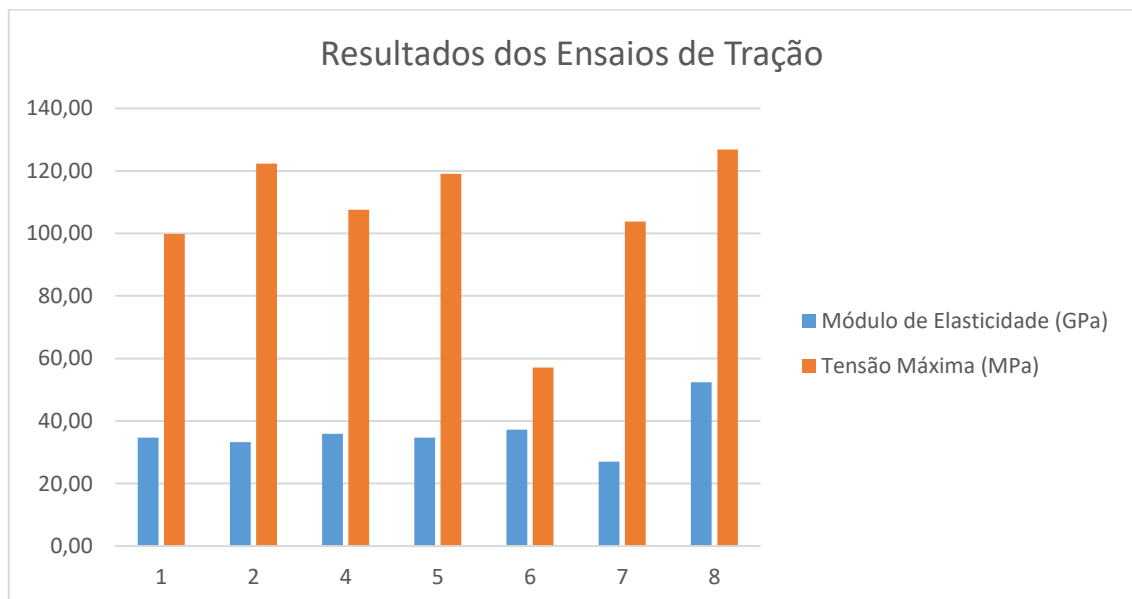


Figura 32 - Resultados dos ensaios de tração

Resultados e Discussão

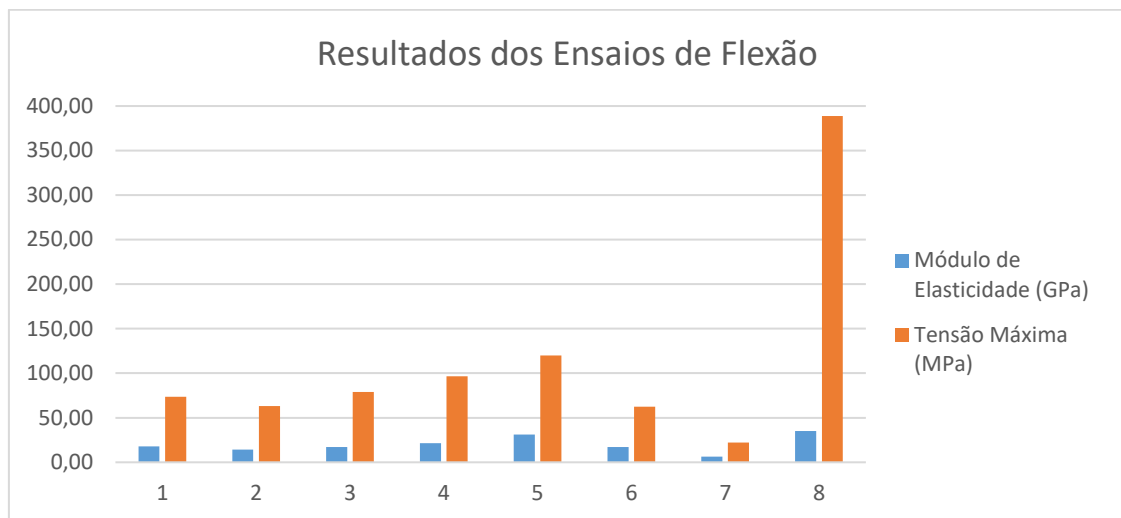


Figura 33 – Resultados dos ensaios de flexão

5. Conclusão

Nesta dissertação o principal intuito foi estudar o processo de pultrusão para a produção de compósitos com matriz termoplásticos, através do equipamento de pultrusão disponível nas instalações do ISEP, e entender a influência que os diferentes parâmetros associados ao processo podem afetar na impregnação do polímero nas fibras e conseqüentemente afetar as propriedades mecânicas finais dos compósitos.

Com a transformação dos pré-impregnados por pultrusão concluída, os diferentes materiais foram sujeitos a vários ensaios para a determinação das propriedades mecânicas, como também permitiram a avaliar a qualidade do processo de fabrico para diferentes parâmetros a que foram submetidos.

5.1. Conclusões finais

As conclusões tiradas nesta dissertação são divididas nos seguintes tópicos:

- I. Pultrusão de perfis:
 - a) No que diz respeito ao processo de pultrusão, o uso de fitas termoplásticas provou ser eficiente para a configuração e capaz de obter velocidades de processamento de 0,2 m/min com facilidade.
 - b) Durante o processamento por pultrusão, a temperatura de pré-aquecimento, a temperatura na fieira de aquecimento e a velocidade de puxo são parâmetros críticos, sendo possível aumentar ou diminuir as propriedades dos compósitos pultrudidos com a variação destes parâmetros.
 - c) A temperatura de aquecimento influencia a percentagem de polímero no pré-impregnado e conseqüentemente as propriedades do compósito.

Conclusão

- d) Uma das dificuldades sentidas na realização deste processo, consistiu no entrelaçamento das bobines na secção de abastecimento, uma vez que com o decorrer do processo existe a movimentação das bobines e por sua vez pode levar ao congestionamento no forno ou até mesmo à queda das bobines, sendo necessária a paragem do processo para resolver o problema.
 - e) As propriedades obtidas experimentalmente são mais baixas em relação às propriedades obtidas teoricamente. O principal motivo para estes resultados foi resultante da falta consolidação e impregnação do polímero nas fibras.
- II. Ensaio de Flexão e Tração
- a) Os ensaios de flexão e de tração são muito importantes para a obtenção das propriedades.
 - b) Com a realização dos ensaios permitiu concluir que os compósitos de matriz reciclada apresentam propriedades adequadas para uso estrutural.
- III. Ensaio de Calcinação
- a) A ensaio de calcinação é determinante para a obtenção das propriedades tóricas de forma a comparar com as propriedades experimentalmente.
 - b) A metodologia utilizada foi a mais adequada para a obtenção dos teores de fibra, de forma a garantir a não degradação da própria fibra.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Visando dar continuidade ao trabalho desenvolvido, propõem -se os seguintes tópicos para futuros trabalhos.

- Estudo da possibilidade da obtenção de perfis com diferentes geometrias através do processo de pultrusão e depois de produzido os perfis serem submetidos a processo de dobragem, para a aquisição de várias formas.
- Estudo da influência e desenvolvimento de mecanismo para variar a distância entre a fieira de consolidação e a fieira de arrefecimento.
- Melhorar secção de abastecimento para o posicionamento das bobines.
- Estudo mais aprofundado das características térmicas dos polímeros reciclados para otimizar a seleção dos parâmetros de processamento

Referências

- [1] J. Francisco e M. Gomes Da Silva, «PRÉ-IMPREGNADOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA: FABRICO E TRANSFORMAÇÃO POR COMPRESSÃO A QUENTE E ENROLAMENTO FILAMENTAR», 2005.
- [2] P. Esfandiari, «Produção de Pré-impregnados de Matriz Termoplástica e Fibras de Carbono: Transformação por Pultrusão e Compressão a Quente», *Fac. Eng. da Univ. do Porto*, 2017.
- [3] M. F. S. F. de moura / A. B. de M. / A. G. de Magalhães, *Materias Compósitos*.
- [4] «MARKET RESEARCH FUTURE». [Em linha]. Disponível em: https://www.marketresearchfuture.com/reports/thermoplastic-composites-market-4244?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=20373674291&hsa_grp=150985931723&hsa_ad=665909881832&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-2086491747827
- [5] «GRAND VIEW RESEARCH». [Em linha]. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/thermoplastic-composites-market-report>
- [6] M. Biron, *Thermosets and Composites: Material Selection, Applications, Manufacturing*.
- [7] E. De Engenharia, «Universidade do Minho Escola de Engenharia Rui Nuno Ferreira Pinto Estudo e avaliação experimental de tecnologia IMR (in-mould reinforcement)», 2013.
- [8] J. W. S. Hearle, *High-Performance Fibres*. 2001. [Em linha]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9781855735392/high-performance-fibres>
- [9] A. G. Dumanli e A. H. Windle, «Carbon fibres from cellulosic precursors: A review», *J. Mater. Sci.*, vol. 47, n. 10, pp. 4236–4250, 2012, doi: 10.1007/s10853-011-6081-8.
- [10] M. Ertekin, *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*. 2017.
- [11] R. S. a Rita de Cassia Costa Dias a, Lizandro de Sousa Santos b, Hacène Ouzia c, «Improving degree of cure in pultrusion process by optimizing die-temperature», 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmtcomm.2018.08.017>.
- [12] S. G. A. e K.-T. Hsiao, *Técnicas de fabricação de compósitos de matriz polimérica (PMCs)*. 2012. [Em linha]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780857090676/manufacturing-techniques-for-polymer-matrix-composites-pmcs>
- [13] P. Esfandiari, «Production and Processing of Pre-impregnated Thermoplastic Composites», n. August, 2022.
- [14] A. M. PJ Novo, JF Silva, JP Nunes, *Pultrusão de materiais pré-impregnados termoplásticos reforçados com fibra*. 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.026>.
- [15] M. S. Santos, J. P. Nunes, J. F. Silva, P. J. Novo, e A. T. Marques, «Comparing the Performance of Different Thermoplastic Matrix Pre-impregnated Materials», *Soc. Port.*

Referências

- Mater.*, vol. 15, p. 4800, 2012.
- [16] J. Karger-Kocsis, *Polypropylene - An A-Z reference*. 1999.
- [17] M. Valente, I. Rossitti, e M. Sambucci, «Different Production Processes for Thermoplastic Composite Materials: Sustainability versus Mechanical Properties and Processes Parameter», *Polymers (Basel)*., vol. 15, n. 1, 2023, doi: 10.3390/polym15010242.
- [18] F. Cardona, «Estudo da Produção de Towpregs e Transformação por Pultrusão», 2015.
- [19] N. Yadav e R. Schledjewski, «Inline tape width control for thermoplastic automated tape layup», *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 163, n. September, p. 107267, 2022, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.107267.
- [20] J. Novais, «Fabrico e Transformação de Pré-impregnados de Matriz Termoplástica», *Fac. Eng. da Univ. do Porto*, 2021.
- [21] P. J. Novo, J. F. Silva, J. P. Nunes, e A. T. Marques, «Pultrusion of fibre reinforced thermoplastic pre-impregnated materials», *Compos. Part B Eng.*, vol. 89, pp. 328–339, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.12.026.
- [22] N. Wiegand e E. Mäder, «Commingled yarn spinning for thermoplastic/glass fiber composites», *Fibers*, vol. 5, n. 3, 2017, doi: 10.3390/fib5030026.
- [23] A. Rita e C. Dias, «PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS ECOLOGICAMENTE SUSTENTÁVEIS», 2023.
- [24] M. Asensio *et al.*, «Processing of pre-impregnated thermoplastic towpreg reinforced by continuous glass fibre and recycled PET by pultrusion», *Compos. Part B Eng.*, vol. 200, n. April, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108365.
- [25] C. Budiyantoro, H. S. B. Rochardjo, e G. Nugroho, «Effects of processing variables of extrusion–pultrusion method on the impregnation quality of thermoplastic composite filaments», *Polymers (Basel)*., vol. 12, n. 12, pp. 1–24, 2020, doi: 10.3390/polym12122833.
- [26] G. Struzziero, G. M. Maistros, J. Hartley, e A. A. Skordos, «Materials modelling and process simulation of the pultrusion of curved parts», *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 144, n. November 2020, p. 106328, 2021, doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106328.
- [27] K. Minchenkov, A. Vedernikov, A. Safonov, e I. Akhatov, «Thermoplastic pultrusion: A review», *Polymers (Basel)*., vol. 13, n. 2, pp. 1–36, 2021, doi: 10.3390/polym13020180.
- [28] D. J. W. Michaeli, «Trançamento termoplástico: Pultrusão de perfis com disposição de fibra trançada e sistema de matriz termoplástica (PP)», 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(95\)00004-L](https://doi.org/10.1016/1359-835X(95)00004-L).
- [29] T. F. A. a M.K. Eriksen a, J.D. Christiansen b, A.E. Daugaard c, «Closing the loop for PET, PE and PP waste from households: Influence of material properties and product design for plastic recycling», 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.005>.
- [30] D. Di Mondo, «The Challenge of Waste Plastics – Striving For a More Circular Economy». [Em linha]. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/challenge-waste-plastics-striving-more-circular-economy-di-mondo/>
- [31] B. A. Newcomb, *Processing, structure, and properties of carbon fibers*. 2016. doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.018>.
- [32] «SGL CARBON». [Em linha]. Disponível em:
<https://www.sgllcarbon.com/loesungen/material/sigrafil-carbon-endlosfasern/>
- [33] «Mat Web». [Em linha]. Disponível em:
<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=c44104051bd14675a636e5fcdb2bbde&ckck=1>
- [34] J. N. TP Sathishkumar, S Satheeshkumar, «Glass fiber-reinforced polymer composites – a review», 2014. doi: <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>.
- [35] «O. Corning, “Owens Corning 305E-TYPE 30 Direct Roving.”» [Em linha]. Disponível em:
<https://owenscorning-brazil.com/upload/produto/pdf/a16a0b62-f9d1-463b-99c0-52e346120c29.pdf>
- [36] G. Odian, *Principles of Polymerization*. doi: DOI:10.1002/047147875X.
- [37] D. C. W. T. and L. Wang, *Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes*. 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824004-5.00006-2>.

Referências

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: João Machado Ramos

ISEP, Porto, 13 de setembro de 2024

Declaração de Integridade

Apêndices

Apêndice A – Resultados dos ensaios de calcinação

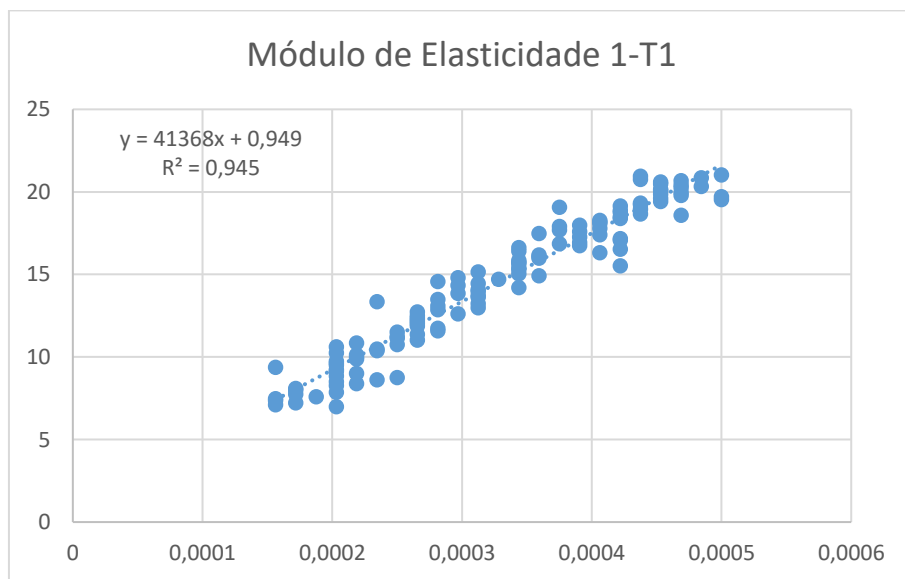
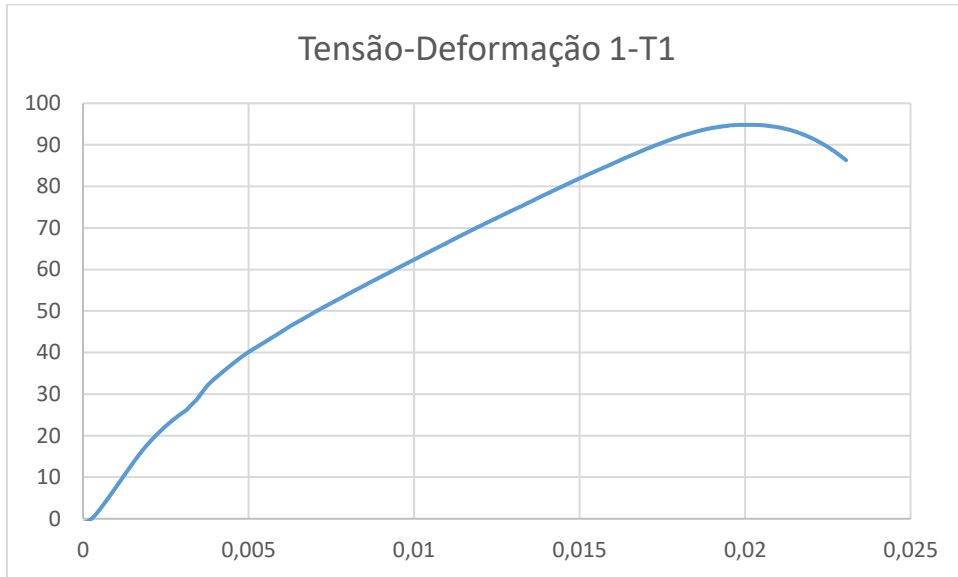
Amostra	Massa cadinho	Massa cadinho + amostra	Massa cad + fibras FC	Massa cad + fibras FV	$w_f(\%)$
1 – A1	19,0411	21,5840	20,6428	20,3940	10% - FC 53% - FV
1 – A2	20,7797	22,2304	21,6893	21,5494	
1 – A3	20,6822	22,8442	22,0489	21,8454	
2 – A1	19,0046	20,4774	19,9723	19,8019	11% - FC 55% - FV
2 – A2	20,1800	21,4766	21,0607	20,9071	
2 – A3	16,7134	19,2980	18,4134	18,1378	
3 – A1	16,7213	18,9406	18,2291	17,9647	12% - FC 56% - FV
3 – A2	20,7798	22,0939	21,6918	21,5321	
3 – A3	19,4379	21,6402	20,9254	20,6532	
4 – A1	19,4639	20,8707	20,5091	20,3313	13% - FC 62% - FV
4 – A2	19,1863	21,7772	21,1197	20,7951	
4 – A3	20,7371	23,3340	22,6798	22,3581	
5 – A1	16,7580	19,0742	18,3813	18,0706	14% - FC 56% - FV
5 – A2	21,5066	23,5214	22,8820	22,6018	
5 – A3	19,9342	23,4667	22,3788	21,9030	
6 – A1	20,1383	22,4998	21,6514	21,3099	15% - FC 50% - FV
6 – A2	20,7037	24,1088	22,8890	22,3952	
6 – A3	20,3326	22,1717	21,5191	21,2517	
7 – A1	22,6023	23,9078	23,5487	23,2801	21% - FC 53% - FV
7 – A2	21,2526	23,7468	23,1444	22,6186	
7 – A3	18,0715	19,4615	19,1060	18,8105	
rPET – A1	20,7774	22,6765	21,6395		45% - FC
rPET – A2	20,1796	22,0662	21,0200	-	
rPET – A3	16,7108	20,2769	18,3306	-	

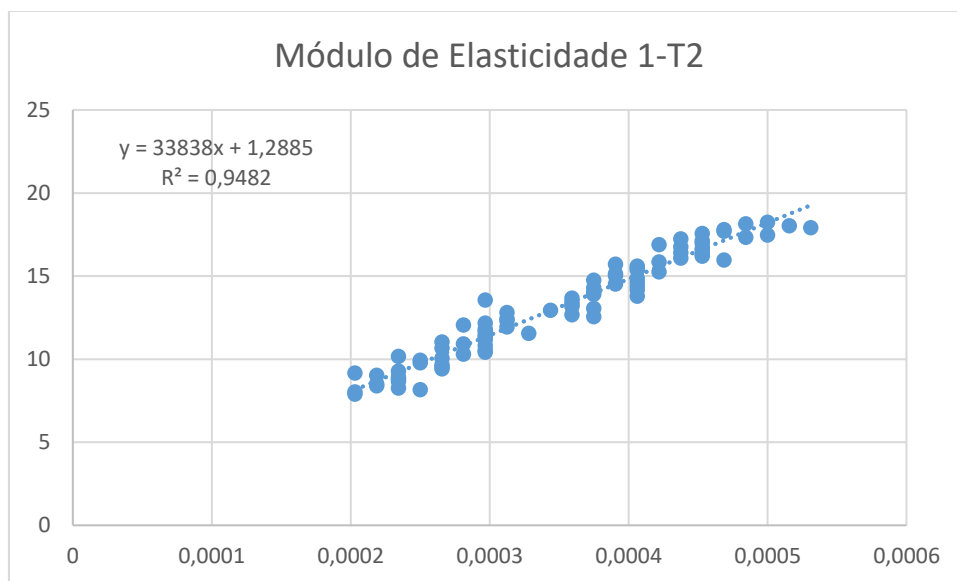
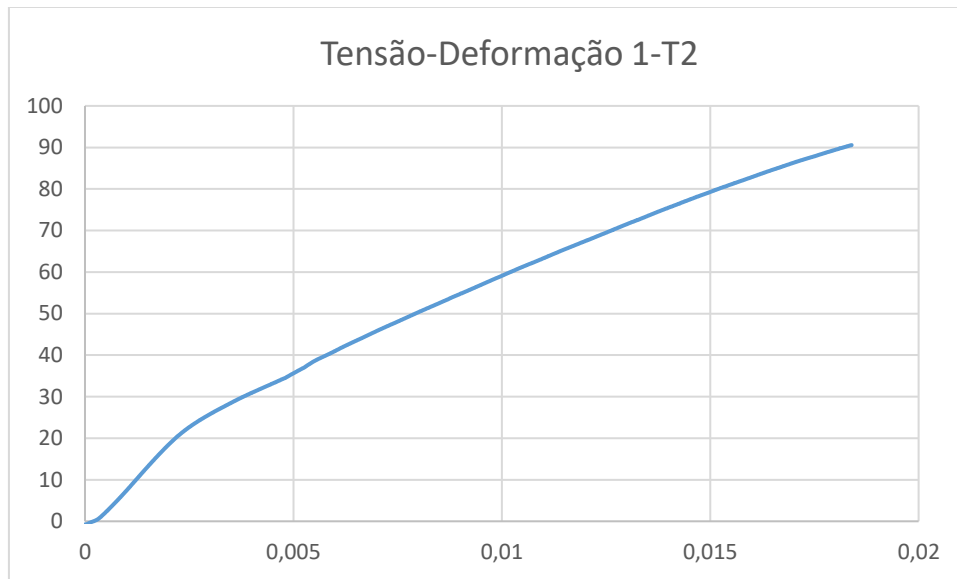
Apêndice B – Dimensões dos provetes ensaiados

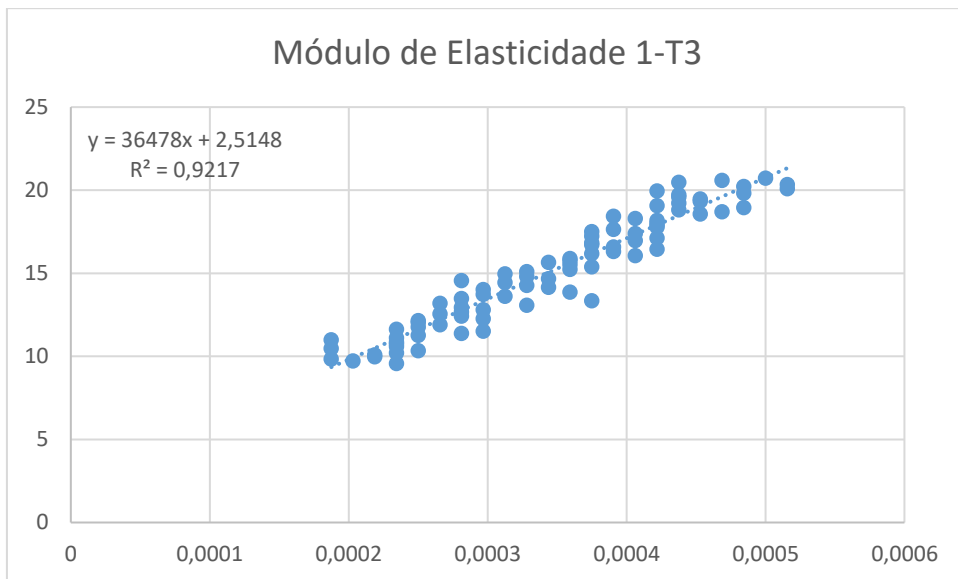
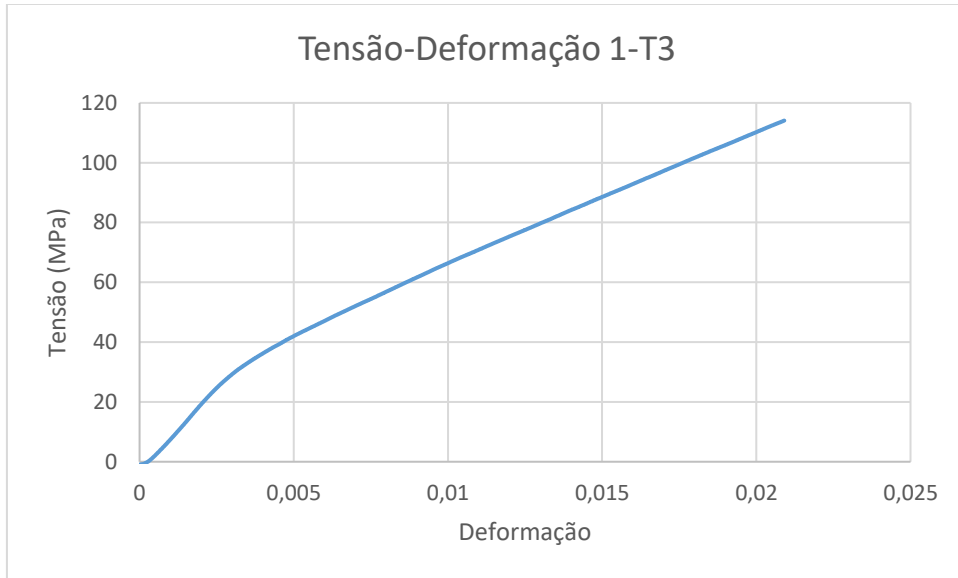
Condição	Provete	h (mm)			Média h	b (mm)			Média b
1	1-F1	18,95	18,94	18,94	18,94	1,99	1,97	1,97	1,98
	1-F2	18,60	20,12	19,88	19,53	1,97	2,12	2,05	2,05
	1-F3	19,16	18,72	18,79	18,89	1,96	1,97	1,99	1,97
	1-F4	19,07	19,01	18,75	18,94	1,99	1,98	1,96	1,98
	1-F5	19,11	19,25	19,04	19,13	1,97	1,95	1,96	1,96
	1-F6	18,57	18,77	18,76	18,70	1,93	1,93	1,96	1,94
2	2-F1	19,28	18,86	18,52	18,89	1,98	1,98	1,95	1,97
	2-F2	18,29	17,92	18,12	18,11	1,95	1,95	1,98	1,96
	2-F3	19,27	18,75	18,76	18,93	2,11	1,97	1,97	2,02
	2-F4	18,64	18,76	18,63	18,68	1,95	2,02	1,97	1,98
	2-F5	18,77	18,51	18,60	18,63	1,99	1,96	1,96	1,97
3	3-F1	19,64	19,30	18,94	18,58	1,95	1,98	2,04	1,99
	3-F2	19,64	19,30	18,94	19,23	2,49	2,05	2,00	2,18
	3-F3	18,88	19,18	19,16	19,29	2,04	1,95	1,93	2,18
4	4-F1	19,17	19,13	19,04	19,11	1,98	1,98	1,95	1,97
	4-F2	19,14	19,57	19,25	19,32	1,97	2,04	2,00	2,00
	4-F3	19,23	19,17	19,29	19,23	1,96	1,97	1,95	1,96
	4-F4	19,54	19,74	19,02	19,43	1,98	2,03	2,00	2,00
	4-F5	19,22	19,24	19,20	19,22	1,99	1,96	1,98	1,98
	4-F6	19,20	19,23	19,20	19,21	2,00	2,00	1,98	1,99
5	5-F1	19,35	19,89	19,90	19,35	1,99	2,02	2,16	2,06
	5-F2	19,30	19,44	19,31	19,35	1,99	2,00	2,01	2,00
	5-F3	19,23	19,12	19,15	19,17	1,97	1,96	2,00	1,98
	5-F4	19,23	19,23	19,48	19,31	2,01	1,99	2,03	2,01
	5-F5	19,20	19,21	19,20	19,20	1,98	1,98	2,00	1,99
6	6-F1	18,86	19,26	19,15	19,09	2,01	2,01	2,07	2,04
	6-F2	19,46	19,27	18,90	19,21	2,04	2,00	1,95	1,99
	6-F3	18,30	17,98	18,34	18,21	1,99	1,99	2,03	2,00
	6-F4	18,59	18,71	19,71	19,00	1,94	1,95	2,00	1,96
	6-F5	19,18	19,61	18,90	19,23	2,02	2,01	2,00	2,01
	6-F6	18,75	18,26	18,58	18,53	2,00	1,98	2,01	1,99
7	7-F1	18,50	18,91	18,85	18,75	1,93	1,95	1,97	1,95
	7-F2	19,15	19,20	19,55	19,30	1,97	2,00	2,07	2,01

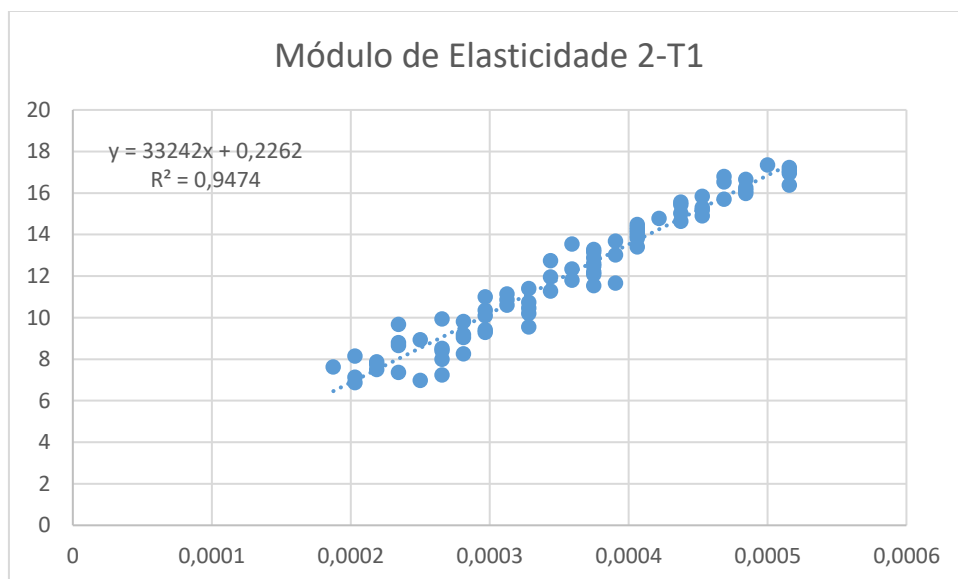
	7-F3	18,33	18,78	19,21	18,77	1,98	1,94	1,95	1,96
	7-F4	19,15	19,11	18,65	18,97	2,00	1,87	1,95	1,94
	7-F5	18,71	19,02	18,59	18,77	1,98	1,92	1,95	1,95
	7-F6	18,90	18,60	18,78	18,76	2,07	1,95	2,01	2,01
rPET	rPET-1	19,12	18,84	19,37	19,11	1,95	1,93	2,00	1,96
	rPET-2	19,79	19,85	19,62	19,75	1,98	1,99	2,01	1,99
	rPET-3	19,96	19,74	19,88	19,86	2,00	2,00	2,00	2,00
	rPET-4	19,45	19,07	18,62	19,05	1,94	1,93	1,97	1,95
	rPET-5	19,07	19,08	19,38	19,05	1,99	2,00	2,02	1,95
	rPET-6	18,60	18,49	18,93	18,67	2,00	2,00	1,97	1,99

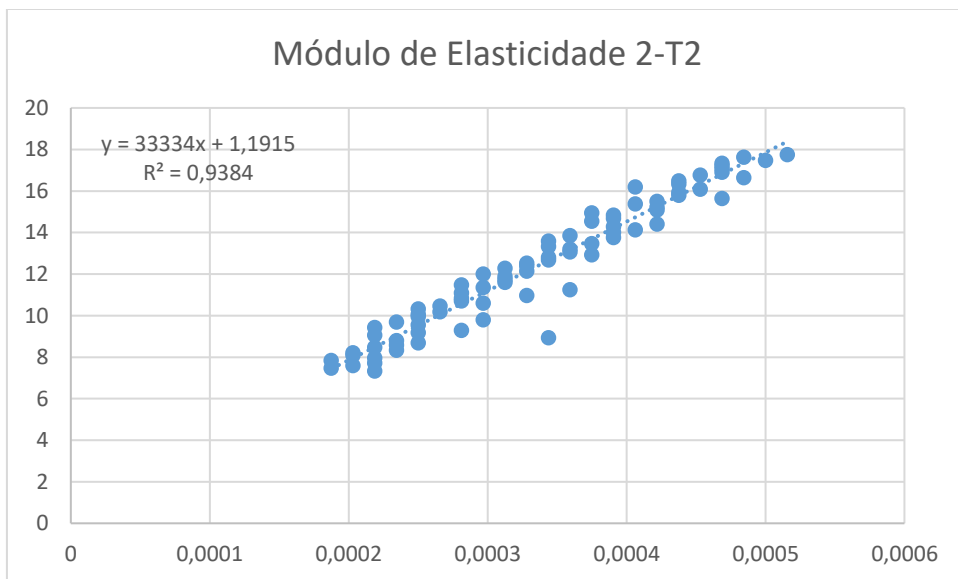
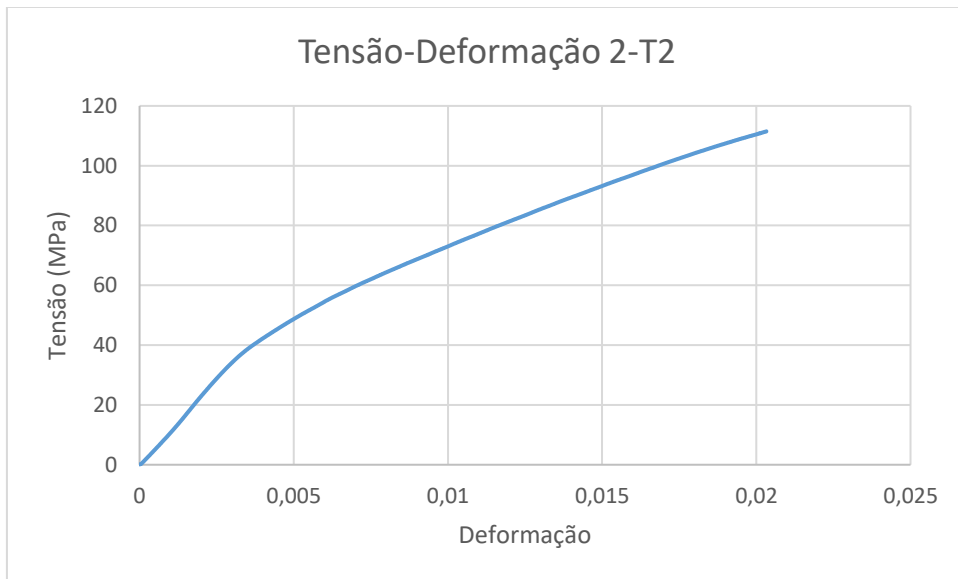
Apêndice C – Resultados dos ensaios de tração

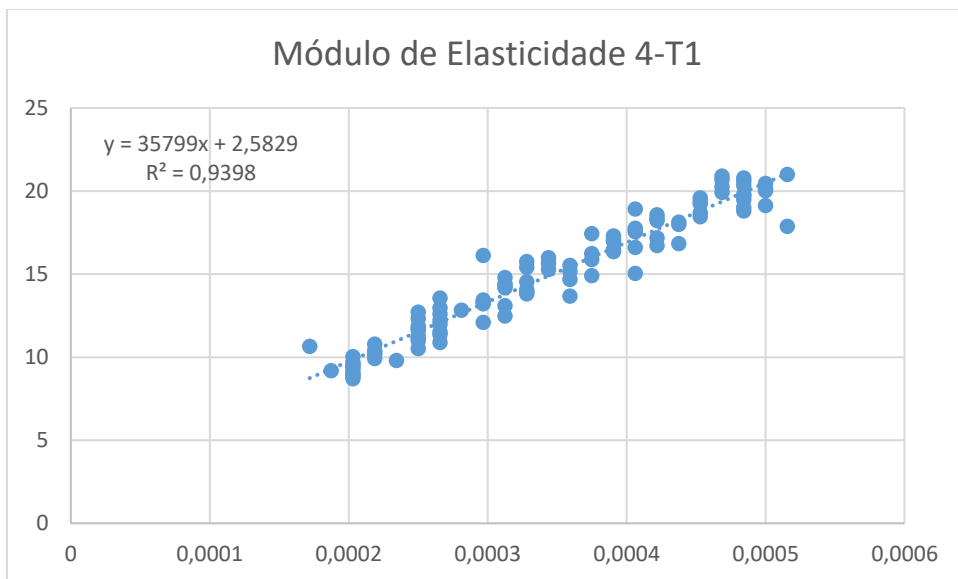
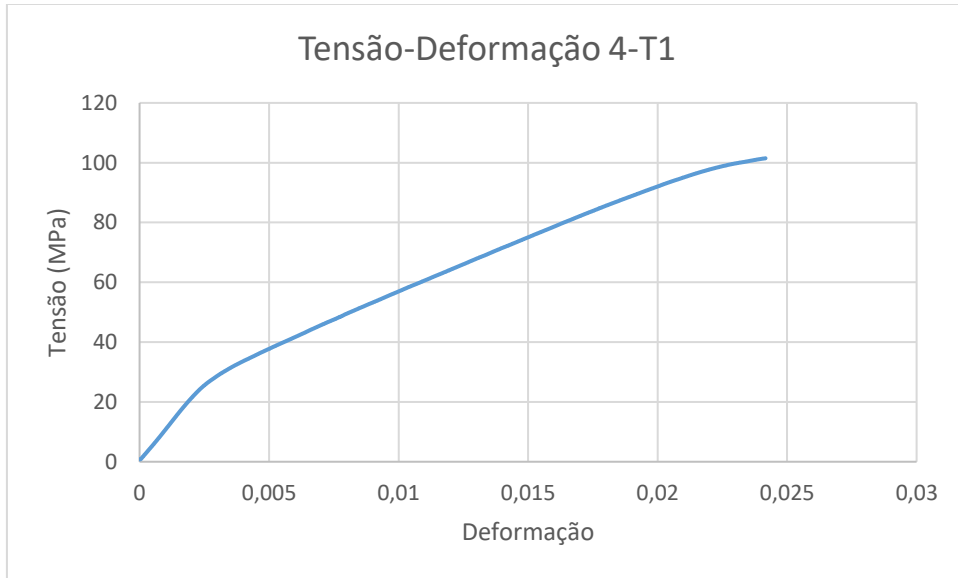


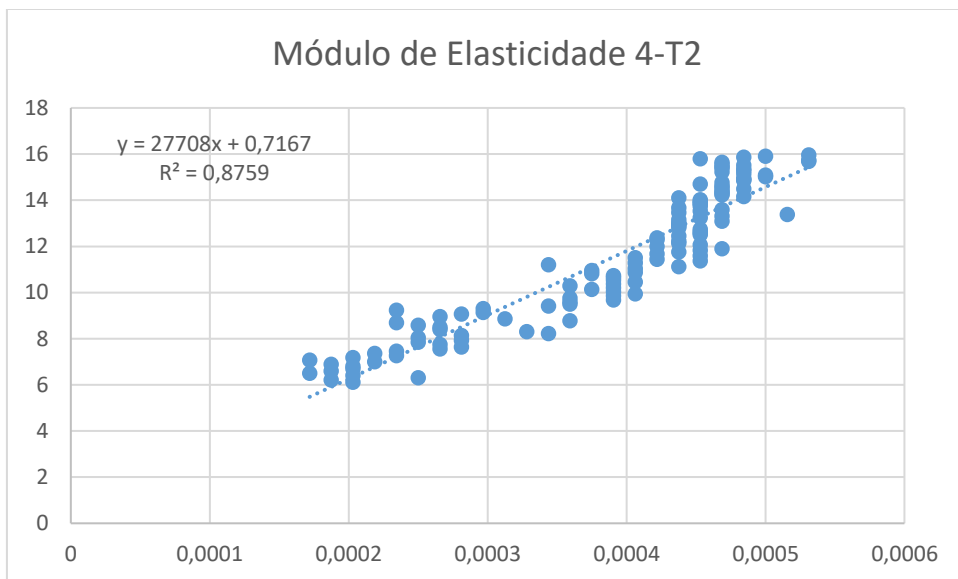
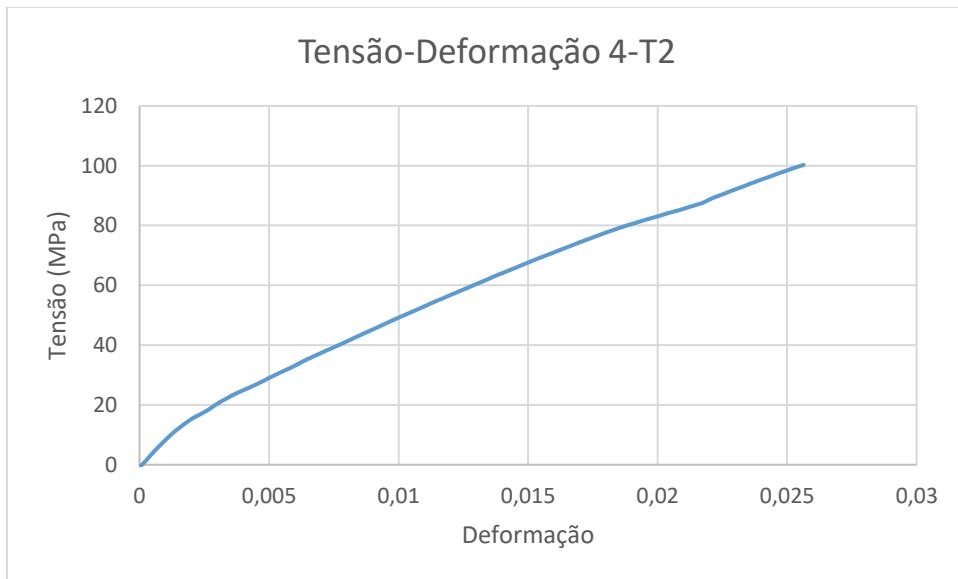


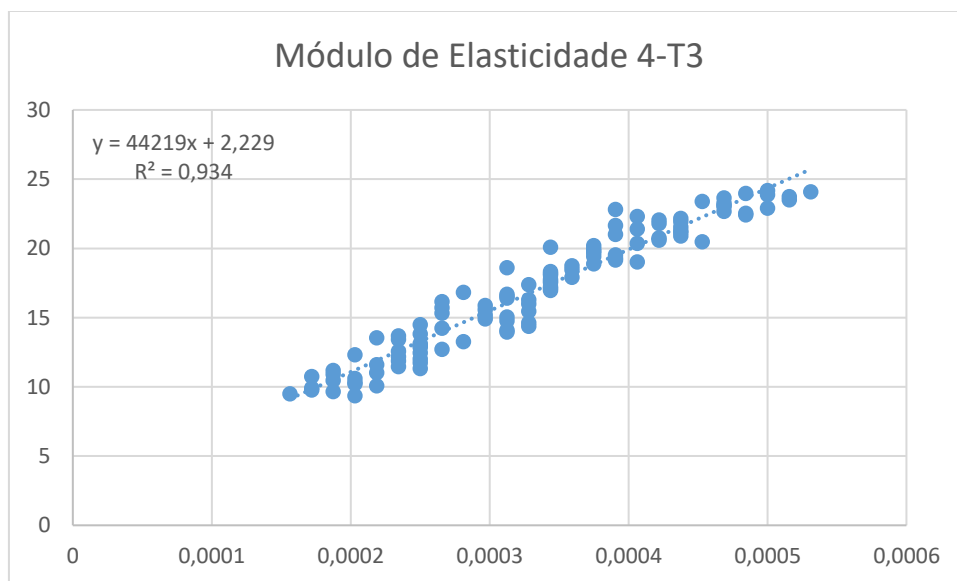


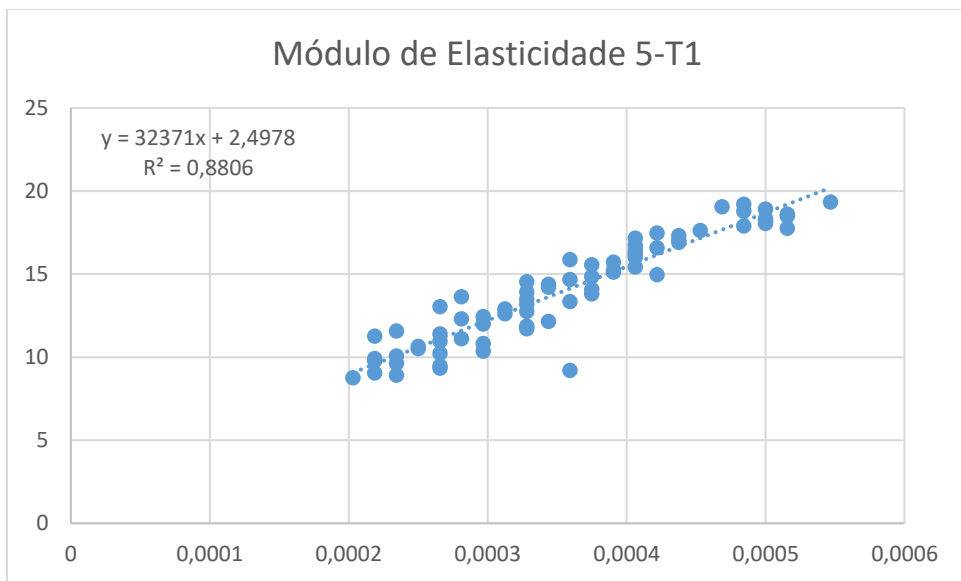
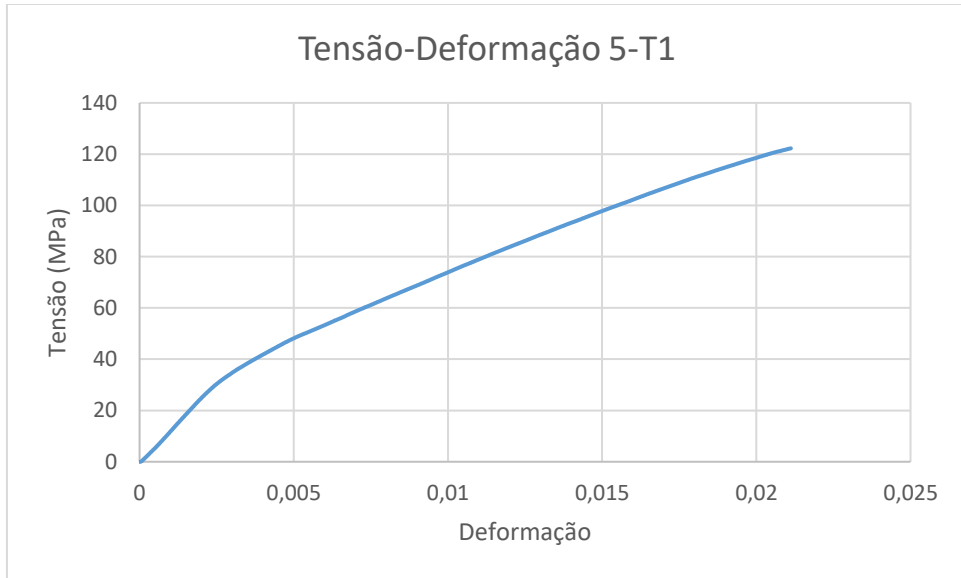


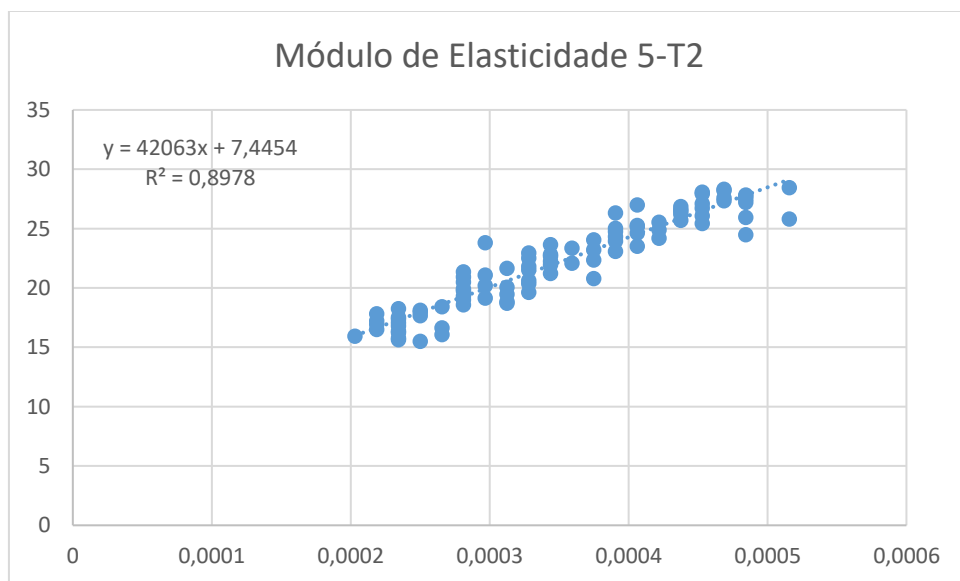
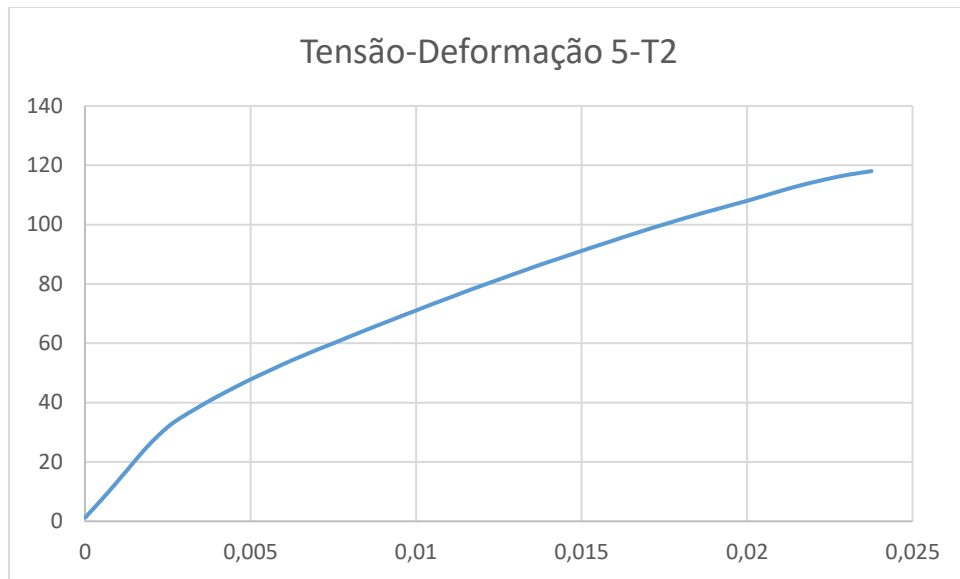


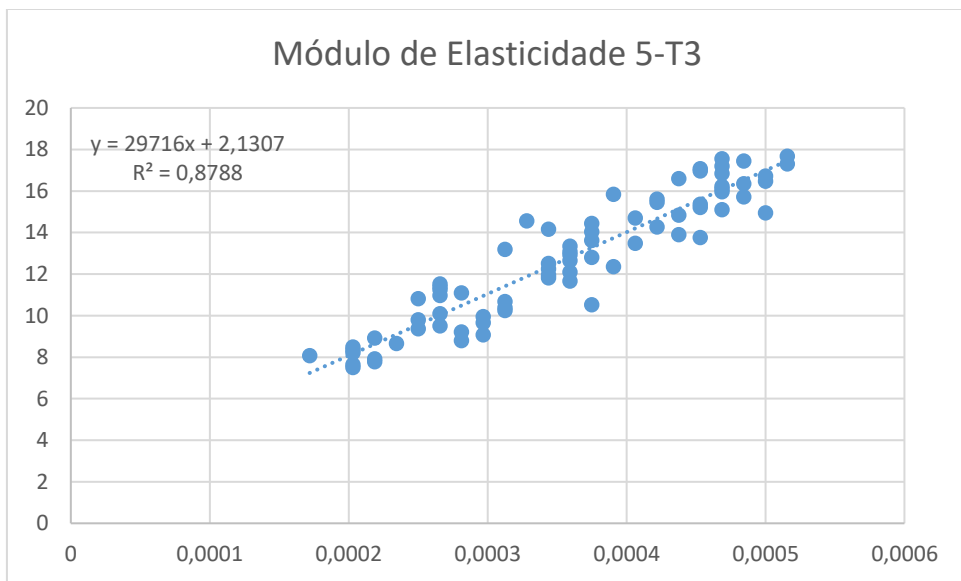
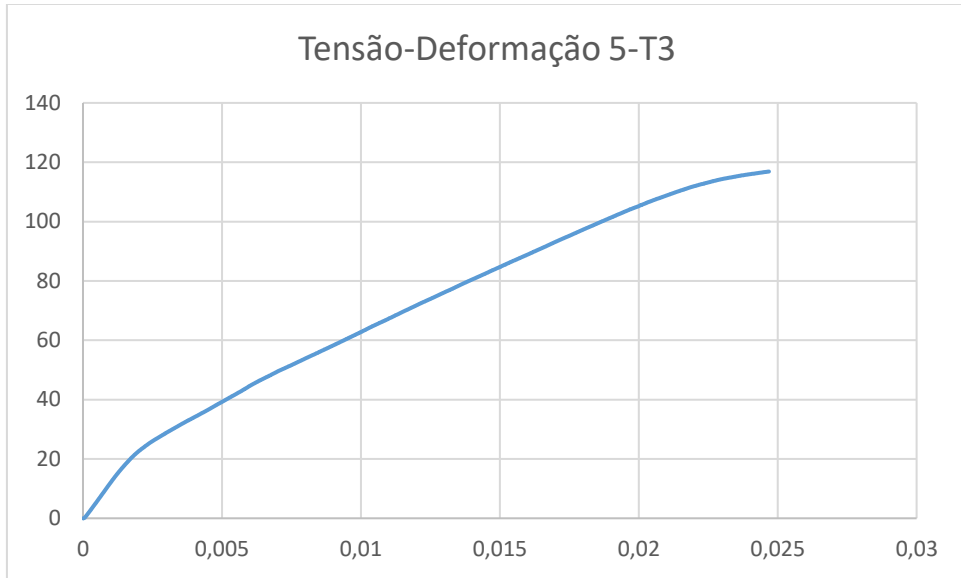


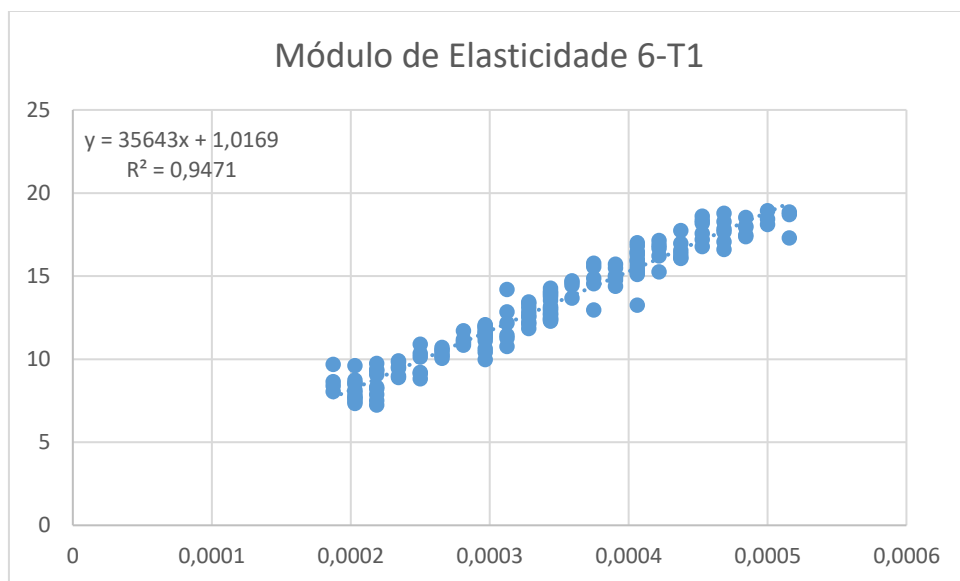
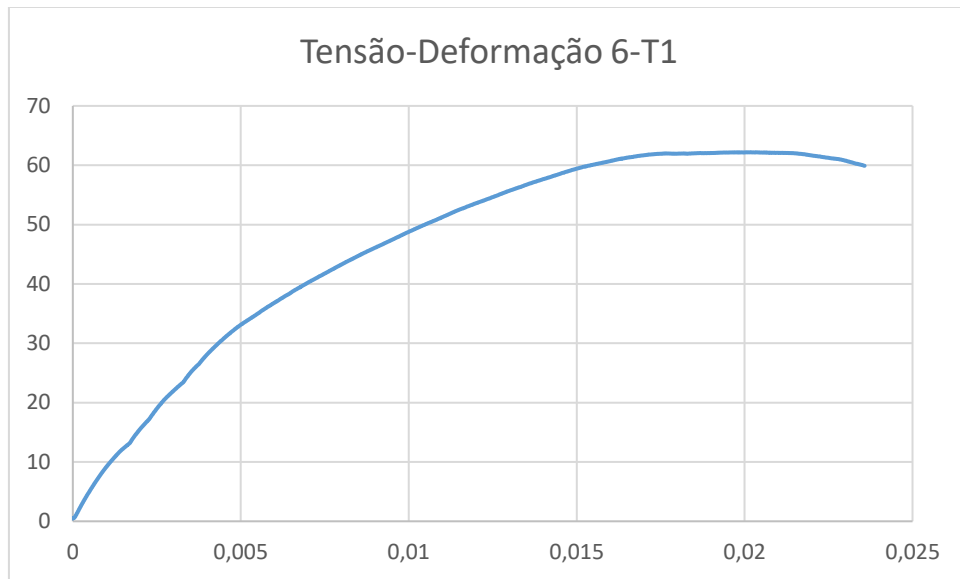


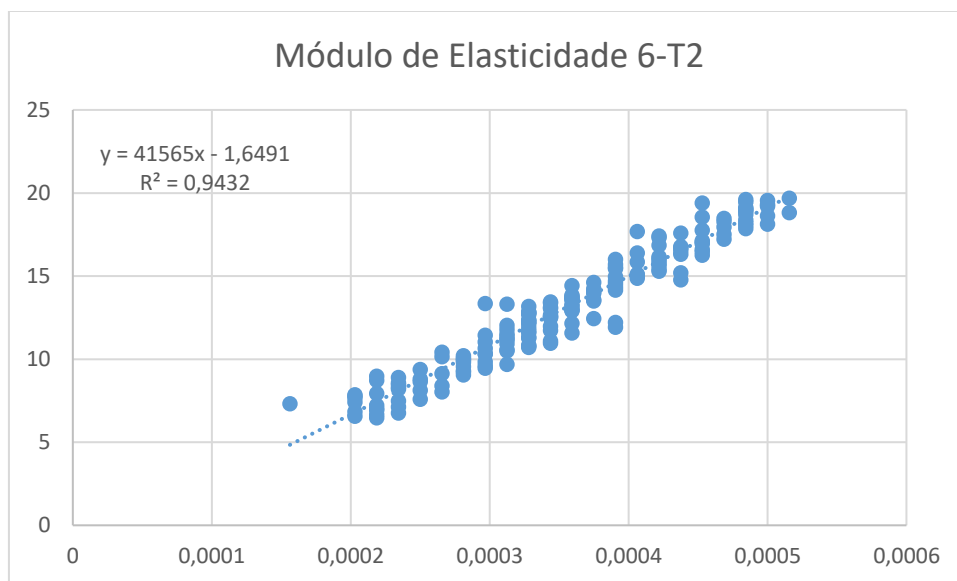
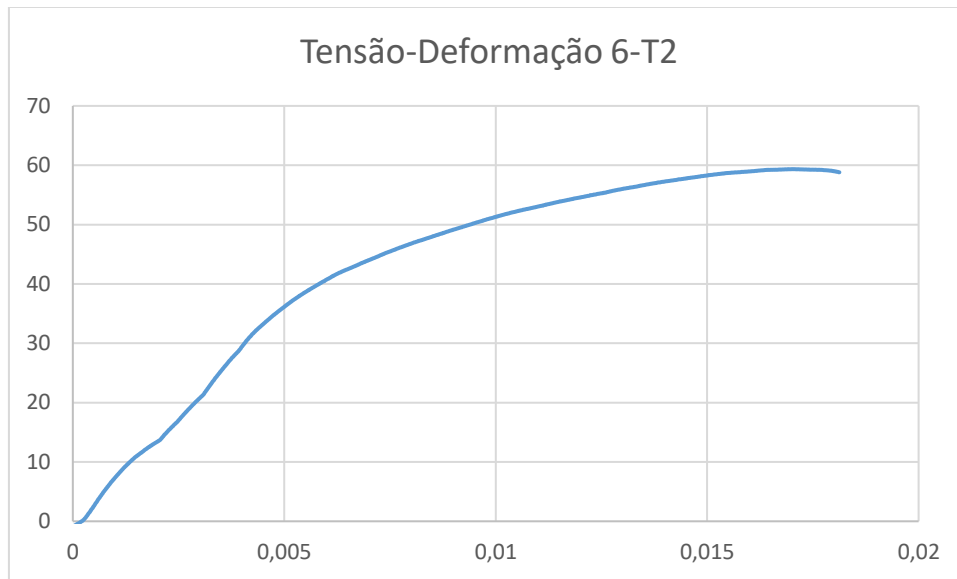


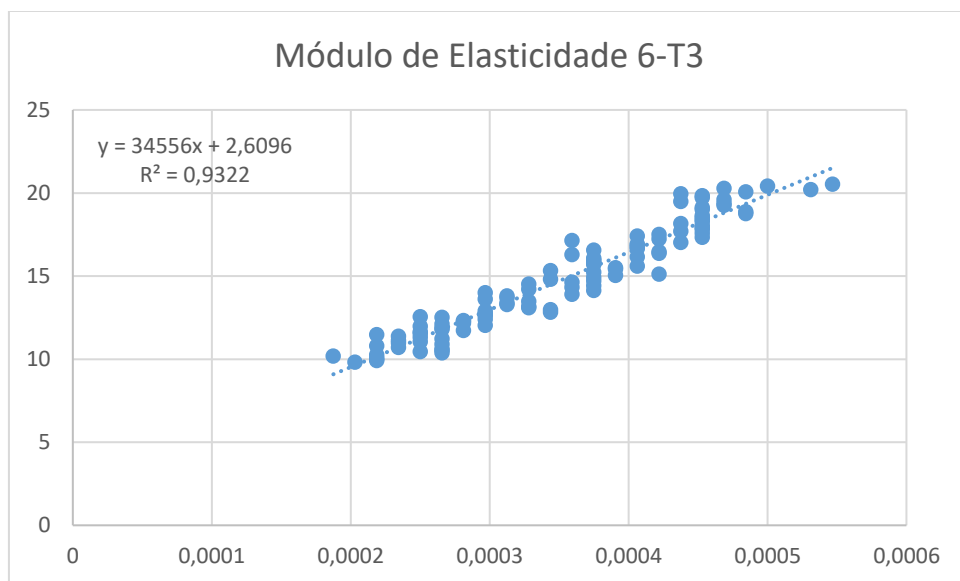
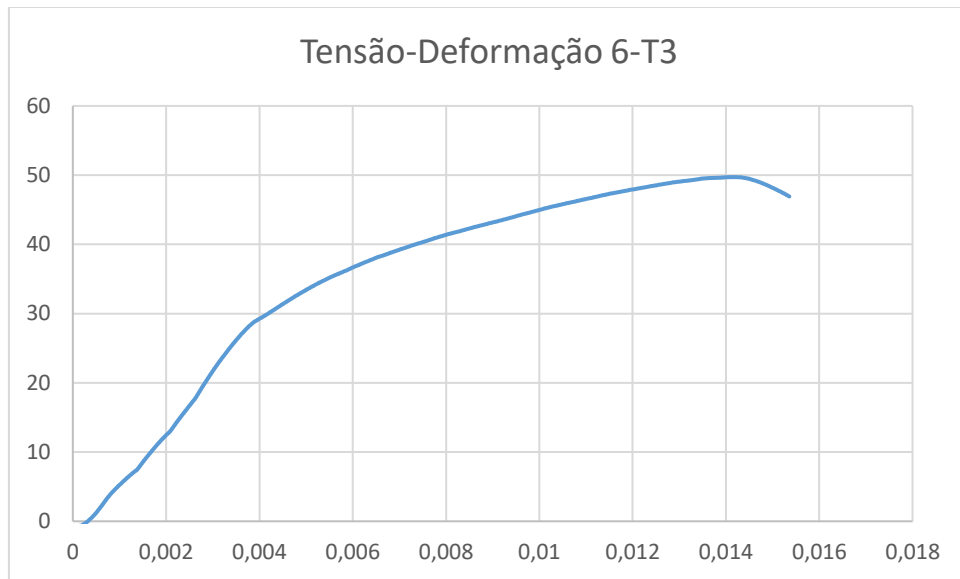


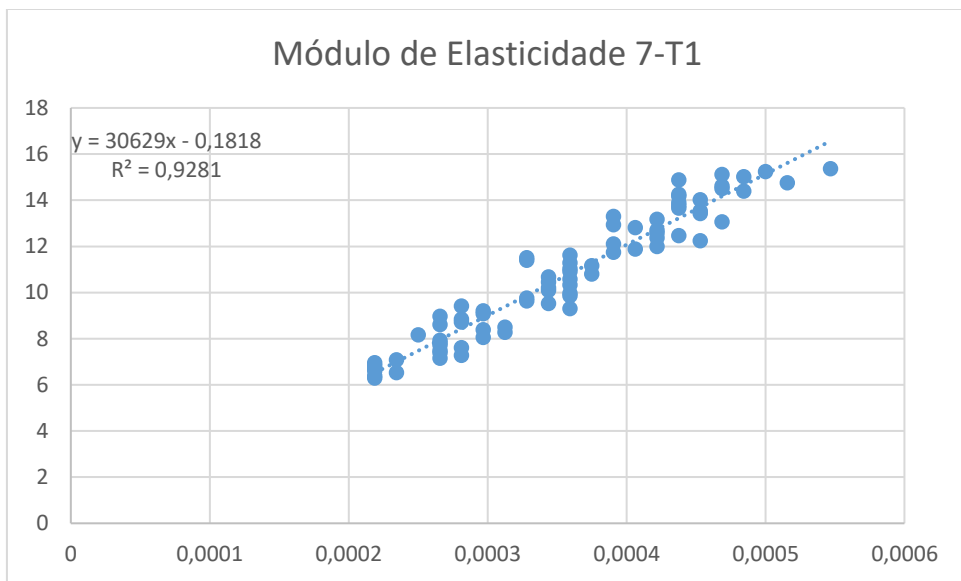
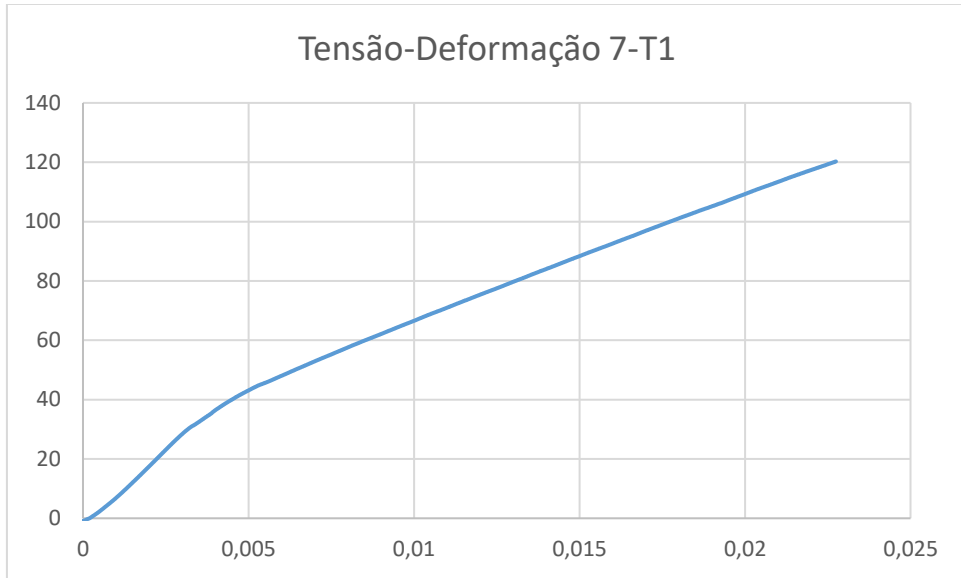


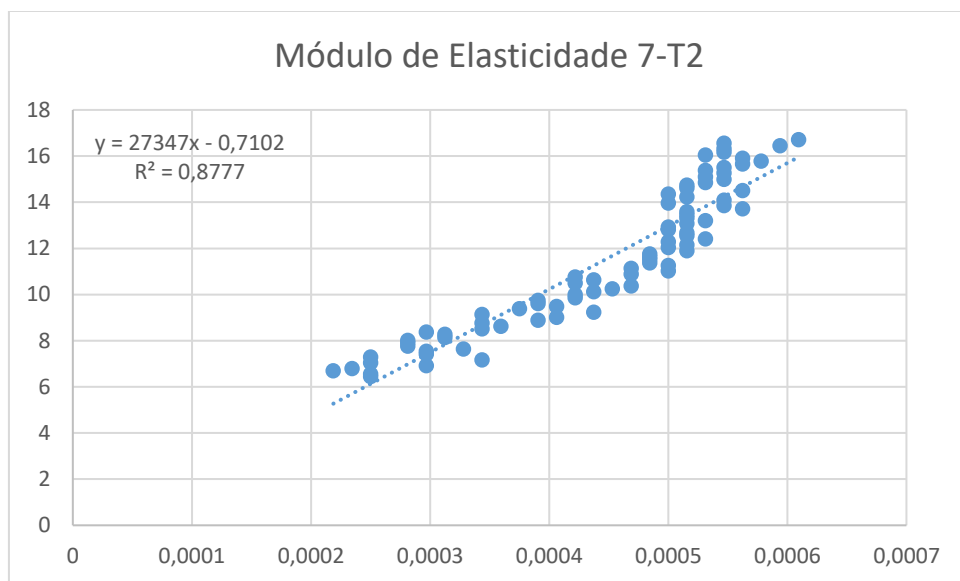
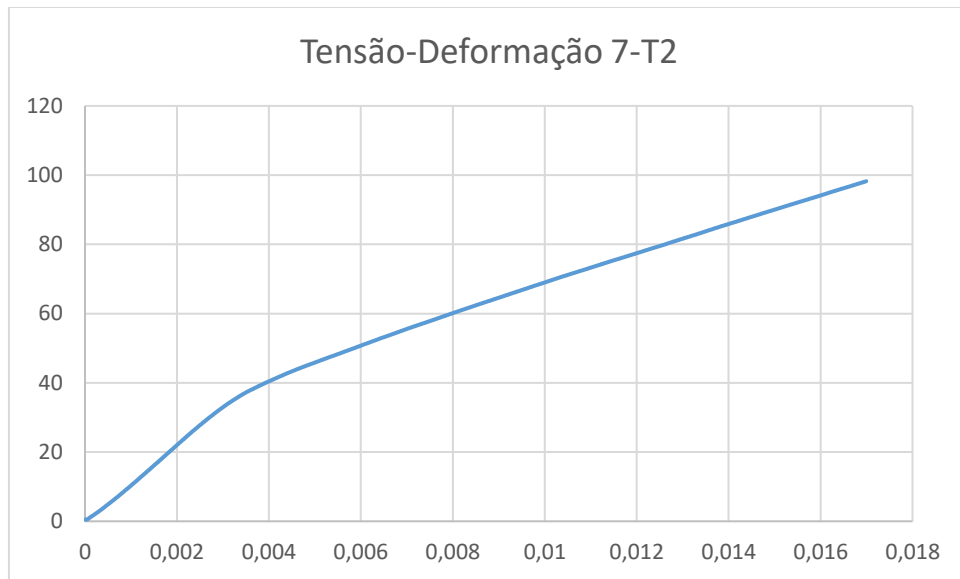


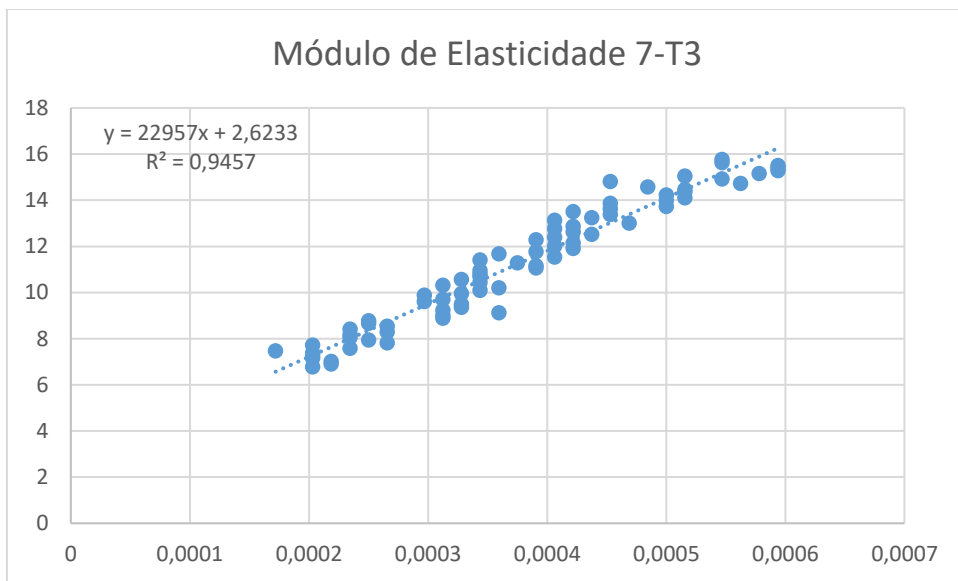
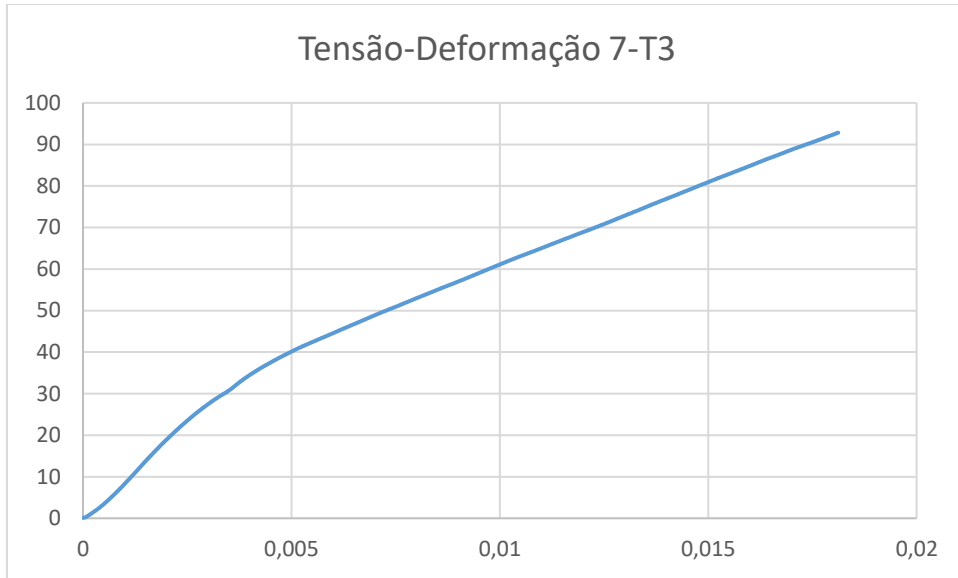


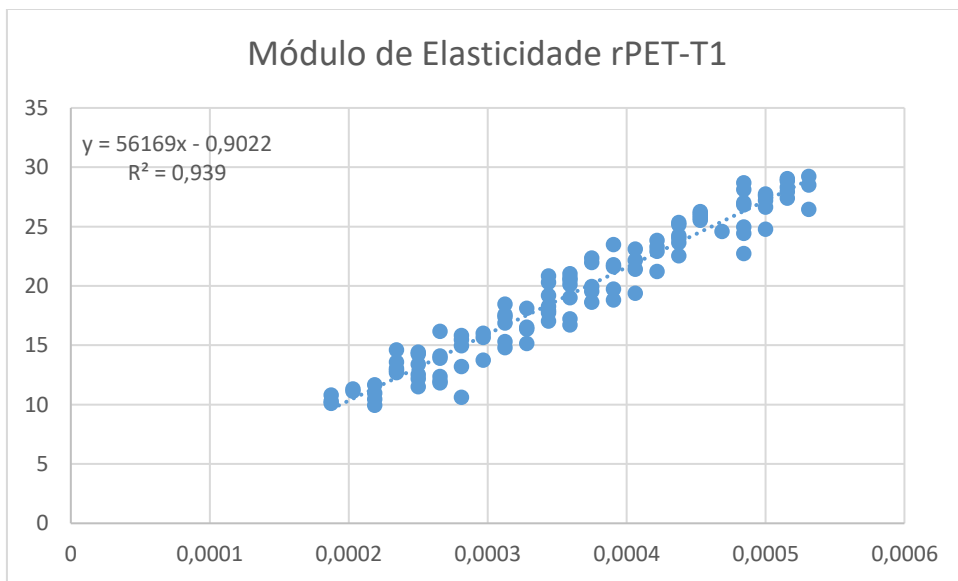
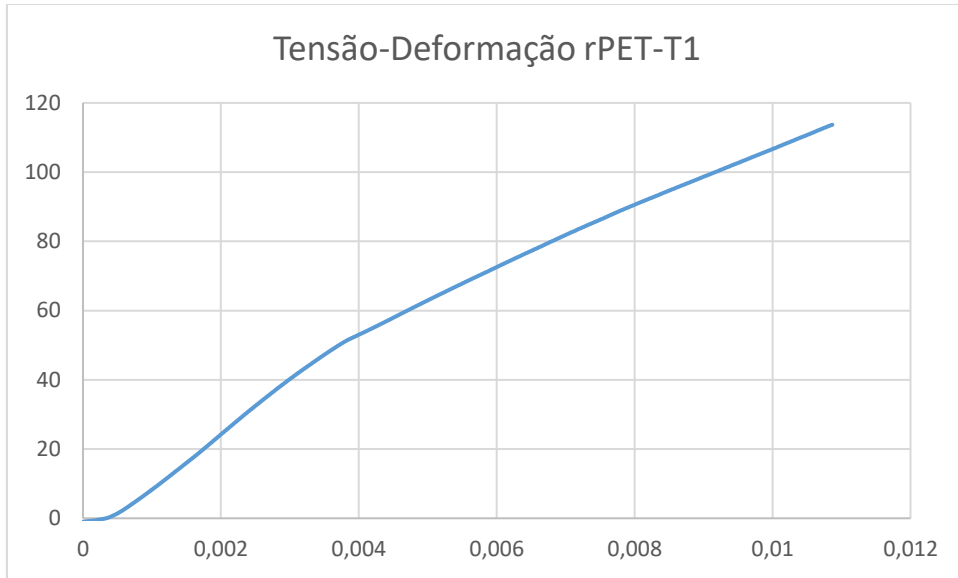


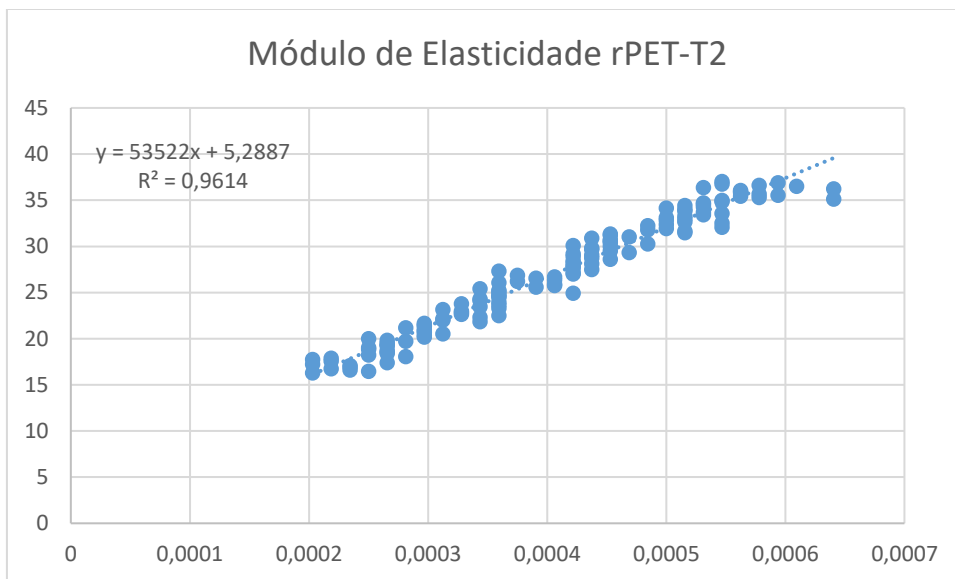
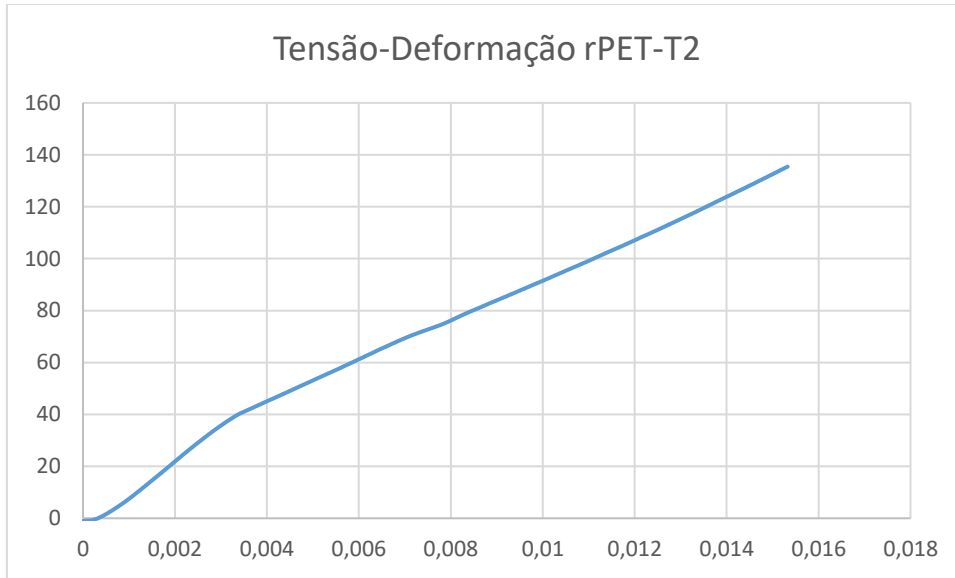


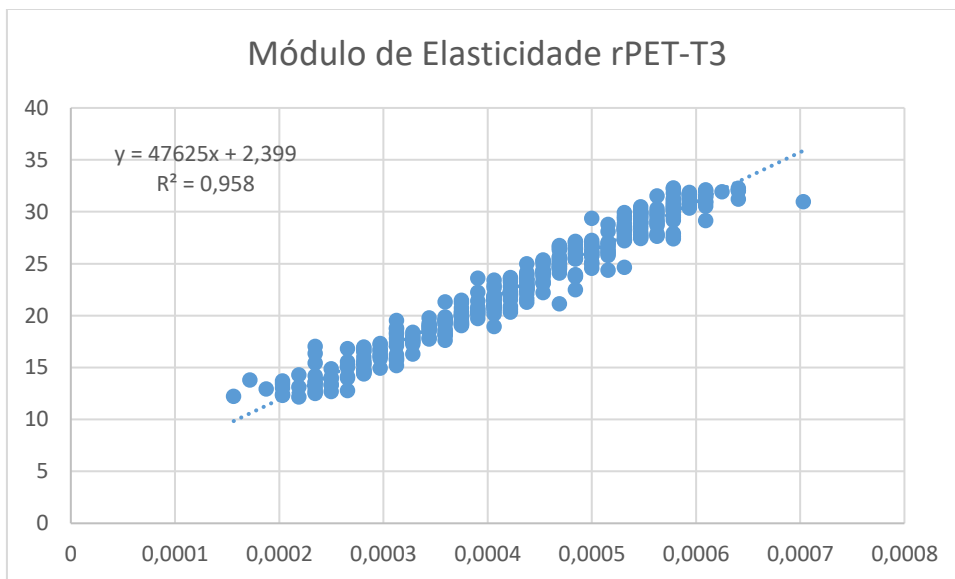
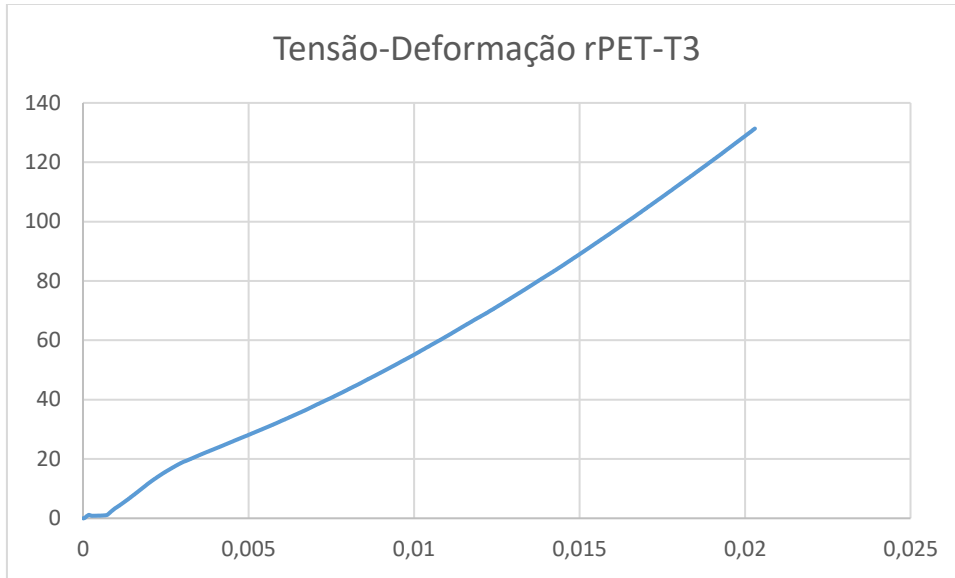












Apêndice D – Resultados dos ensaios de flexão

