



PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS ECOLOGICAMENTE SUSTENTÁVEIS

ANA RITA CAIXEIRO DIAS CARREIRAS

julho de 2023

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS ECOLOGICAMENTE SUSTENTÁVEIS

Ana Rita Caixeiro Dias Carreiras

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS ECOLOGICAMENTE SUSTENTÁVEIS

Ana Rita Caixeiro Dias Carreiras

1181118

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Púria Esfandiari e coorientação do Professor Doutor António Gonçalves Magalhães.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecer aos meus pais, Daniela e José, por me proporcionarem a possibilidade de obter este grau académico, por todo amor e reconhecimento e por serem os maiores pilares da minha vida em todos os aspetos. Aos meus irmãos, Margarida e Miguel, por me motivarem a ser sempre a melhor versão de mim e por me apoiarem nos bons e maus momentos.

Um agradecimento especial aos meus avós que acompanharam sempre o meu crescimento e que continuam a presentear-me com o amor e apoio incondicional.

Passo a agradecer ao meu orientador, Professor Púria Esfandiari, que desde o início me apoiou e auxiliou na execução desta dissertação, bem como na gestão dos problemas que surgiram durante a sua execução. Agradeço todos os conhecimentos e sabedoria que transmitiu e pela sua simpatia e amizade ao longo da elaboração deste trabalho.

Ao meu coorientador, Professor António Magalhães, agradeço a confiança que sempre demonstrou no meu trabalho desde a licenciatura, todos os conhecimentos transmitidos e todo o apoio demonstrado.

Agradeço também ao Professor João Francisco Silva, pela disponibilidade e ajuda em todos os momentos.

Deixo também o agradecimento ao Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, especialmente aos docentes e técnicos dos laboratórios pelo apoio e simpatia.

Não poderia deixar de mencionar os meus colegas de investigação, Andreia Afonso, Diogo Vieira e Manuel Soares por todo o apoio na execução desta dissertação, a amizade e pela marcante presença na minha vida ao longo de períodos desafiantes.

Agradeço também aos meus amigos que sempre apoiaram as minhas decisões e que estão presentes nos bons e nos maus momentos.

Um último agradecimento a Agência Nacional de Inovação (ANI), pelo projeto ADD.CompFiber (69603) que facultaram o apoio financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

página propositadamente em branco

RESUMO

A crescente pressão nos ecossistemas pela exploração excessiva de recursos cria a necessidade de encontrar soluções para a falta de matérias-primas e para a indevida disposição de resíduos com potencialidade de serem reaproveitados. A introdução de termoplásticos reciclados em materiais compósitos é uma forma de fechar o ciclo de vida dos polímeros, permitindo que, matéria que de outra forma seria enviada para aterro, seja introduzida no fabrico de novos materiais de engenharia.

Na presente dissertação é apresentado o trabalho experimental de integração de materiais reciclados na produção de novos materiais compósitos. São apresentados os conceitos base para a compreensão da produção de materiais compósitos de matriz termoplástica, os seus constituintes, os objetivos do material a ser produzido e, também, o processo de reciclagem de termoplásticos para a sua integração na produção de novos semi-produtos.

No decurso desta dissertação, foram produzidos pré-impregnados de matriz termoplástica, utilizando o Polietileno Tereftalato (PET) tanto na forma de polímero virgem como reciclado. Após se obter os pré-impregnados, procedeu-se à sua transformação por compressão a quente, para o fabrico de laminados compósitos. Durante o processo realizou-se análise da consolidação, de forma a otimizar os tempos de processamento.

De forma a avaliar a qualidade dos materiais produzidos, e permitir um comparativo eficaz entre os materiais produzidos a partir de PET virgem e reciclado, realizaram-se ensaios mecânicos de tração e de flexão, assim como ensaios de calcinação para avaliar os teores de fibra e polímero presentes no compósito. Foram também realizados ensaios óticos com vista a analisar a dispersão de fibras e polímero no pré-impregnado e nos compósitos finais.

PALAVRAS-CHAVE

Materiais compósitos, compósitos termoplásticos, reciclagem, fitas pré-impregnadas, PET reciclado.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

The increasing pressure on ecosystems due to the overexploitation of resources creates the need to find solutions to the lack of raw materials and the improper disposal of waste with the potential to be reused. The introduction of recycled thermoplastics in composite materials is a way to close the life cycle of polymers, allowing material that would otherwise be sent to landfill to be introduced in the manufacture of new engineering materials.

In this dissertation is presented the experimental work of integration of recycled materials in the production of new composite materials. The basic concepts for the understanding of the production of thermoplastic matrix composite materials, their constituents, the objectives of the material to be produced and the thermoplastic recycling process for its integration in the production of new semi-products are presented.

During this dissertation, thermoplastic matrix preregs were produced, using Polyethylene Terephthalate (PET) in both virgin and recycled polymer form. After obtaining the preregs, they were processed by hot compression to produce composite laminates. During the process, consolidation analysis was performed to optimize the processing times.

In order to evaluate the quality of the materials produced, and to allow an effective comparison between the materials produced from virgin and recycled PET, tensile and bending mechanical tests were performed, as well as calcination tests to assess the fibre and polymer contents in the composite. Optical tests were also performed to analyze the dispersion of fibres and polymers in the prepreg and in the final composites.

KEYWORDS

Composite materials, thermoplastic composites, recycling, pre-impregnated tapes, recycled PET.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

Índice de Figuras	VII
Índice de Tabelas.....	IX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XI
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização	15
1.2 Objetivos	16
1.3 Metodologia	16
1.4 Estrutura da Dissertação	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Materiais Compósitos.....	19
2.2 Matrizes poliméricas	21
2.2.1 Matrizes termoendurecíveis	21
2.2.2 Matrizes termoplásticas.....	23
2.3 Reforços em fibra	24
2.4 Semi-Produtos	27
2.4.1 Compostos de Moldação	28
2.4.2 Pré-impregnados.....	28
2.5 Pré-impregnadas de matrizes termoplásticas.....	30
2.5.1 <i>Towpregs</i>	30
2.5.2 <i>Commingled fibres</i>	31
2.5.3 Fitas pré-impregnadas	33
2.5.4 Impregnação por camadas alternadas de fibras e polímero	35
2.5.5 Matrizes termoplásticas recicladas.....	36
3. MÉTODOS E APLICAÇÃO	39
3.1 Materiais utilizados	39
3.1.1 PET	39
3.1.2 PET reciclado	40
3.1.3 Fibras de carbono.....	41
3.2 Caracterização dos polímeros	42
3.2.1 Análise Termogravimétrica (TGA)	42
3.2.2 Índice de Fluidez - MFI	42
3.2 Produção dos pré-impregnados	44
3.2.1 Equipamento	44
3.2.2 Parâmetros de processo	47
3.3 Transformação dos pré-impregnados.....	48
3.3.1 Processamento por Compressão a quente	48
3.3.2 Processamento com monitorização da consolidação.....	50
3.4 Determinação do teor de fibras e polímero.....	52
3.5 Ensaios Mecânicos.....	55
3.5.1 Ensaios de tração	55

3.5.2 Ensaio de flexão.....	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1 Análise Termogravimétrica (TGA)	61
4.2 Caracterização reológica	63
4.2.1 Índice de Fluidez do Polímero Fundido - MFR	63
4.2.2 Índice Volumétrico do Polímero Fundido - MVR	64
4.3 Análise de Consolidação por Compressão a Quente.....	65
4.4 Ensaio de Calcinação	68
4.5 Caracterização Mecânica.....	70
4.5.1 Ensaio de Tração.....	70
4.5.2 Ensaio de flexão.....	73
4.6 Análise de resultados dos ensaios.....	75
4.7 Microscopia Eletrônica de Varrimento (SEM)	76
5 CONCLUSÃO	79
5.1 Conclusões.....	79
5.2 Trabalhos futuros	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
Apêndices	87
Apêndice A – Análise Termogravimétrica (TGA)	87
Apêndice B - Resultados Índice de fluidez do material (MFI)	89
Apêndice C – Fração mássica de fibras das fitas pré-impregnadas	91
Apêndice D – Resultados dos ensaios de Calcinação.....	92
Apêndice E – Dimensão dos provetes a ensaiar	93
Apêndice F – Resultados dos ensaios de tração	97
Apêndice G – Resultados dos ensaios de flexão	103
Apêndice H – Resultados da análise de consolidação	110
Anexos	113
ANEXO A- Ficha técnica do pet	113
ANEXO B - Ficha técnica do rPET.....	114
ANEXO C - Ficha técnica das Fibras de Carbono	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Exemplos de aplicações de materiais compósitos [3].	20
Figura 2 Efeito de reforço no compósito e mecanismo de transferência [6].	20
Figura 3 Processo de produção de fibras de carbono a partir de um precursor de PAN. Adaptado de [24].	26
Figura 4 Representação esquemática dos <i>Towpregs</i> [43]	30
Figura 5 Linha de produção de <i>Towpregs</i> [46]	30
Figura 6 Representação esquemática de <i>commingled fibres</i> [43]	31
Figura 7 Produção de <i>commingled fibres</i> [49]	32
Figura 8 Representação esquemática do equipamento de produção de fitas pré-impregnadas. Adaptado de [42].	33
Figura 9 Representação dos pinos de impregnação. Adaptado de [42].	34
Figura 10 Relação entre tempo e temperatura de processamento de polímeros. Adaptado de [42].	34
Figura 11 Representação esquemática do processo de consolidação por compressão a quente ..	35
Figura 12 Ciclo fechado da reciclagem do PET. Adaptado de [11], [62].	36
Figura 13 Granulado de PET	39
Figura 14 Granulado de rPET	40
Figura 15 Bobine de fibras de carbono contínuas.	41
Figura 16 Curva e critérios do ensaio de TGA	42
Figura 17 Equipamento de medição do índice de fluidez	43
Figura 18 Barril de pressão do equipamento de medição do índice de fluidez	43
Figura 19 Equipamento de produção de fitas pré-impregnadas	44
Figura 20 Sistema de espalhamento de fibras	45
Figura 21 Câmara de fusão do polímero	46
Figura 22 Sistema de rolos de impregnação	46
Figura 23 Fita pré-impregnada de FC/PET	47
Figura 24 Fita pré-impregnada de FC/rPET	48
Figura 25 Tecelagem simples de fitas pré-impregnadas	49
Figura 26 Camada de tecido de fitas pré-impregnadas	49
Figura 27 Setup dos equipamentos de controlo de LVDT	50
Figura 28 Forno mufla NABERTHERM LHT08/16.	52
Figura 29 Balança de precisão	53
Figura 30 Amostra antes da calcinação	53
Figura 31 Amostra após calcinação	53
Figura 32 Equipamento de ensaios SHIMADZU AG-X 100 kN	55
Figura 33 Máquina universal de ensaios SHIMADZU AG-X 100 kN	57
Figura 34 Provete a ser ensaiado à flexão	58
Figura 35 Temperatura de degradação do PET	61
Figura 36 Análise termogravimétrica do PET	62
Figura 37 Temperatura de degradação do rPET	62
Figura 38 Análise termogravimétrica do rPET	63
Figura 39 Curva de consolidação experimental e teórica de compósitos FC/PET a 2,5 MPa	65

Figura 40 Curva de consolidação experimental e teórica de compósitos FC/PET a 5,0 MPa	65
Figura 41 Curva de consolidação experimental e teórica de compósitos FC/rPET a 5,0 MPa	66
Figura 42 Curva de consolidação experimental e teórica de compósitos FC/rPET a 5,0 MPa	66
Figura 43 Curva tensão-deformação FC/PET (2,5 MPa)	71
Figura 44 Curva tensão-deformação FC/PET (5,0 MPa)	71
Figura 45 Curva tensão-deformação FC/rPET (2,5 MPa)	72
Figura 46 Curva tensão-deformação FC/rPET (5,0 MPa)	72
Figura 47 Curva tensão-deformação FC/PET (2,5 MPa)	73
Figura 48 Curva tensão-deformação FC/PET (5,0 MPa)	74
Figura 49 Curva tensão-deformação FC/rPET (2,5 MPa)	74
Figura 50 Curva tensão-deformação FC/rPET (5,0 MPa)	74
Figura 51 Fita pré-impregnada FC/PET (Ampliação 400 μm)	76
Figura 52 Fita pré-impregnada FC/PET (Ampliação 100 μm)	77
Figura 53 Fita pré-impregnada FC/rPET (Ampliação 400 μm)	77
Figura 54 Fita pré-impregnada FC/rPET (Ampliação 100 μm)	78

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Aplicações mais comuns das resinas termoendurecíveis [9]	22
Tabela 2 Aplicações e características dos materiais termoplásticos mais utilizados [11].	23
Tabela 3 Características de diferentes tipos de fibra. Adaptado de [20].	25
Tabela 4 Propriedades de diferentes fibras de vidro. Adaptado de [21].	25
Tabela 5 Propriedades mecânicas das fibras de carbono. Adaptado de [22].	27
Tabela 6 Propriedades mecânicas das fibras de Aramida. Adaptado de [2].	27
Tabela 7 Características do PET utilizado no programa experimental.	39
Tabela 8 Características do rPET utilizado no programa experimental	40
Tabela 9 Características das Fibras de Carbono utilizadas no programa experimental	41
Tabela 10 Parâmetros de processamento das fitas FC/PET	47
Tabela 11 Parâmetros de processamento das fitas FC/rPET	48
Tabela 12 Parâmetros de processamento das placas por compressão a quente	50
Tabela 13 Resultados das medições de MFR dos polímeros	64
Tabela 14 Resultados das medições de MVR dos polímeros	64
Tabela 15 Fatores K , α , e tempo de impregnação experimental dos laminados compósitos	67
Tabela 16 Resultados ensaio de Calcinação	68
Tabela 17 Previsão teórica das propriedades mecânicas dos materiais compósitos em estudo	69
Tabela 18 Resultados dos ensaios de tração	70
Tabela 19 Resultados ensaios de flexão.	73
Tabela 20 Comparação dos resultados experimentais e teóricos	75

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
PET	Politetileno tereftalato
PP	Polipropileno
PE	Polietileno
SMC	Sheet Molding Compound
BMC	Bulk Molding Compound
TMC	Thick Molding Compound
DMC	Dough Molding Compound
GMT	Glass Mat Thermoplastic
GMC	Granular Molding Compound
CIC	Continuously Impregnated Compound
XMC	Continuous roving Molding Compound
ZMC	low viscosity Molding Compound
EMC	Epoxy Molding Compound
PMC	Polyester Molding Compound
FC	Fibras de Carbono

Lista de Símbolos

ton	tonelada
MPa	megapascal
GPa	gigapascal
N	newton
g	grama
kg	quilograma
m	metro
w_p	Fração mássica de polímero
v_p	Fração volúmica de polímero
ρ_p	Massa volúmica de polímero, (g/cm ³)
E_p	Módulo de elasticidade da fibra, (GPa)
w_f	Fração mássica de fibra
v_f	Fração volúmica de fibra
ρ_f	Massa volúmica de fibra, (g/cm ³)
E_p	Módulo de elasticidade do polímero, (GPa)
E_{comp}	Módulo de elasticidade do compósito, (GPa)
ρ_{comp}	Massa específica do compósito, (g/cm ³)

m_f	Massa média de fibras, (g)
m_1	Massa do cadinho, (g)
m_2	Massa do conjunto cadinho com provete de ensaio, (g)
m_3	Massa do conjunto cadinho com resíduo de ensaio, (g)
$m_f \text{ lin}$	Massa linear de fibras, (g)
σ_f	Tensão de rotura, (MPa)
F	Força, (N)
A	Área, (mm ²)
L	Distância entre apoios, (mm)
b	Largura, (mm)
h	Espessura, (mm)

1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação, realizada no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, foca-se sobre os materiais compósitos de matriz termoplástica e tem em vista fazer uma revisão bibliográfica na temática dos materiais compósitos, tipologia, aplicações e propriedades relevantes, numa perspetiva de desenvolvimento sustentável. O reaproveitamento de resíduos industriais ou a recuperação de materiais através de processos de reciclagem serão focados a par das técnicas de manuseamento que os integrem para produzir novos materiais que possam ser utilizados em aplicações de engenharia.

Foi realizada uma componente experimental, no sentido de ir de encontro aos objetivos propostos nesta dissertação, que se focou no tema dos materiais compósitos e a sua potencialidade na incorporação de materiais em fim de vida.

1.1 Contextualização

A crescente pressão sobre os ecossistemas tem motivado a procura de formas para amenizar o impacto da poluição ambiental. A preservação do ambiente e a sustentabilidade ecológica são dois importantes vetores do desenvolvimento das sociedades atuais, interessadas na compatibilização dos seus padrões de vida, mas, simultaneamente, em garantir que os recursos são devidamente utilizados numa perspetiva de redução dos desperdícios.

Os materiais de engenharia são, por inerência, fontes que alimentam o desenvolvimento das sociedades, sendo as matérias-primas para uma diversidade de produtos que nos habituamos a utilizar quotidianamente e que integramos como conquistas de séculos de desenvolvimento e bem-estar a que nos habituamos e de que não prescindimos.

A compatibilização destas duas perspetivas resultou na busca incessante de materiais que possam ser ecologicamente sustentáveis, que utilizem os desperdícios de uma sociedade fortemente industrializada, mas com padrões ecológicos muito bem definidos. A bibliografia refere inúmeros trabalhos desenvolvidos na área dos materiais compósitos onde o reforço, ou a matriz, são materiais reciclados ou obtidos a partir de recursos que integrem uma economia circular onde os conceitos de produzir, utilizar e reciclar estão permanentemente presentes. Uma das fontes mais problemáticas de poluição é a disposição indevido de materiais plásticos em aterro, entre eles o polietileno tereftalato, comumente conhecido por PET.

Os plásticos são materiais que associamos com relativa frequência à poluição ambiental. Estes materiais, que apresentam propriedades generalizadamente muito interessantes, sendo de fácil acesso e custo reduzido, são utilizados e descartados com elevada facilidade constituindo-se assim como presas fáceis do seu próprio sucesso. A sua reciclagem é, pois, de todo o interesse.

Neste contexto, esta dissertação tem por finalidade a recuperação do PET (que associamos frequentemente às garrafas de água que proliferam um pouco por toda a parte) para fazer a impregnação com fibras de reforço, podendo ser de vidro ou carbono, com a finalidade de produzir peças em compósitos de matriz termoplástica que aportem um elevado valor estrutural e possam ser utilizados para a produção de componentes ou estruturas de engenharia.

O estudo de revisão bibliográfica que será efetuado ao longo do capítulo 2, tem a finalidade de estabelecer as condições ideais de processamento para esta tipologia de materiais, partindo do conhecimento das diferentes variáveis envolvidas no processo e das características dos materiais constituintes, quer nos possíveis reforços a impregnar, quer no PET virgem, quer no rPET que será usado como alternativa ecologicamente sustentável.

1.2 Objetivos

Os objetivos na base da realização deste trabalho concorrem para apresentar uma solução mais sustentável (menor impacto ambiental) que possibilite criar um ciclo de vida mais circular para os produtos fabricados em PET. Para isso foi estabelecido que deviam ser produzidos materiais compósitos de matriz polimérica, com características mecânicas adequadas para permitir potenciar aplicações de engenharia. Os reforços combinados com os materiais poliméricos em estudo, devem não só ser adequados para o uso em aplicações estruturais, assim como enquadrados nas tecnologias e soluções modernas que vêm a ser implementadas.

1.3 Metodologia

A metodologia seguida ao longo desta dissertação comportou uma revisão do estado atual de conhecimento sobre o fabrico e a utilização de materiais sustentáveis, focando os materiais compósitos de matriz polimérica, os principais reforços e a identificação dos potenciais problemas associados à utilização de materiais termoplásticos derivados de reciclagem primária.

Após a realização do estado da arte em relação à temática apresentada, é desenvolvida a componente experimental que consistiu na produção de materiais para assim desenvolver um estudo pormenorizado dos mesmos e poder analisar a viabilidade do uso de materiais reciclados na indústria.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é organizada da seguinte forma:

No primeiro capítulo é feita a introdução ao tema, a contextualização do tema e o que despoletou o tema da dissertação, a definição de objetivos e a explicação da metodologia utilizada.

De seguida, no segundo capítulo, é apresentado o Estado da Arte do tema e as conclusões que podem ser retiradas após a revisão da literatura disponível aquando da publicação do presente trabalho.

O terceiro capítulo é dedicado á apresentação dos métodos utilizados para a execução do trabalho experimental de investigação, todas as tentativas de execução do trabalho tal como todas as alterações efetuadas ao longo do período de investigação.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos bem como a explicação e justificação dos mesmos.

De seguida, no 5º capítulo, é feita a conclusão de todo o projeto.

Por fim é apresentada toda a Bibliografia usada na execução deste projeto bem como, os anexos e os apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pressão da opinião pública sobre a necessidade de tomar em conta os aspetos ambientais que decorrem da produção industrial permitiu o crescimento exponencial na utilização de materiais ecologicamente sustentáveis. Estes materiais inserem-se no conceito de uma economia circular onde a reciclagem e o reaproveitamento são fatores determinantes para uma indústria preocupada em ser menos poluente, quer nos recursos que utiliza, quer nos produtos que disponibiliza no mercado.

O reaproveitamento de materiais descartáveis para a produção de novos materiais é uma tecnologia em expansão, embora em Portugal, os níveis de reciclagem ainda sejam bastante baixos face ao que acontece em outros países, nomeadamente da União Europeia (UE). Por motivos conhecidos, a pressão para a necessidade de proceder à reciclagem dos plásticos é elevada. Os plásticos têm tempos de degradação muito elevados que, quando depositados em aterro, são incomportáveis face à dimensão da sua produção. Por isso, a necessidade de proceder à sua reciclagem é absolutamente determinante para poderem ter aceitação junto de uma opinião pública cada vez mais sensibilizada para a dimensão ecológica.

Tipicamente, existem quatro métodos de reciclagem de materiais poliméricos, sendo a reciclagem primária a mais usual e que associamos aos polímeros termoplásticos. A reciclagem primária pode ser chamada de reciclagem mecânica, e permite a reutilização até por mistura com o material virgem, para a produção de componentes iguais ou similares ao original. Na reciclagem secundária, o produto obtido após o processo não apresenta características semelhantes ao inicial por degradação irreversível das propriedades originais. A reciclagem terciária já é, normalmente, associada a materiais reforçados, onde a separação da matriz e do reforço se faz por via química permitindo a incorporação em compostos de moldação. O último tipo de reciclagem é a inceneração permitindo a obtenção de energia para utilização noutras aplicações [1].

No presente capítulo procede-se a uma revisão de conceitos relativos aos materiais compósitos de matriz polimérica, sobretudo na vertente das matrizes termoplásticas, e dos reforços na forma de fibras, dando ênfase às fibras mais correntemente utilizadas. Procede-se, também, a uma revisão dos diferentes compostos de moldação no sentido de enquadrar a utilização do rPET para a impregnação de fibras de carbono. Os aspetos técnicos e as dificuldades inerentes à produção deste compósito de forma a poder ser integrado em processos de enrolamento filamentar, pultrusão e de compressão a quente são abordados.

2.1 Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são por definição materiais constituídos pela combinação de pelo menos dois materiais de natureza ou com características diferentes, formando entre si uma interface comum. O uso de materiais compósitos na indústria está em crescente evolução visto que estes materiais são das classes de materiais mais usados na engenharia, logo a seguir aos metais, dadas as características mecânicas, leveza e resistência à corrosão que apresentam [2], [3].

A disseminação destes materiais em diferentes áreas de engenharia é enorme. A indústria automóvel, a indústria aeronáutica, os desportos de competição, os transportes estão entre as áreas mais relevantes. Na Figura 1 podemos observar alguns destes exemplos.



Figura 1 Exemplos de aplicações de materiais compósitos [3].

A indústria tem evoluído na produção deste tipo de materiais criando cada vez mais alternativas entre os materiais compósitos avançados, visto que são potenciais substitutos às ligas metálicas que se mostram bastante dispendiosas quando a necessidade é aliar a leveza e as propriedades mecânicas exigentes [3].

Os materiais compósitos são caracterizados por, através da junção de dois ou mais materiais diferentes, resultar uma combinação que potencia as propriedades mecânicas dos materiais permitindo a produção de materiais mais resistentes e com modos de rotura que permitem a sua análise e disposição para o tipo de esforços aplicados [5]. Na Figura 2 mostra-se qual o efeito da matriz e das fibras no comportamento global do compósito.

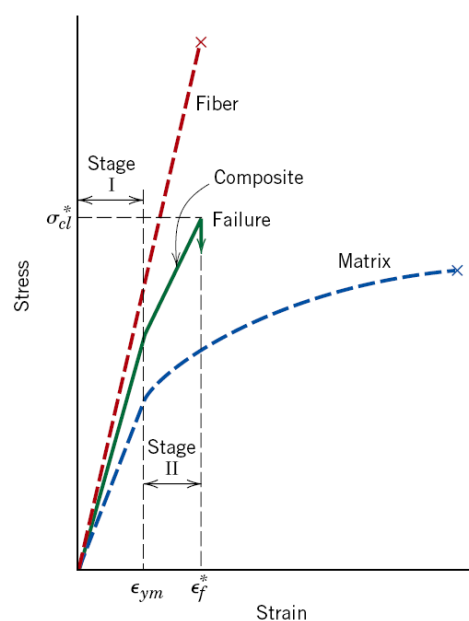


Figura 2 Efeito de reforço no compósito e mecanismo de transferência [6].

2.2 Matrizes poliméricas

Os materiais compósitos podem ser de matriz polimérica, cerâmica ou metálica, porém as de utilização mais comum são as poliméricas. Estas podem ser elastoméricas, termoplásticas ou termoendurecíveis, sendo as últimas as mais utilizadas.

Os materiais termoplásticos são caracterizados por amolecerem com o aumento da temperatura podendo atingir um ponto de fusão. Os termoplásticos são caracterizados por sofrerem um processo de polimerização, que quando sujeitos à temperatura de fusão podem ser novamente moldados. As principais propriedades que destacam esta categoria de materiais é a elevada resistência e o bom comportamento à flexão [7]

As matrizes termoplásticas apresentam algumas vantagens na sua utilização, nomeadamente, bons acabamentos superficiais, boa resistência ao impacto e resistência à corrosão. Porém o seu processamento é mais dispendioso pois exige o fornecimento de temperatura e pressão.

As matrizes termoendurecíveis contêm polímeros que se ligam quimicamente durante o processo de cura de forma a criar uma estrutura reticulada. Este tipo de matriz apresenta boas propriedades mecânicas, resistência química, resistência a elevadas temperaturas e propriedades estruturais. Ao contrário das matrizes termoplásticas, as matrizes termoendurecíveis são mais difíceis de reciclar, não apresentam tão bons acabamentos superficiais e o processo de cura é irreversível. Porém apresentam vantagens na sua utilização, como o processamento à temperatura ambiente, a resistência a elevadas temperaturas, a possibilidade de fazer geometrias complexas, estabilidade dimensional e serem mais económicas [2], [7].

2.2.1 Matrizes termoendurecíveis

Pela facilidade de processamento, as matrizes termoendurecíveis têm sido largamente exploradas para numerosas aplicações especialmente no mundo dos compósitos, pela baixa viscosidade apresentada durante o seu processamento. A forma como estas matrizes se ligam quimicamente criam condições para serem muito resistentes ao impacto e à corrosão. Porém, o processamento deste polímero está associado a emissões de estireno para o ambiente, que além de indesejáveis para a qualidade do ar, podem afetar a saúde de quem opera com estes materiais.[8]. Na Tabela 1 são apresentadas as resinas mais utilizadas na indústria, bem como as suas aplicações.

Tabela 1 Aplicações mais comuns das resinas termoendurecíveis [9]

Resina	Características	Aplicações
Epóxida	Impermeabilidade, elevada resistência ao desgaste, resistência mecânica elevada, alta durabilidade	Adesivos, encapsulamento, componentes de pisos, fundição, revestimentos, materiais compósitos avançados, betão polimérico, ferramentas
Fenólica	Estabilidade térmica e mecânica, elevada resistência mecânica, Estabilidade química.	Materiais compósitos avançados, materiais compósitos, materiais de moldação, reforços de borracha, adesivos, revestimentos, elementos de fricção, betão polimérico, espuma de isolamento, isolamento elétrico, vedantes, tintas de impressão, laminados
Poliéster insaturado ortoftálico e isoftálico e bisfenólico	Económicas, facilidade de processamento, baixa temperatura de transição vítrea.	Adesivos, fundição, materiais compósitos, encapsulamento, componentes para pisos, gelcoats, pastas de enchimento, pastas de pigmentação, betão polimérico, ferramentas e massa de vidraceiro
Poliuretano	Elevada resistência mecânica, resistentes ao fogo, baixa reatividade.	Materiais compósitos, adesivos, tintas, espumas flexíveis, espumas rígidas, molduras auto encapadas
Vinilester	Resistência à corrosão, alta resistência ao impacto, alta resistência à fadiga, alta resistência mecânica aliada a baixo peso.	Adesivos, revestimentos, materiais compósitos, componentes para pisos, ferramentas

2.2.2 Matrizes termoplásticas

Os termoplásticos são conhecidos pela estrutura molecular simples que, com o aumento da temperatura, amolecem e fundem, podendo ser moldados e soldados, solidificando quando arrefecidos. Podem sofrer este ciclo várias vezes sem sofrer degradação significativa permitindo o seu reproprocessamento e reciclagem. A estes materiais podem ser adicionadas cargas e aditivos para que as suas propriedades sejam melhoradas e para aplicações com exigências superiores. Estes materiais apresentam muitas vantagens à sua utilização, como por exemplo a maior tenacidade mostrada por estes polímeros, quando comparados com os termoendurecíveis, assim como ciclos de fabrico mais curtos, inexistência de emissões de estireno, criando espaços de trabalho mais limpos e seguros.[10].

Na Tabela 2 são apresentadas características e aplicações dos termoplásticos mais utilizados na indústria.

Tabela 2 Aplicações e características dos materiais termoplásticos mais utilizados. Adaptado de [11].

Resina	Características	Aplicações
PET	Transparência, inquebrável, impermeável e leveza	Embalagens para uso alimentar, hospitalar e cosméticos, fibras têxteis e telhas
PEAD	Inquebrável, resistente a temperaturas baixas, leveza, rígido, impermeável, quimicamente resistente	Embalagens de detergentes, sacos (tipo supermercado), tampas, caixas para uso doméstico
PVC	Rígido, transparência, impermeável, resistente à temperatura e inquebrável	Embalagens para alimentos, perfis de janelas, tubos de água e esgoto, mangueiras, embalagens hospitalares (bolsas de sangue, medicamentos) e brinquedos
PEBD e PELBD	Flexível, leveza, transparência e impermeabilidade	Sacos plásticos, película de embalagem alimentar, bolsas de soro, sacos de lixo
PP	Conserva as propriedades alimentares, inquebrável, transparência, rígido e resistente a alterações de temperatura	Película de embalagem alimentar, embalagens industriais, cordas, tubos para água quente, fios e cabos, frascos, fibras para tapetes, seringas
PE	Rígido, resistente a alterações de temperatura	Embalagens de iogurtes, parte interior de congeladores e frigoríficos, brinquedos, produtos de higiene descartáveis (lâminas de barbear)

2.3 Reforços em fibra

Existem alguns tipos de reforços usados mais frequentemente na produção de materiais compósitos de matriz poliméricatais como partículas, fibras curtas, longas ou contínuas, e ainda outros tipos de materiais que conjugados previamente com algum tipo de matriz permitem uma transformação mais rápida e até mais eficiente.

Partículas

As partículas podem ser de vidro, de carbono, cerâmicas, metálicas e de origem orgânica e são utilizadas quando se tem como objetivo melhorar as propriedades mecânicas de um material. Contudo, são menos eficazes na capacidade de reforço, quando comparadas com as fibras contínuas. As partículas são utilizadas quando são necessários níveis elevados de resistência ao desgaste, resistência mecânica e capacidade de amortecimento do material resultante conseguem também aumentar a dureza e a estabilidade de materiais de construção para preenchimento ou ligação de materiais. As partículas são vastamente utilizadas pelo seu baixo custo e facilidade de aplicação [12], [13] .

As partículas de natureza cerâmica proporcionam melhorias que dependem do tamanho da partícula, da sua quantidade e do tipo de matriz. Porém, o aumento da quantidade destas partículas costuma resultar numa mais baixa estabilidade na relaxação e estabilidade dimensional do material resultante [13]–[15].

Na aplicação de partículas deve ser tido em conta a homogeneidade da mistura, pois aglomerados criam estruturas que podem dar origem a fragilidades. Além disso, os reforços em partículas possibilitam a obtenção de compósitos isotrópicos, e a homogenização das partículas pelo compósito é um fator importante[16].

Fibras

As fibras podem ser de natureza sintética, semissintética ou orgânica, apresentando-se como materiais de relativa leveza e com boas propriedades específicas. As suas características são a elevada resistência específica, a elevada durabilidade e rigidez, boa capacidade de amortecimento, resistência à flexão, resistência à corrosão, resistência ao desgaste, resistência ao impacto e resistência ao fogo e à humidade [17].

As fibras naturais são mais ecológicas, porém não se destacam tanto pelas propriedades mecânicas apesar da boa prestação quanto à resistência à tração, módulo de elasticidade e absorção de energia ao impacto quando incorporadas em materiais compósitos. Estas fibras podem mostrar-se mais vantajosas quando as solicitações são menores, visto que apresentam um impacto ambiental mais baixo, são mais simples de manusear e mais seguras para quem as utiliza [18], [19].

Na tabela 3 podemos encontrar algumas das principais vantagens e desvantagens associadas a fibras habitualmente utilizadas em compósitos de engenharia.

Tabela 3 Características de diferentes tipos de fibra. Adaptado de [20].

Tipo de Fibra	Vantagens	Desvantagens
Vidro E, Vidro S	Elevada resistência Baixo custo	Baixa Rigidez Baixa resistência à fadiga Sensibilidade a altas temperaturas
Aramida (KEVLAR®)	Elevada resistência mecânica Baixa densidade	Baixa resistência à compressão Elevada higroscopicidade
Boro	Elevada rigidez Elevada resistência à compressão	Elevado custo
Carbono (AS4, T300, IM7)	Elevada rigidez Elevada resistência	Custo moderadamente elevado
Grafite (GY-70, pitch)	Rigidez muito elevada	Elevado custo Baixa resistência
Cerâmica (carboneto de silício, alumina)	Elevada rigidez Resistência a elevadas temperaturas	Elevado custo Baixa resistência mecânica

Entre os tipos de fibras existentes no mercado, as mais utilizadas em compósitos de matriz polimérica são as de vidro, carbono e aramida.

- **Fibras de vidro**

As fibras de vidro do tipo E são as mais utilizadas em compósitos tradicionais. Estas fibras proporcionam aos materiais compósitos níveis elevados de resistência à tração e de módulo de elasticidade [21].

As fibras de vidro são principalmente compostas por sílica, mas a sua composição altera consoante os óxidos que estão presentes na fibra, originando diferentes propriedades e permitindo diferentes designações [22]. A Tabela 4 apresenta um resumo das principais propriedades em função da composição.

Tabela 4 Propriedades de diferentes fibras de vidro. Adaptado de [21].

Propriedade	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Massa volúmica (g/cm³)	2,56	2,49	2,55
Módulo de Young (GPa)	73,0	85,5	86,0
Tensão de rotura (MPa)	3400	4580	4400
Deformação na rotura (%)	4,4	5,3	5,2

As fibras de vidro podem ser utilizadas como fibras contínuas, na forma de roving, em tecido, em manta e como partículas, dependendo dos objetivos da sua aplicação [23]. As propriedades dos materiais compósitos resultantes dependem do teor de fibras e do modo de aplicação das mesmas.

- **Fibras de carbono**

As fibras habitualmente designadas por fibras de carbono são produzidas a partir de um precursor rico em carbono, como o alcatrão (pitch), o PAN e a celulose, e podem ser subdivididas em função do teor em carbono que apresentam. As fibras de carbono tradicionais são compostas por percentagens entre os 80 e os 95% de carbono, enquanto as fibras que se designam por fibras de grafite, chegam aos 99%. A diferença entre os dois tipos depende do tratamento dado ao precursor utilizado. Na Figura 3 apresenta-se esquematicamente esse tratamento para um precursor de poliacrilonitrilo (PAN), evidenciando os dois percursos possíveis. A elevada resistência axial conseguida advém do facto das cadeias de carbono se organizarem na direção longitudinal da fibra [3].

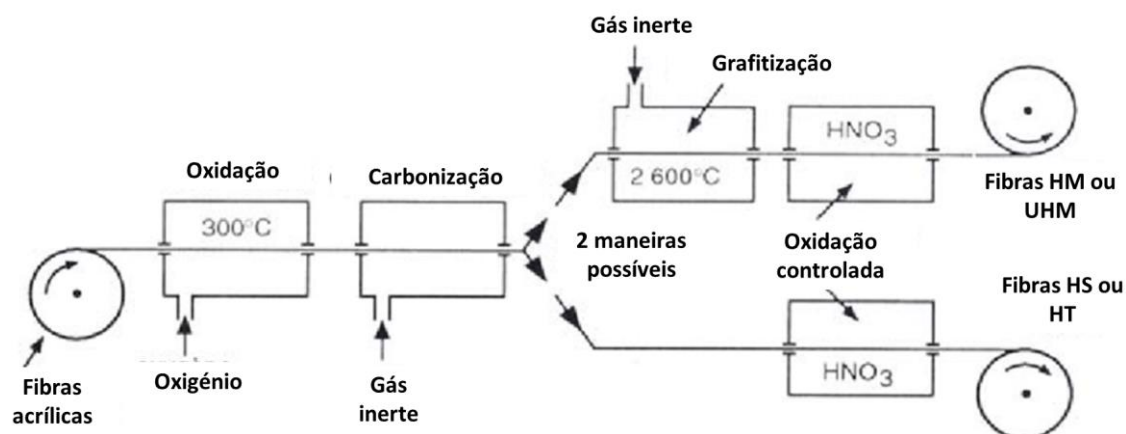


Figura 3 Processo de produção de fibras de carbono a partir de um precursor de PAN. Adaptado de [24].

Com o crescimento da sua utilização industrial e a maior investigação à volta da utilização deste material, aumentou também o seu consumo ao longo dos anos, principalmente na indústria aeroespacial, nuclear, biomédica, na indústria do desporto e dos automóveis de luxo [25], [26].

As fibras de carbono podem ser separadas em algumas categorias [2]:

- UHM - módulo de elasticidade muito elevado (> 500GPa)
- HM - módulo de elasticidade elevado (> 300 GPa)
- IM - módulo de elasticidade intermédio (> 200GPa)
- LM - baixo módulo de elasticidade (< 100GPa)
- HS - elevada resistência à tração (> 4 GPa)

Tabela 5 Propriedades mecânicas das fibras de carbono. Adaptado de [22].

Propriedade	PAN	Pitch	Rayon fibers
Massa volúmica (g/cm ³)	1,8	2,0	1,7
Modulo 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

Fibras de Aramida

As fibras de Aramida são quase tão favoráveis como os outros tipos de fibra, porém apresentam uma desvantagem na sua utilização visto que são higroscópicas limitando as suas aplicações e a baixa resistência à compressão [27]. Estas fibras são produzidas através do processamento de poliamidas aromáticas, que devem ser mantidas a baixas temperaturas (-50°C e -80°C) e quando processadas para criar a fibra à temperatura de 200°C. Estas fibras têm como principais características a elevada resistência a abrasão, a elevada resistência mecânica, química e a baixa massa volúmica, são resistentes ao impacto e à fadiga e têm boa capacidade de amortecimento a vibrações [1], [27].

Tabela 6 Propriedades mecânicas das fibras de Aramida. Adaptado de [2].

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

2.4 Semi-Produtos

Os semi-produtos de materiais compósitos são opções pré-combinadas que podem ser moldadas e processadas para a criação de produtos finais e podem ser classificados como compostos de moldação ou como pré-impregnados.

2.4.1 Compostos de Moldação

Define-se por Composto de Moldação os compostos de fibras impregnadas com resina que podem ser de matriz termoendurecível, como os EMC (*Epoxy Molding Compound*), ou de matriz termoplástica, PMC (*Polyester Molding Compound*) [29].

Os EMC são compostos de moldação à base de resina de epóxido que curam quando levados à temperatura indicada pelo fabricante da resina. Podem ter diferentes tipos de fibra, mas as de mais comum utilização são as fibras de vidro [29].

Os PMC englobam uma vasta gama de compostos de moldação, diferenciados pelo tamanho e organização da fibra. De acordo com Whelan existem os compostos SMC (*Sheet Molding Compound*), BMC (*Bulk Molding Compound*), CIC (*Continuously Impregnated Compound*), DMC (*Dough Molding Compound*), GMC (*Granular Molding Compound*), TMC (*Thick Molding Compound*), XMC (*continuous roving Molding Compound*), ZMC (*low viscosity compound*) e os GMT (*Glass Mat Thermoplastic*) [29].

Os SMC apresentam boas propriedades e distinguem-se pelo baixo custo em relação a outros compostos com propriedades semelhantes. Caracterizam-se ainda por apresentarem um volume elevado de fibras de vidro longas [30].

Os TMC são um tipo de SMC que apresentam espessuras elevadas, podendo ir até 50mm. É benéfica a sua utilização quando o objetivo da aplicação exige espessuras superiores às habituais [31].

Os BMC são os compostos de moldação à base de uma mistura volumosa de fibras de vidro cortadas, resina, pastas e enchimento. Apesar de poderem ser utilizadas vários tipos de fibras, as fibras de vidro são as de utilização mais comum. O conteúdo de fibras dos BMC é, geralmente, 5 a 10% mais baixo que nos SMC e as fibras mais curtas (daí as propriedades resultantes diminuídas); apenas a resistência ao impacto tem tendência a ser maior [32]. Os BMC utilizados em massa têm o nome de DMC que, no fundo, apresentam a mesma constituição e características, mas a forma de aplicação é em massa (*"dough-type"*) [31].

Os GMT são compostos por manta de fibra de vidro e polímero termoplástico. São muito utilizados na indústria automóvel apesar de apresentarem propriedades mecânicas inferiores a alguns compostos de moldação. Têm uma vasta gama de aplicações resultado da sua elevada rigidez e possibilidade de serem reciclados com alguma facilidade [33].

2.4.2 Pré-impregnados

Os pré-impregnados são materiais em que a fibra já se encontra impregnada pelo polímero, podendo ser de natureza termoendurecível ou termoplástica. Esta classe de materiais surge para permitir uma simplificação na aplicação de materiais compósitos na Indústria, visto que o processo de seleção e de preparação das resinas é realizado pelo fabricante do pré-impregnado [34].

Os materiais compósitos, mais especificamente produzidos com pré-impregnados, têm sido cada vez mais utilizados e procurados pela indústria aeroespacial, não só pela praticidade de aplicação, mas, também, a junção da alta performance mecânica com a leveza associada a estes materiais [35].

Os pré-impregnados mais encontrados no mercado atual são os de fibra de vidro com resina de epóxico, visto que apresentam excelentes propriedades após o seu processo de cura e pela sua capacidade de armazenamento de 6 meses a 1 ano. Tem sido feito trabalho para que esta gama de materiais tenha mais integração de matrizes termoplásticas para a possibilidade de reutilização e redução do impacto ambiental [35].

No caso dos pré-impregnados de matriz termoplástica há algumas características diferentes, que os distinguem nas possíveis aplicações, bem como tempos de vida, características de processamento e propriedades mecânicas.

A aplicação destes materiais tem de ser estudada para as aplicações específicas porque as análises de dados termomecânicos destes materiais curados mostram ligação direta entre a direção de aplicação das fibras e das mantas nas propriedades medidas após o fabrico dos mesmos [36].

Os pré-impregnados podem ser produzidos através de dois métodos, o primeiro consiste na passagem de fibras numa solução fundida do polímero, impregnando cada conjunto de fibras de forma homogênea. O segundo método é a produção de fitas onde um conjunto de fibras unidirecionais contínuas de largura definida passa numa solução de polímero fundido e pultrudidas, dando lugar a fitas pré-impregnadas de matriz termoplástica que, depois, podem ser moldadas por métodos de conformação [37].

Os pré-impregnados são os compostos de moldação mais indicados para aplicações em que seja requerida elevada flexibilidade e que necessitem de aplicação e transformação em ciclos mais rápidos. A qualidade dos pré-impregnados está diretamente ligada com a quantidade de resina impregnada nas fibras e com a velocidade de impregnação, fazendo com que a fibra com processamento mais lento tenha melhor impregnação [38].

As temperaturas de conformação dos termoplásticos usados como matriz devem ser tidas em conta, visto que certas temperaturas podem causar malformações nos termoplásticos bem como bolhas e vazios entre as fibras [39].

Dentro dos produtos pré-impregnados existem os *towpregs* que se distinguem pela forma de deposição do polímero para realizar a impregnação das fibras. Os *towpregs* são semi-produtos produzidos através da impregnação de fibras longas e contínuas com uma matriz termoplástica em pó e elevadas à temperatura que permite a impregnação das fibras pelo polímero. Estes materiais conseguem atingir características e propriedades mecânicas melhores que muitos materiais de engenharia [40].

Os *towpregs* podem ser produzidos “à medida” do pretendido para cada aplicação e podem posteriormente ser processados com recurso a vários métodos, tendo em consideração a temperatura para o polímero em questão [41].

As fitas pré-impregnadas são um produto pré-impregnado na forma de fitas contínuas constituídas por fibras contínuas impregnadas por uma matriz termoplástica, permitindo que na sua aplicação aliada de processos que incluam a aplicação de temperaturas de fusão das matrizes se criem produtos finais de diversas geometrias [42].

2.5 Pré-impregnadas de matrizes termoplásticas

2.5.1 Towpregs

O processo de obtenção de pré-impregnados termoplásticos combinando fibras contínuas com polímero em pó foi utilizado pela primeira vez em 1973 por Price [43], este processo consiste na passagem de fibras secas através de um banho de polímero em pó à temperatura ambiente. Este processo não requer a fusão do polímero, o que constitui uma das principais vantagens na sua utilização, uma vez que não é necessário o estudo das propriedades térmicas e reológicas do mesmo [44], [45].

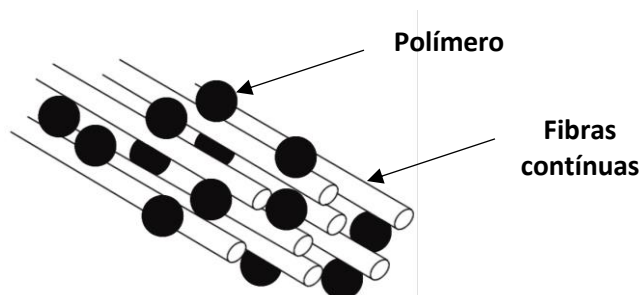


Figura 4 Representação esquemática dos Towpregs [43]

A representação esquemática do Towpreg está representada na Figura 4, sendo que o mecanismo de impregnação deste pré-impregnado consiste na redução da distância de impregnação. As linhas de produção de Towpreg (representadas na Figura 5) consistem numa estação de desenrolamento, onde são fornecidas fibras contínuas secas, que entram num espalhador para separar as fibras, sendo depois conduzidas para um forno de convecção. No forno de convecção, as fibras são aquecidas até uma temperatura adequada para que ocorra uma adesão primária com o polímero quando ambos estão em contacto.

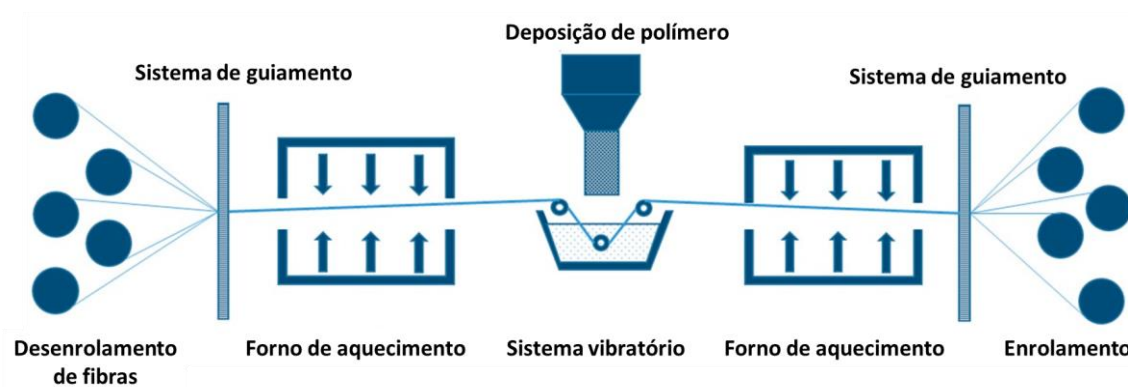


Figura 5 Linha de produção de Towpregs [46]

Na câmara de deposição, o polímero é fornecido continuamente, sendo que as fibras devem passar por alguns rolos de modo a aumentar o tempo de exposição ao polímero. As mechas de fibra e polímero à saída do banho de polímero são feitas passar por um forno de consolidação para melhorar a adesão entre estas, finalizando assim a produção do pré-impregnado.

Como já foi referido, uma das maiores vantagens deste processo é a utilização do polímero à temperatura ambiente. No entanto, é de salientar que os polímeros em pó não são facilmente encontrados comercialmente, e alguns polímeros são difíceis de granular devido ao seu comportamento dúctil. Deve notar-se também que mesmo o polímero em pó deve apresentar um diâmetro de partícula próximo do diâmetro das fibras, o que experimentalmente é difícil de obter e assegurar. Se existir elevada dispersão do diâmetro das partículas de polímero, a quantidade deste ao longo do pré-impregnado não será uniforme, havendo zonas com maior concentração. Este efeito não é particularmente vantajoso para processos contínuos como a pultrusão e o enrolamento filamentar, visto que pode causar irregularidade nas frações de fibras e polímero das peças finais [44], [47].

A produção de *Towpreg* envolve uma série de processos de aquecimento e de passagem das mechas de fibra, podendo por vezes causar uma abrasão não desejada que poderá afetar as fibras.

2.5.2 *Commingled fibres*

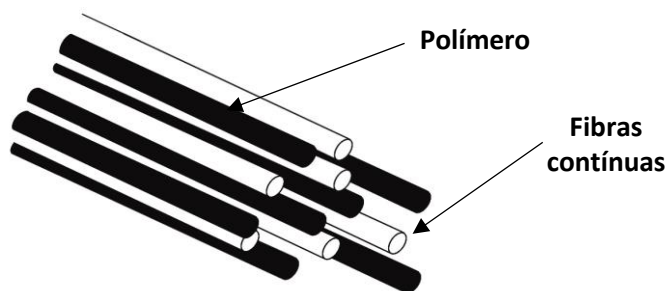


Figura 6 Representação esquemática de *commingled fibres* [43]

O contacto entre o reforço e a matriz pode ser feito através do contacto íntimo de filamentos de fibras e de polímero, sistema que é designado por *Commingled Fibres*. O sistema *Commingled*, representado na Figura 6, caracteriza-se por ser um pré-impregnado que apresenta bons níveis de dispersão de fibras e polímero, sendo benéfico na transformação do compósito final, especialmente em sistemas de produção contínua [48], [49].

Embora teoricamente no processo de fabrico deste tipo de pré-impregnado não seja necessária a fusão do polímero, para que o material pré-impregnado seja eficaz, as fibras e o polímero devem ser misturados à saída do local de produção. O processo de produção deste tipo de pré-impregnado é apresentado na Figura 7.

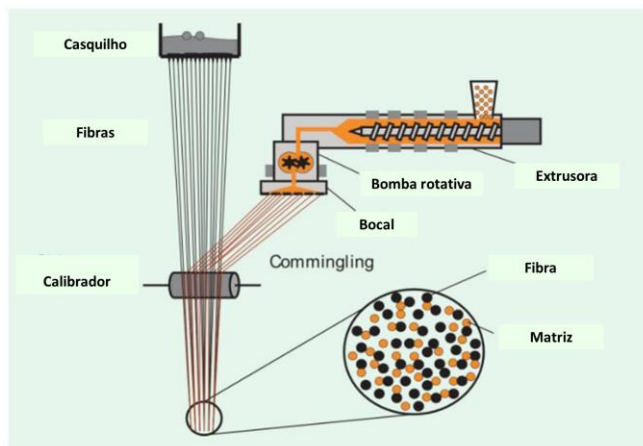


Figura 7 Produção de *commingled fibres* [49]

A possibilidade de combinar diferentes reforços e matrizes é particularmente interessante para a versatilidade das peças finais, podendo em algumas circunstâncias ser útil para reforços locais.

O processo de *commingling*, dando origem a um sistema de pré-impregnado flexível, pode ser uma vantagem em algumas técnicas de processamento como a pultrusão e enrolamento filamentar. No entanto, devido aos níveis mais elevados de abrasão entre fibras e polímero, pode ter efeitos indesejáveis. A maior desvantagem associada ao sistema *commingled* é o custo relativamente elevado quando comparado com outros pré-impregnados, e a dificuldade de obter o material a elevadas taxas de produção. Além disso, as máquinas para o fabrico de fibras mistas são bastante dispendiosas e complexas. Pelas razões aqui apresentadas, a aplicabilidade do sistema *commingled* é ainda limitada.

2.5.3 Fitas pré-impregnadas

Muitos componentes metálicos estão a ser substituídos por materiais compósitos na indústria, quando possível, e um dos tipos mais utilizados são os produzidos através de fitas de pré-impregnado, não só pelas propriedades associadas, mas, também, pela simplicidade de aplicação quando comparados com os materiais com matrizes termoendurecíveis. As fitas pré-impregnadas para serem processadas têm de ser sujeitas a condições de temperatura e pressão específicas, mas existe a possibilidade de automatizar tanto a colocação das fitas bem como o seu processamento [50].

A produção das fitas consiste na passagem de fibras secas na solução de polímero fundido. A impregnação é feita utilizando um sistema como o representado na Figura 8. No equipamento, as fibras devem ser espalhadas por um sistema de espalhamento de fibras, que permite aumentar a abertura destas, e potenciar a impregnação [37].

Na Figura 4 é possível observar uma visão esquemática do equipamento e do processo de produção das fitas pré-impregnadas.

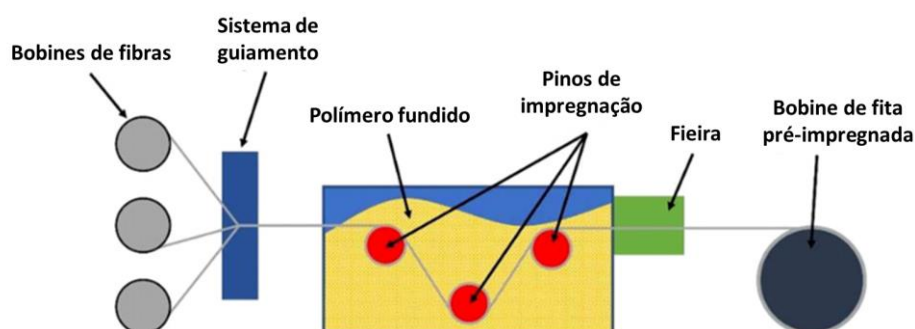


Figura 8 Representação esquemática do equipamento de produção de fitas pré-impregnadas. Adaptado de [42].

Um dos parâmetros a ter em conta na produção das fitas pré-impregnadas é a largura da fita e o método de separação das fibras, visto que vai influenciar a fração volúmica de fibras, e consequentemente as propriedades mecânicas do compósito final [51].

Uma das formas de garantir que as fibras ficam devidamente impregnadas é a utilização de pinos, tal como representado na Figura 9, permitindo que as fibras permaneçam mais tempo submersas em polímero e que as fibras se espalhem de forma a facilitar a penetração do polímero fundido no meio destas.

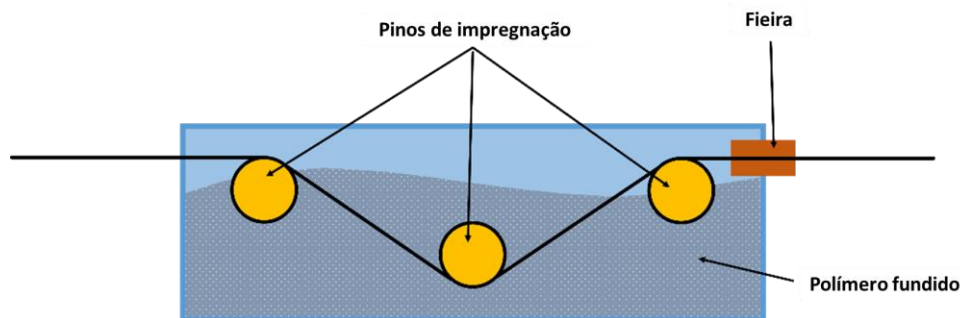


Figura 9 Representação dos pinos de impregnação. Adaptado de [42].

A qualidade das fitas e dos produtos resultantes da sua conformação é diretamente ligada à percentagem de vazios entre as fibras e o polímero. Por isso um dos fatores a ter em conta na produção das fitas é garantir que na sua produção são evitados e melhorar o processo até uma condição que seja considerada suficientemente satisfatória [52], [53].

Análises térmicas permitem perceber que durante o processo de produção das fitas pré-impregnadas, mesmo a temperaturas ligeiramente superiores às de transição vítrea não provocam a degradação das mesmas. Com as melhorias implementadas no processo de impregnação é possível melhorar o resultado das fitas pré-impregnadas, resultando num melhor acabamento e na redução de enrugamento das fitas [54].

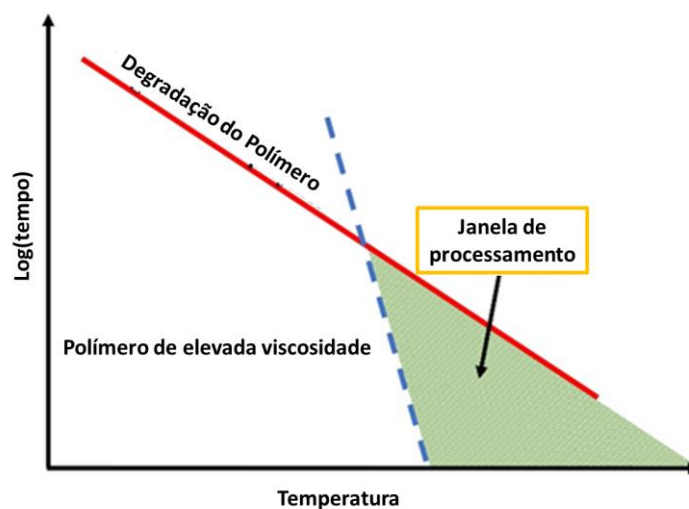


Figura 10 Relação entre tempo e temperatura de processamento de polímeros. Adaptado de [42].

Comparativamente com os termoendurecíveis, a variedade de termoplásticos é significativamente superior, e existem termoplásticos de alto desempenho capazes de sustentar temperaturas bastante elevadas. Termoplásticos com ponto de fusão a rondar os 250°C, têm o seu ponto de degradação a atingir os 400°C, apresentando, portanto, uma janela de processamento mais larga, com excelentes resultados à tração e em ciclos de fadiga por tensão [55].

No final da impregnação das fibras, as fitas têm de ser arrefecidas para que a matriz volte ao estado sólido. Nessa altura é feita a passagem das fibras impregnadas por um molde/ fiera para que estas sejam arrefecidas com a forma desejada. Este arrefecimento deve ser estudado para que o produto final tenha a qualidade desejada e que a geometria seja a definida. Outro parâmetro importante é a velocidade de processamento que tem de ser definida tendo em conta o polímero utilizado bem como a geometria do produto desejado [56].

A produção de fitas pré-impregnadas com matriz termoplástica não só apresenta benefícios nas suas aplicações como, também, em termos da sua reciclabilidade e vida de armazenamento longa (ao contrário dos termoendurecíveis) [57]. Outro benefício na produção de fitas pré-impregnadas termoplásticas é a possibilidade de integração de matrizes recicladas permitindo um reaproveitamento de materiais na produção de novos produtos para aplicações de engenharia.

2.5.4 Impregnação por camadas alternadas de fibras e polímero

O processo de impregnação por alternância de camadas de fibras e de polímero, é um processo mais expedito pela utilização de uma prensa de pratos quentes. O polímero utilizado para este processo deve ser de espessura fina, normalmente fornecida sob forma de filme, e as fibras podem ser fornecidas em tecidos ou mantas. Além de utilizar equipamentos comuns ao fabrico de compósitos termoendurecíveis, este processo tem a vantagem de ter um procedimento mais simples do que os anteriores.

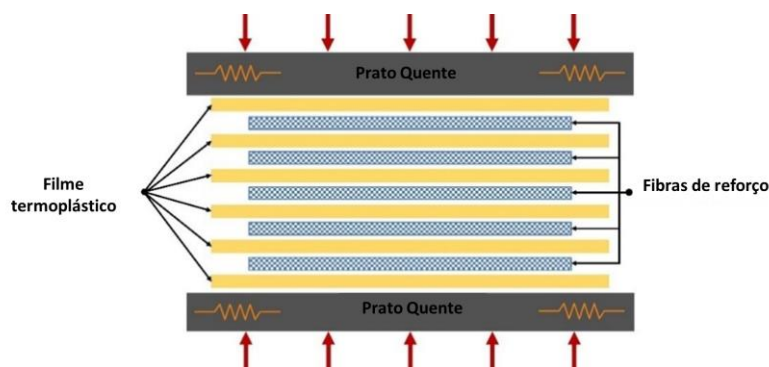


Figura 11 Representação esquemática do processo de consolidação por compressão a quente

O processo, representado esquematicamente na Figura 11, caracteriza-se pela capacidade de controlar com eficácia a temperatura e pressão que o material é submetido. Embora este processo seja utilizado para o fabrico de peças únicas, sem possibilidade de processamento contínuo, permite também o fabrico de peças de geometria complexa. A qualidade da impregnação em ciclos curtos é ainda um desafio a ultrapassar, tendo já sido desenvolvidos vários trabalhos neste domínio para avaliar o problema [58]–[60].

Um aspeto fundamental a considerar do ponto de vista comercial é o tempo exposição do material a processar à temperatura de consolidação. De acordo com o material e prensa disponível, o tempo de exposição à temperatura deve ser cuidadosamente selecionado de modo a garantir que a periferia e núcleo sejam aquecidos uniformemente. Neste âmbito, têm-se realizado estudos de

consolidação, de forma a otimizar os tempos de processamento, pela análise de espessura do laminado durante o fabrico[38], [42].

A versatilidade do processo permite a produção de diferentes matérias-primas sem grande dificuldade. O produto final desta técnica pode ser um laminado compósito ou uma folha pré-impregnada, que pode ser utilizada para produzir peças com formas mais complexas por moldagem por compressão a quente ou por termoformação.

2.5.5 Matrizes termoplásticas recicladas

Com a crescente utilização dos materiais compósitos e dos materiais termoplásticos cresceu a necessidade de controlar os recursos naturais que são limitados sem afetar o crescimento industrial. Daí surgiu a necessidade de reciclar matérias-primas e os termoplásticos mostram-se como os materiais ideais para a reciclagem completa sem que ocorra a sua degradação [2].

Os termoplásticos mais utilizados em materiais compósitos são o PP, o PE e o PET. Este último é o que apresenta melhores e mais eficientes ciclos de reciclagem, que representa, também, um grande problema nos ecossistemas pela disposição indevida de produtos deste material. No esquema da Figura 7 é possível ver o ciclo de reciclagem do PET [61].

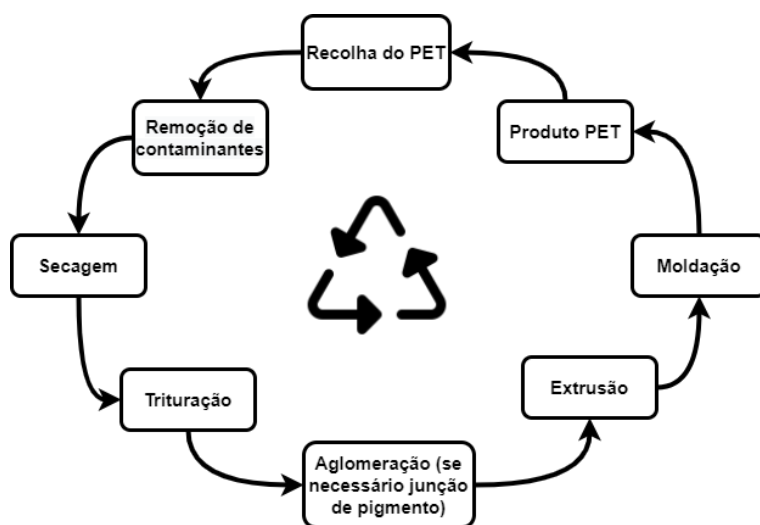


Figura 12 Ciclo fechado da reciclagem do PET. Adaptado de [11], [62].

Na reciclagem de PET (Politetileno tereftalato) existem ainda alguns desafios, não só pelo processo, mas, também, pela seleção do PET a ser reciclado. Através da reciclagem mecânica, as aplicações do PET ficam limitadas, visto que não será possível a sua utilização na indústria alimentar (para isso a reciclagem deverá ser pelo processo químico).

No processo de reciclagem do PET assume-se que este terá um mínimo de 15 % de contaminação provocada por diferentes agentes como tintas, polímeros estranhos e pigmentos que devem ser retirados, ou não, consoante a aplicação prevista [62].

Materiais compósitos produzidos com rPET (em pellets) apresentam excelentes propriedades mecânicas e elevada qualidade, tendo elevado potencial para o uso em massa do material reciclado ao invés do material virgem aplicado na produção de novos materiais e na indústria [63].

O PET é, em teoria, capaz de ser reciclado múltiplas vezes sem que ocorra a sua degradação. Para isso é necessário que seja bem gerida a aplicação da descontaminação e de todo o processo inerente. Este material pode ser considerado um dos exemplos de reciclagem em ciclo fechado, podendo ser reutilizado inúmeras vezes [61]. A China, por exemplo, possui um ciclo de reciclagem de PET completamente fechado, garantindo que nenhum desperdício deste material chega a aterros ou a massas de água [64].

No caso do PP e do PE a reciclagem é mais complicada pela sua não homogeneidade de solução quando tem como origem embalagens de produtos. É então realçada a necessidade do PP e do PE serem homogêneos para poder ser feita a sua reciclagem, introduzindo-se um parâmetro de seleção de desperdício antes da descontaminação. Por outro lado, também é necessário ter em conta os parâmetros de reciclagem visto que estes se podem degradar com facilidade [61].

3. MÉTODOS E APLICAÇÃO

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 PET

O PET utilizado é fornecido em forma de granulado, como pode ser observado na Figura 13, pela empresa Billion Industrial Co Ltd., empresa vietnamita especializada na produção de PET. A referência do material é 31W56/W, normalmente utilizado em garrafas de água, e as suas propriedades são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 Características do PET utilizado no programa experimental

Propriedade	Unid.	PET
Massa volúmica	g.cm^{-3}	1,25
Resistência à tração	MPa	40
Modulo de Elasticidade	GPa	2,0
Temperatura de fusão	°C	249
Alongamento na rotura	%	20
HDT(0,45 MPa)	°C	115
Coeficiente de Poisson	-	0,43



Figura 13 Granulado de PET

3.1.2 PET reciclado

O rPET utilizado é fornecido pela empresa DUY TAN PLASTIC RECYCLING CO. LTD em forma de granulado, tal como representado na Figura 14. Este material apresenta uma coloração azulada devido aos processos de reciclagem. A referência do material é rPET iSS01G e as suas propriedades são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 Características do rPET utilizado no programa experimental

Propriedade	Unid.	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
HDT(0,45 MPa)	°C	70
Coeficiente de Poisson	-	0,38



Figura 14 Granulado de rPET

3.1.3 Fibras de carbono

As fibras de carbono utilizadas foram fornecidas pelo grupo SGL, com a referência C30 T050 TP1 que possui dimensões específicas para o processamento com termoplásticos. As fibras são fornecidas em bobines de fibras contínuas como é possível observar na Figura 15, e as suas propriedades são apresentadas na Tabela 9.

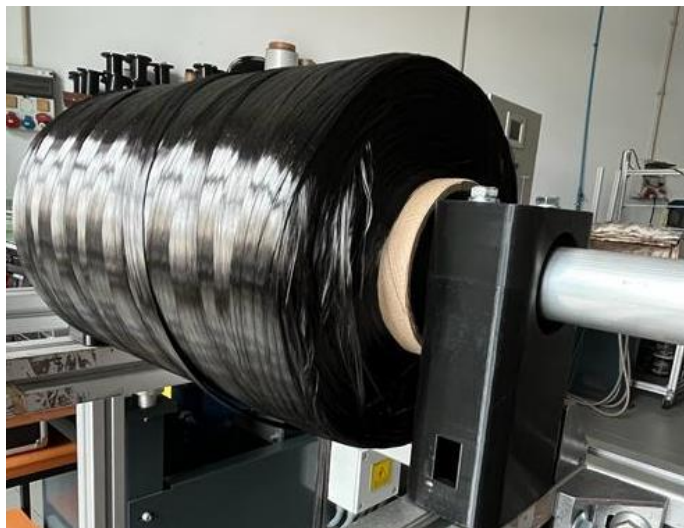


Figura 15 Bobine de fibras de carbono contínuas

Tabela 9 Características das Fibras de Carbono utilizadas no programa experimental

Propriedade	Unid.	Fibras de carbono
Densidade	g.cm^{-3}	1,80
Densidade linear	Tex	3280
Módulo de Elasticidade	GPa	240
Resistência à tração	MPa	2000
Diâmetro do filamento	μm	7
Coefficiente de Poisson	-	0,27

3.2 Caracterização dos polímeros

3.2.1 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica permite conhecer a perda de massa de um material quando submetido a um gradual aumento de temperatura. Este ensaio é efectuado com o objetivo de definir as temperaturas máximas da janela de processamento dos materiais.

As amostras de polímero com uma massa de aproximadamente 20 mg foram colocadas num cadinho de platina do equipamento de ensaio, que de seguida foi colocado no interior da máquina, contendo uma balança de alta precisão.

O ensaio termogravimétrico foi efectuado a uma velocidade de 10°C por minuto, com a balança de alta precisão a registar a perda de massa do material com o aumento de temperatura. A atmosfera seleccionada para o ensaio foi o ar, para nos aproximarmos das condições em que o polímero é processado. Um gráfico típico para ensaio de TGA é apresentado esquematicamente na Figura 16.

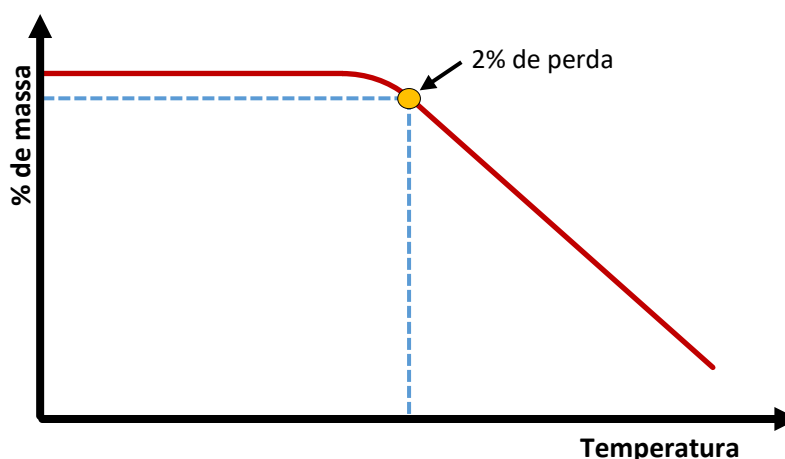


Figura 16 Curva e critérios do ensaio de TGA

Para esta dissertação, o critério utilizado para a determinação da temperatura de degradação foi o momento em que se regista uma perda de massa de 2%.

3.2.2 Índice de Fluidez - MFI

Para a caracterização dos polímeros em estudo foram utilizados métodos de análise reológica através de teste de Melt Flow Index (MFI). Este teste é utilizado para comparar o fluxo dos polímeros quando submetidos às temperaturas de fusão indicadas na Norma ASTM D1238.

O MFI, equipamento representado na Figura 17, permite a utilização de dois métodos para a caracterização reológica, nomeadamente o método Melt Flow Rate (MFR) e o método da taxa de volume de fusão (MVR). Para os polímeros em estudo foi necessário determinar o MFR, bem como o comportamento do polímero com a variação da temperatura.



Figura 17 Equipamento de medição do índice de fluidez

O ensaio MFR é efetuado através da análise do fluxo de massa do polímero quando sujeito à temperatura de fusão. Embora este ensaio não meça a viscosidade dos polímeros, é um método que permite analisar a viscosidade comparativa entre materiais, o que é útil para prever o comportamento dos polímeros quando processados por pultrusão e moldação por compressão a quente.

O outro método de caracterização reológica com o equipamento MFI, é o ensaio MVR, que permite conhecer a taxa de volume do polímero quando submetido à temperatura de fusão. Este método é particularmente interessante pois permite conhecer a densidade dos termoplásticos quando submetidos à temperatura de fusão.

O ensaio MVR consiste na relação da massa de polímero fundido com o volume que ocupa, através da Equação (1), onde ρ_T representa a densidade à temperatura de fusão, m_{ex} é a massa de polímero expelida, e V_{1-2} o volume do barril entre os pontos de início e fim como mostra a Figura 18.

$$\rho_T = \frac{m_{ex}}{V_{1-2}} \quad (1)$$

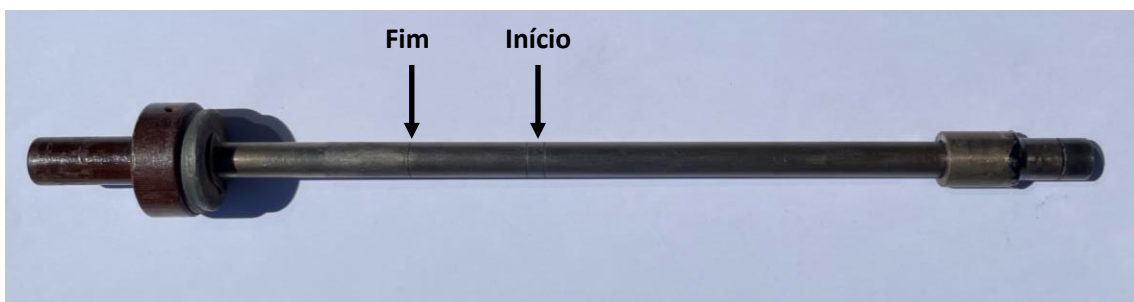


Figura 18 Barril de pressão do equipamento de medição do índice de fluidez

Assim, é possível obter os resultados do MVR, relacionando os valores obtidos na Equação (1), e os resultados das medições de MFR, através da aplicação da Equação (2).

$$MVR = \frac{MFR}{\rho_T} \quad (2)$$

A norma de ensaio para o ensaio MFR especifica a temperatura a que cada um dos polímeros deve ser submetido bem como a massa a aplicar para forçar o polímero através da matriz. O comportamento do polímero durante o processamento está associado aos resultados do MFR, uma vez que um polímero com um caudal elevado pode apresentar níveis mais baixos de viscosidade durante o processamento.

Quando o polímero atinge a temperatura de fusão e é constrangido num espaço, é possível analisar a variação de densidade que ocorre nesta fase, podendo estabelecer uma relação com a pressão desenvolvida durante o processo, o que é especialmente útil para determinar em processos contínuos como a pultrusão ou na produção das fitas pré-impregnadas.

3.2 Produção dos pré-impregnados

3.2.1 Equipamento

Para a produção das fitas pré-impregnadas foi utilizado o equipamento protótipo de produção de pré-impregnados, apresentado na Figura 19, que se encontra nas instalações do laboratório de materiais compósitos do ISEP.

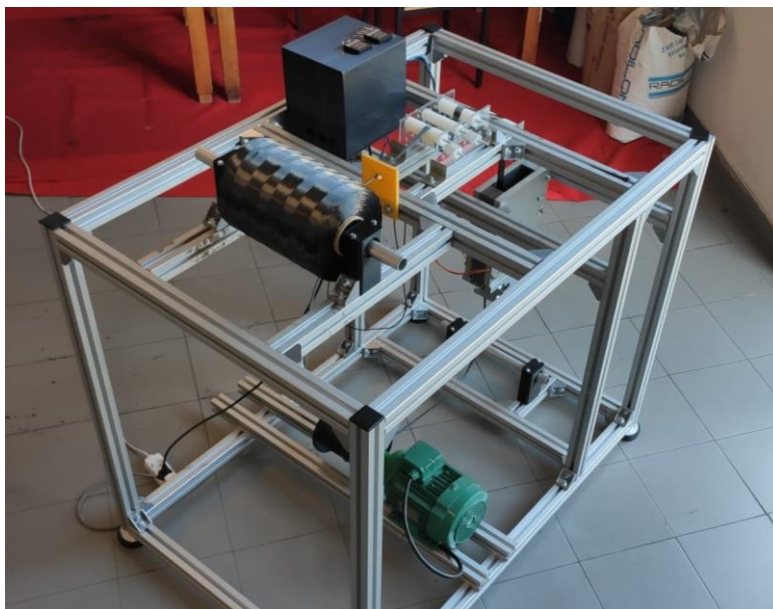


Figura 19 Equipamento de produção de fitas pré-impregnadas

Tal como explicado anteriormente, este equipamento incorpora as várias fases do processo, tais como o espalhamento das fibras, a orientação das mesmas, a fusão do polímero e a combinação dos materiais.

Durante a produção das fitas pré-impregnadas deve ser monitorizada a temperatura do polímero fundido.

O processo inicia no desenrolamento das fibras de carbono que devem ser guiadas de modo a que a sua entrada na camara de impregnação seja controlada e no local desejado. Como se pode observar na Figura 20, as fibras são puxadas através de um guiador orientadas para um sistema de rolos que obrigam as mesmas a abrir, permitindo o alargamento da fibra na entrada no polímero fundido.

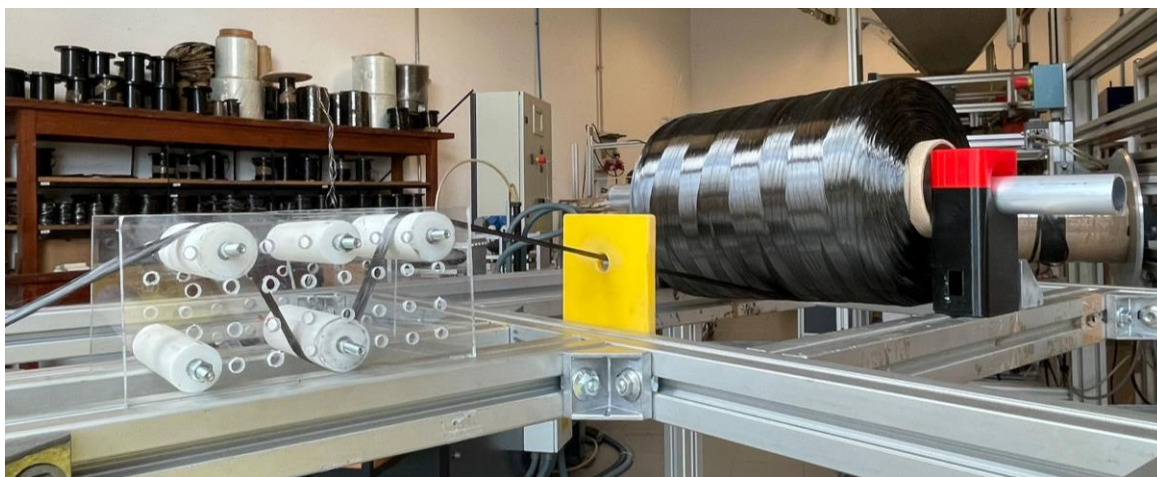


Figura 20 Sistema de espalhamento de fibras

A camara de fusão do polímero, apresentada na Figura 21 é aquecida através do sistema de resistências aplicadas no interior das placas de alumínio. A fieira também possui um sistema de aquecimento independente, permitindo assim diferentes temperaturas na fusão do polímero e na fieira. Assim é possível iniciar o processo de arrefecimento das fitas pré-impregnadas na fieira.



Figura 21 Câmara de fusão do polímero

Na zona de fusão de polímero existe um sistema de rolos, representado na Figura 22, que auxilia no espalhamento de fibras e na impregnação correta das fitas pré-impregnadas. Este sistema foi desenvolvido com o objetivo de reduzir a possibilidade de aparecimento de fibras não impregnadas no interior das fitas. Este sistema permite também que as fibras permaneçam mais tempo em contacto com o polímero fundido, algo que se mostra benéfico neste tipo de semi-produto.



Figura 22 Sistema de rolos de impregnação

Tal como referido, deve ser controlado o arrefecimento das fitas pré-impregnadas, visto que o primeiro ponto de arrefecimento é a fieira, pode ser benéfico que esta se encontre a uma temperatura mais baixa do que a do polímero fundido. Ainda assim, quando o arrefecimento ao ar não é suficiente e a fita pré-impregnada ainda se encontra a elevadas temperaturas no enrolamento, podendo prejudicar a sua geometria final, pode ser necessário arrefecimento extra.

3.2.2 Parâmetros de processo

Foram produzidos dois tipos de fita pré-impregnada, resultantes da combinação de fibras de carbono com PET e com rPET. Na produção de fitas pré-impregnadas PET/FC foram utilizados os parâmetros de produção representados na Tabela 10. A fita resultante pode ser observada na Figura 23.

Tabela 10 Parâmetros de processamento das fitas FC/PET

Parâmetro	Uni	Valor
Temperatura do polímero	°C	250
Temperatura da fieira	°C	250
Velocidade de processamento	m/min	3
Geometria da fita	mm	20 x 0,2
Fração mássica de fibras	%	41,8



Figura 23 Fita pré-impregnada de FC/PET

Para a produção das fitas pré-impregnadas rPET/FC, representadas na Figura 24 foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 11. Na produção destas fitas foram encontradas algumas dificuldades no arrefecimento das mesmas. Por isso foi utilizado o arrefecimento com ar comprimido na saída da fieira, permitindo o enrolamento das fitas, mantendo assim a geometria desejada.

Tabela 11 Parâmetros de processamento das fitas FC/rPET

Parâmetro	Uni	Valor
Temperatura do polímero	°C	265
Temperatura da fieira	°C	255
Velocidade de processamento	m/min	3
Geometria da fita	mm	20 x 0,2
Fração mássica de fibras	%	18,4



Figura 24 Fita pré-impregnada de FC/rPET

3.3 Tranformação dos pré-impregnados

3.3.1 Processamento por Compressão a quente

Para a produção de placas com o material pré-impregnado foi necessário produzir tecidos através da tecelagem simples de fitas, de fibra de carbono impregnada com PET, com dimensão de 400mm. Na produção destes tecidos foi calculada a quantidade de fitas para que as placas fossem produzidas com as dimensões aproximadas de 300x300 (mm). Na Figura 25 é possível observar um tecido durante o processo de tecelagem.

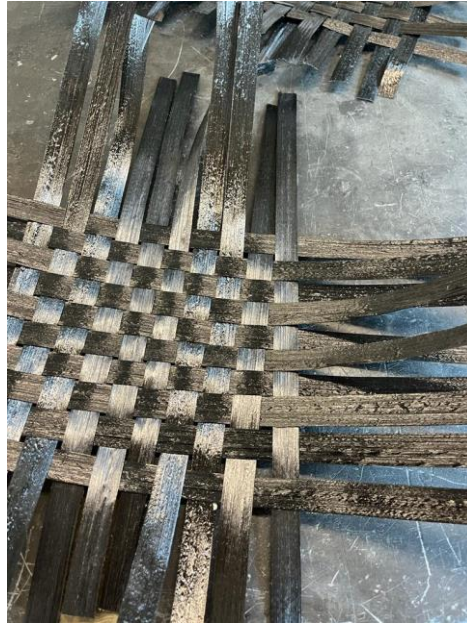


Figura 25 Tecelagem simples de fitas pré-impregnadas

Depois de concluída a produção dos tecidos, como representado na Figura 26, procedeu-se à produção das placas. Cada placa é constituída pelo empilhamento de seis camadas de tecido de fitas pré-impregnadas sobrepostas de modo a reduzir a quantidade de vazios existentes entre as camadas.



Figura 26 Camada de tecido de fitas pré-impregnadas

Depois de feitos os empilhamentos, foi aplicado desmoldante para que os mesmos pudessem ser processados na prensa de pratos quentes. Na produção de todas as placas foi realizado o pré-aquecimento da prensa para que no momento do início do processamento a mesma já se

encontrasse à temperatura desejada. Na Tabela 12 são indicados os parâmetros utilizados para a produção das quatro placas em estudo.

Tabela 12 Parâmetros de processamento das placas por compressão a quente

Material	Temperatura	Pressão
PET	265 °C	2,5 MPa
		5,0 MPa
rPET	275°C	2,5 MPa
		5,0 MPa

3.3.2 Processamento com monitorização da consolidação

Tendo em conta que os materiais em estudo são termoplásticos foi necessário estudar a variação de espessura das placas a ser produzidas durante a sua consolidação. Foi realizada uma análise com dois parâmetros de produção diferentes, ou seja, a 2,5 MPa e a 5,0 MPa, mantendo a temperatura de processamento.

Durante o processamento das placas produzidas foi utilizado um sensor para a análise da variação da espessura durante a consolidação do material por compressão a quente. A Figura 27 ilustra o *setup* montado para a recolha desses dados.



Figura 27 Setup dos equipamentos de controlo de LVDT

Foi feita uma aproximação logarítmica com os resultados de tempo e espessura para obter os valores do fator K e α , por análise gráfica, conforme apresentado no modelo generalizado de consolidação.

Modelo Generalizado de consolidação

Enquanto existem modelos criados para a utilização Towpregs pré-impregnados, neste trabalho foi aplicado um modelo generalizado de consolidação para compósitos produzidos a partir de Fitas. Nos arranjos anteriores as variáveis foram definidas adequadamente, mas no caso das Fitas, como não há diâmetro de partícula de polímero, aplica-se um modelo generalizado [38], [42].

$$h(t) = \Delta(t) - \Delta f_i + h_f \quad (3)$$

Na Equação (3), h_f representa a espessura final do compósito, $\Delta(t)$ a cordenada instantânea medida e Δf_i é a coordenada instantânea medida no final do ensaio.

Considerando que a quantidade de vazios na fase final da consolidação é desprezada, a espessura final do compósito, h_f , e a espessura num determinado instante durante a consolidação, $h(t)$, podem ser relacionadas assumindo que quando $h(t)$ atinge o valor de h_f , o compósito se encontra totalmente consolidado. Com isso, a razão de consolidação, $c(t)$, é definida pela Equação (4).

$$c(t) = h_f / h(t) \quad (4)$$

A consolidação do compósito é considerada completa quando $c(t)$ atinge o valor 1. Quando $c(t)$ é menor que 1, a diferença é igual à quantidade de vazios presentes no compósito. Com isso, o teor de vazios do compósito em um determinado momento durante a consolidação, pode ser determinado pela Equação (5).

$$v(t) = 1 - c(t) \quad (5)$$

Considerando que a viscosidade do polímero, a pressão aplicada e a geometria das fibras e do polímero são constantes no compósito durante as condições de processamento, define-se uma constante K para estas. Além disso, foi feita uma adaptação para os Towpregs através da relação entre o l/L está associado ao v_{ff}/v_{pf} , e considerando o expoente igual a α .

Com essas considerações, a Equação (6) é escrita como:

$$t = K (l / L)^\alpha \quad (6)$$

O K e o α são parâmetros obtidos experimentalmente, e (l / L) é igual a $c(t)$.

3.4 Determinação do teor de fibras e polímero

Foram efetuados ensaios de calcinação para medir o teor de polímero nas amostras do laminado em estudo. Com estes ensaios é possível saber a percentagem de fibra e polímero que cada condição apresenta, obtendo-se assim uma avaliação qualitativa de cada condição de processo.

Para a análise dos materiais produzidos, foram retiradas amostras. O processo inicia com o pré-aquecimento da mufla, como se pode ver na Figura 28, à temperatura desejada. A mufla utilizada encontra-se no Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP e tem a designação NABERTHERM LHT08/16.



Figura 28 Forno mufla NABERTHERM LHT08/16.

De seguida, com recurso a uma balança de precisão, ilustrada na Figura 29, os cadinhos devem ser pesados vazios e em seguida com as amostras a ensaiar. É importante ressaltar que é necessário utilizar pelo menos 2 gramas do material a ser ensaiado, conforme a norma. São utilizadas pelo menos duas amostras por condição para maior precisão nos resultados.



Figura 29 Balança de precisão

Finalmente, os cadinhos são colocados na mufla durante 20 minutos. No final do ciclo, os cadinhos são novamente pesados para avaliar a percentagem de massa que foi perdida por incineração.

Abaixo, na Figura 30 e na Figura 31, é possível observar o cadinho com a amostra antes da incineração e depois, respetivamente. Para obter os resultados do procedimento efetuado, foi necessário aplicar duas equações, de acordo com o tipo de incineração. Quando há uma incineração total do polímero, a Equação 1 deve ser aplicada após a incineração do compósito, obtendo-se a respetiva fração mássica das fibras para o compósito representada por w_{ff} . Por outro lado, se não houver incineração total do polímero, os valores de fibra e polímero remanescente serão obtidos através da aplicação da Equação 1 é possível obter os valores da fração mássica remanescente de fibras e polímero.



Figura 30 Amostra antes da calcinação



Figura 31 Amostra após calcinação

Fração mássica de fibras e polímeros

Como explicado anteriormente, esta equação é aplicada para determinar a fração mássica das fibras (wff) e do polímero (wfp). Se houver incineração total do polímero apenas a fração mássica de fibras é calculada, sendo esse o resultado final.

$$wf(f, p) = \frac{m3 - m1}{m2 - m1} * 100 \quad (7)$$

Em que:

$wf(f, p)$ - Fração mássica de fibras (wff) e polímero (wfp)

$m1$ - Massa do cadinho [g]

$m2$ - Massa do cadinho com a amostra [g]

$m3$ - Massa do cadinho após incineração [g]

Após a determinação das frações mássicas das fibras, wff , e do polímero, wfp , é possível obter o teor em massa de fibras do compósito aplicando a equação apresentada abaixo.

Teor em massa das fibras do compósito

$$wf = 1 - \frac{m_{final} - wff * m_{comp}}{(wfp - wff) * m_{comp}} \quad (8)$$

Em que:

wf - Teor em massa de fibras do compósito.

wfp - Fração mássica de polímero

wff - Fração mássica das fibras

Esta equação é utilizada quando não há incineração total do polímero à temperatura de calcinação, pelo que é necessário considerar a massa de polímero não queimado na amostra após a incineração.

3.5 Ensaios Mecânicos

3.5.1 Ensaios de tração

Através de ensaios de tração uniaxial, e segundo a norma ISO 527-1 é possível determinar propriedades mecânicas que permitem o melhor conhecimento dos materiais em estudo. Essas propriedades sendo o módulo de elasticidade e tensão no ponto de rotura.

Os ensaios de tração foram realizados no equipamento SHIMADZU AG-X 100 kN, apresentado na Figura 32, que se encontra no Laboratório de Ensaios Tecnológicos do ISEP. Foi utilizado o extensômetro durante os ensaios para melhorar a precisão na obtenção do modulo de elasticidade do material.



Figura 32 Equipamento de ensaios SHIMADZU AG-X 100 kN

Foram efectuadas três medições da largura e da espessura de cada provete para obter a área de resistência média da secção transversal. Com os resultados obtidos pelo equipamento, nomeadamente a força e o deslocamento durante o ensaio, a resistência à tração pode ser calculada pela Equação (9):

Tensão

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (9)$$

Em que,

F – Força exercida em um determinado instante [N]

A – área inicial da secção transversal do provete [mm²]

Para determinar o módulo de elasticidade à tração, o valor de l_0 deve ser a distância inicial entre os cliques do extensômetro, que é de 50 milímetros, e l o deslocamento medido. Para analisar a rigidez do material compósito, a deformação medida pelo extensômetro e o módulo de elasticidade é determinado pelo valor do declive da curva tensão-deformação para valores de deformação entre 0,0005 e 0,0025. Para uma melhor precisão do resultado, o módulo de elasticidade neste trabalho foi obtido por regressão linear da curva tensão-deformação no intervalo de deformação mencionado, sendo a inclinação da reta igual ao módulo de elasticidade do material

Módulo de elasticidade

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (10)$$

Em que,

ε_1 – extensão longitudinal de 0,0005

ε_2 – extensão longitudinal de 0,0025

σ_1 – tensão do ponto de extensão de $\varepsilon_1 = 0,0005$ [MPa]

σ_2 – tensão do ponto de extensão de $\varepsilon_2 = 0,0025$ [MPa]

3.5.2 Ensaios de flexão

Os ensaios de flexão a três pontos foram efetuados no Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP, utilizando uma máquina universal de ensaios, SHIMADZU AG-X 100 kN , apresentada na Figura 33.



Figura 33 Máquina universal de ensaios SHIMADZU AG-X 100 kN

Neste ensaio, o provete é apoiado entre dois suportes com uma distância que é definida pela Norma ISO 14125. Posteriormente, é aplicada uma força com recurso a um punção, no centro do provete. Com este ensaio é possível caracterizar algumas propriedades do material tais como o módulo de elasticidade, a resistência à flexão e a flexão máxima.

Antes de realizar os ensaios, os provetes foram cortados utilizando uma serra elétrica, com as dimensões definidas na norma. Como a serra elétrica utiliza água para auxiliar a operação de corte, foi necessário secar todos os provetes antes de realizar os ensaios, para garantir que não existe qualquer influência negativa pela presença de humidade. Após a secagem dos provetes, procedeu-se à medição das dimensões.

Foram realizadas três medições de largura e espessura e calculadas as respetivas médias, que foram consideradas no cálculo das propriedades. Terminando esse procedimento, as amostras foram ensaiadas, como se pode ver na Figura 34.



Figura 34 Provete a ser ensaiado à flexão

Os provetes foram ensaiados a uma velocidade de 2mm/min e a uma distância entre apoios de 90 mm nas amostras de FC/PET, que é a recomendada para os compósitos reforçados com fibras contínuas, conforme na norma ISO 14125.

Após todos os testes efetuados, todos os dados e gráficos foram analisados e com isso foram encontradas as principais propriedades à flexão, recorrendo às expressões abaixo.

Resistência à Flexão

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (11)$$

Em que:

σ_f - Resistência à flexão [MPa]

F - Carga [N]

L - Distância entre apoios [mm]

b - Largura do provete [mm]

h - Espessura do provete [mm]

Módulo de flexão

De acordo com a norma é possível obter o módulo à flexão através de análise gráfica computacional. Para encontrar o módulo de flexão, foi feita uma regressão linear do gráfico tensão-deformação para valores de deformação entre 0,0005 e 0,0025. Depois de efetuar a regressão linear, o módulo de flexão é o declive da reta obtida.

$$Ef = \frac{L^3}{4bh^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad (12)$$

Onde:

Ef - Módulo de elasticidade à flexão [MPa]

Declive linear entre os valores de deformação de 0,0005 e 0,0025 no gráfico tensão – deformação [N/mm]

Deformação

$$\varepsilon = \frac{6sh}{L^2} \quad (13)$$

Em que:

ε - Deformação na superfície exterior do provete [-]

s - Deslocamento máximo [mm]

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados os resultados da produção, consolidação e ensaios apresentados na metodologia do trabalho e justificação dos mesmos.

4.1 Análise Termogravimétrica (TGA)

Ao relacionar a temperatura de degradação dos materiais com a temperatura de fusão, é possível definir a janela de processamento, permitindo uma otimização das temperaturas.

A análise termogravimétrica do PET, que pode ser observada na Figura 35, revelou que a temperatura em que se inicia a perda de massa por degradação térmica é 386°C. Como o ponto de fusão fornecido pelo fabricante é de 250°C, a janela de processamento para este polímero pode ser definida entre 250°C e 386°C.

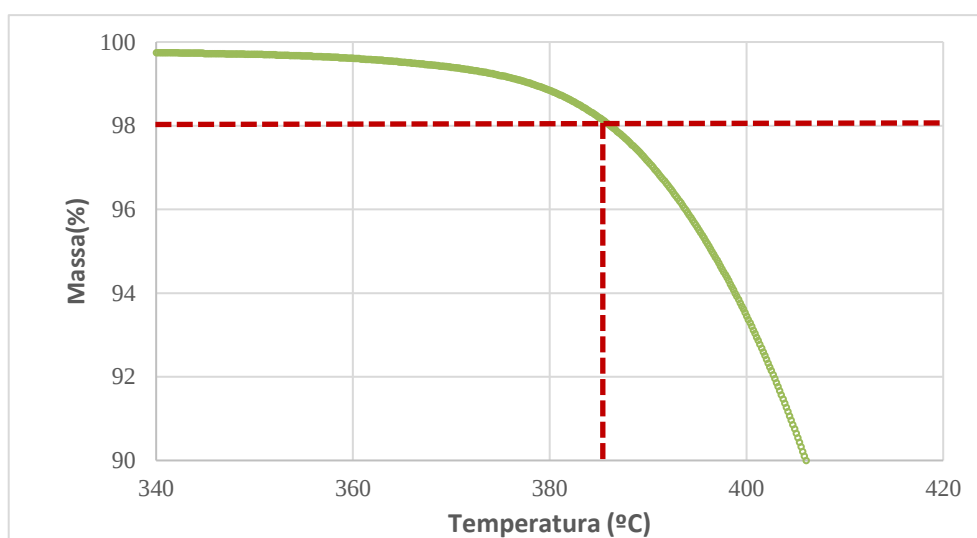


Figura 35 Temperatura de degradação do PET

Na produção das fitas termoplásticas, uma janela de processamento de 136°C é suficientemente adequada para garantir uma boa impregnação. As características reológicas deste polímero também devem ser consideradas na seleção das temperaturas de processamento.

Para efeitos de cálculo das frações mássicas de polímero nas fitas pré-impregnadas produzidas é também necessário saber quando ocorre a inceneração quase total do material, assim como demonstrada na Figura 36, é realizado o ensaio até à perda total de polímero.

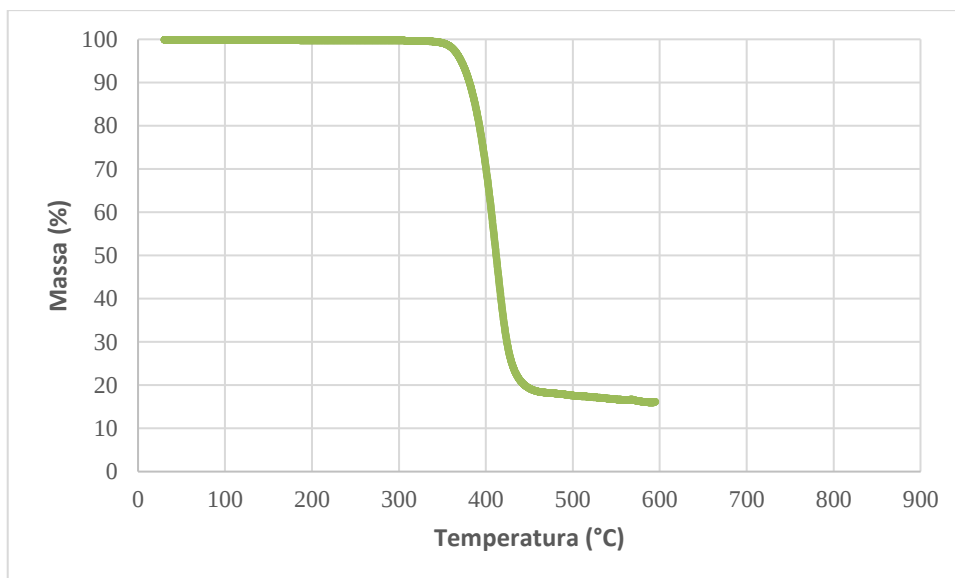


Figura 36 Análise termogravimétrica do PET

A análise termogravimétrica do rPET pode ser observada na Figura 38. Através da análise da Figura 37 é possível obter a temperatura em que se inicia a perda de massa por degradação térmica é 377°C. Como o ponto de fusão fornecido pelo fabricante é de 245°C, a janela de processamento para este polímero pode ser definida entre 245°C e 377°C.

Assim a janela de processamento do rPET é de 132 °C, permitindo alguma flexibilidade na produção das fitas pré-impregnadas.

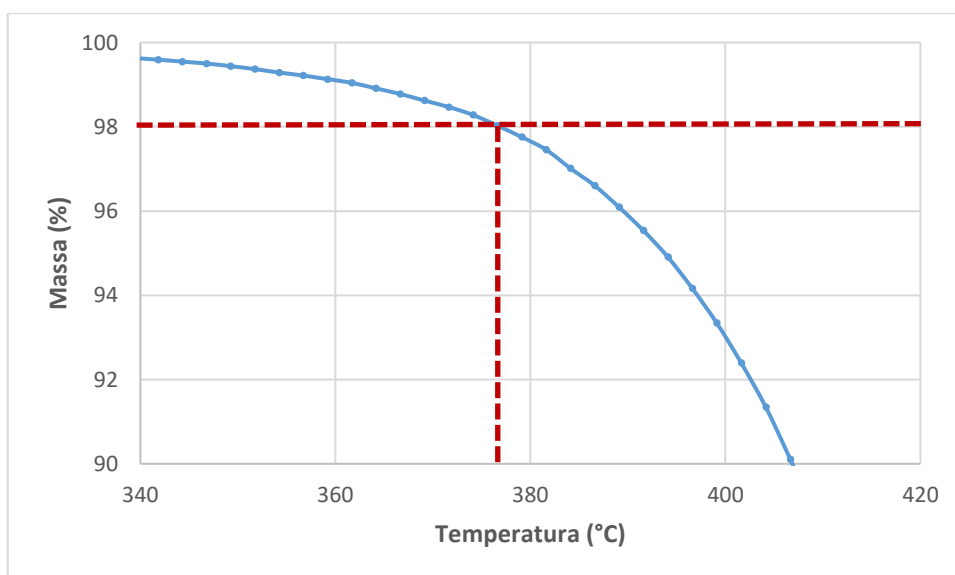


Figura 37 Temperatura de degradação do rPET

Para efeitos de cálculo das frações mássicas de polímero nas fitas pré-impregnadas produzidas é também necessário saber quando ocorre a inceneração quase total do material, assim como demonstrada na Figura 38, é realizado o ensaio até à perda total de polímero.

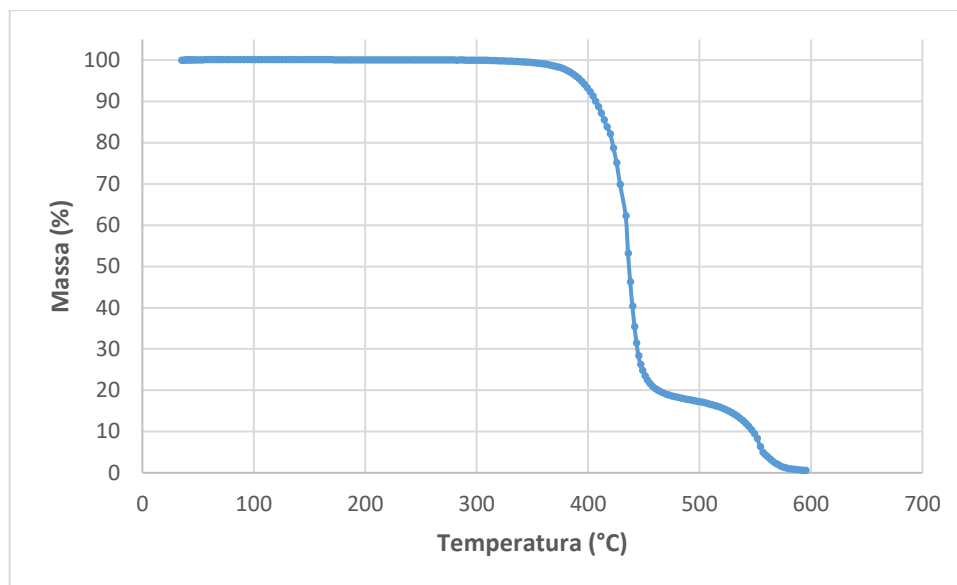


Figura 38 Análise termogravimétrica do rPET

Atingindo os 20% da massa inicial de polímero, aos 460°C, nota-se um achatamento da curva no TGA do rPET. Estando perante um polímero de origem reciclada, poderá eventualmente estar associado a impurezas ou outros elementos não controláveis que poderão estar presentes no polímero.

4.2 Caracterização reológica

4.2.1 Índice de Fluidiez do Polímero Fundido - MFR

Os resultados do ensaio de MFR são apresentados na Tabela 13, com os resultados completos apresentados no Apêndice B - Resultados do ensaio de índice de fluidez (MFI). Para cada condição, foram efetuados seis ensaios, cada um fornecendo 8 gramas do termoplástico ao equipamento e com o tempo de estabilização de 300 segundos.

O comportamento do PET durante os ensaios de MFR revelou-se instável, uma vez que se registou um fluxo incontrolável do polímero, estando associado à diminuição repentina de viscosidade que este apresenta à temperatura de processamento.

Foi efetuada uma afinação fina das temperaturas para controlar o fluxo, embora sem sucesso. O elevado desvio-padrão registado deve-se ao motivo mencionado. Embora a norma mencione três temperaturas para o ensaio do PET, nomeadamente 210°C, 250°C e 275°C, a única temperatura possível para a realização destes ensaios foi a 253°C, pois a 210°C o polímero não se fundia e consequentemente não havia fluxo, e a 275°C o fluxo era descontrolado.

O comportamento do rPET nos ensaios de MFR foi mais estável do que o PET, tendo-se registado um fluxo relativamente controlado e assim um menor desvio padrão.

Tabela 13 Resultados das medições de MFR dos polímeros

Polímero	Temperatura (°C)	Massa (kg)	MFR (g/10min)
PET	253	2,16	68 ± 21
rPET	255	2,16	40 ± 5

4.2.2 Índice Volumétrico do Polímero Fundido - MVR

O ensaio MVR foi efetuado com o objetivo de conhecer o volume de escoamento dos termoplásticos quando submetidos à temperatura de fusão. Este ensaio foi realizado com o objetivo de conhecer o caudal volumétrico em processamento, o que é conveniente pois relaciona-se com as pressões desenvolvidas nas restrições de um molde ou matriz.

O ensaio MVR foi também efetuado com o objetivo de determinar a variação da massa volúmica quando os polímeros são sujeitos à temperatura de fusão. É expectável que a massa volúmica varie no contexto da fusão, com polímeros que apresentam viscosidades mais baixas sejam mais afetados por este fenómeno.

Os resultados do MVR são apresentados na Tabela 14, onde também é apresentada a percentagem de variação da massa volúmica, que consiste na variação da massa volúmica verificada à temperatura de fusão, em relação à densidade do mesmo polímero à temperatura ambiente.

Tabela 14 Resultados das medições de MVR dos polímeros

Polímero	Temperatura (°C)	Massa (Kg)	MVR (cm ³ /10min)	Massa volúmica (g/cm ³)	Variação da densidade (%)
PET	253	2,16	56,77	1.20	- 4,0
rPET	255	2,16	33,19	1,21	- 3,2

4.3 Análise de Consolidação por Compressão a Quente

Os resultados experimentais permitem a determinação dos fatores K , e α , para a estimativa do tempo necessário para o processamento e a determinação de curvas de consolidação para comparação com as experimentais. Estes resultados podem ser observados na Tabela 15.

Com os fatores determinados, as curvas teóricas foram sobrepostas às experimentais, e a evolução gráfica da consolidação dos compósitos com matriz PET a 2,5 MPa e a 5,0 MPa de pressão são apresentadas na Figura 39 e Figura 40, respectivamente.

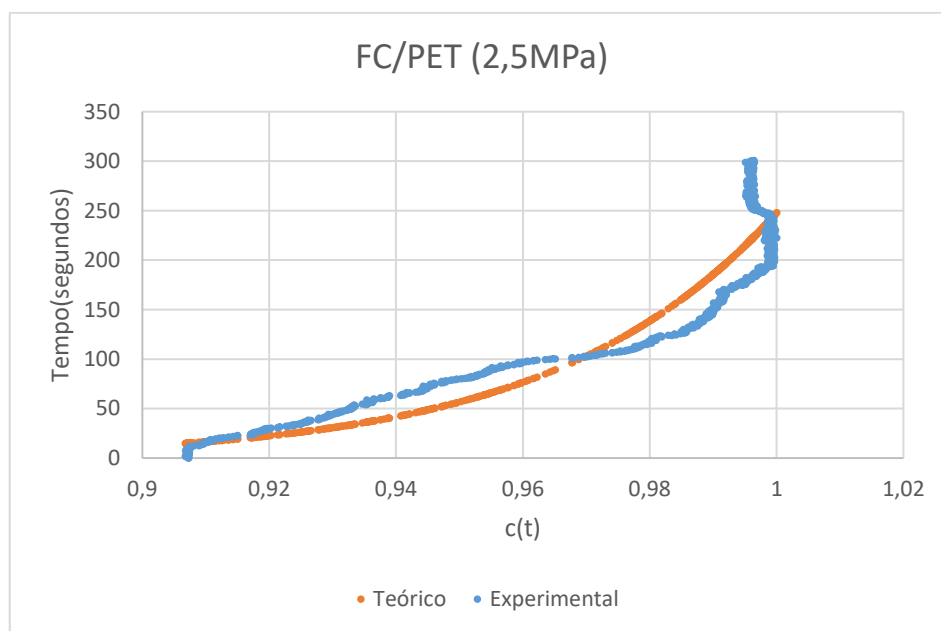


Figura 39 Curva de consolidação experimental e teórica de compósitos FC/PET a 2,5 MPa

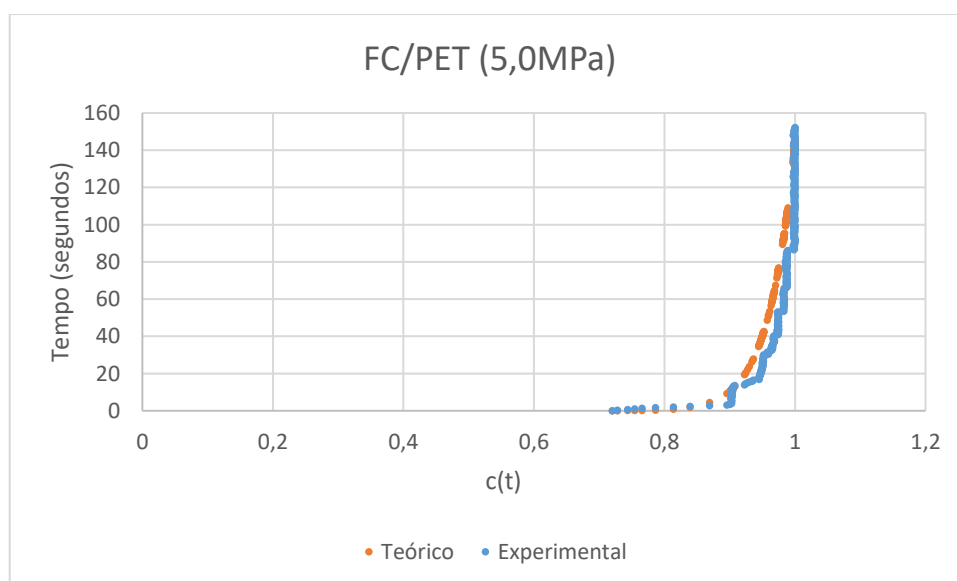


Figura 40 Curva de consolidação experimental e teórica de compósitos FC/PET a 5,0 MPa

A Figura 41 e Figura 42 representam, respetivamente, a evolução gráfica da consolidação dos compósitos com matriz rPET a 2,5 MPa e a 5,0 MPa de pressão .

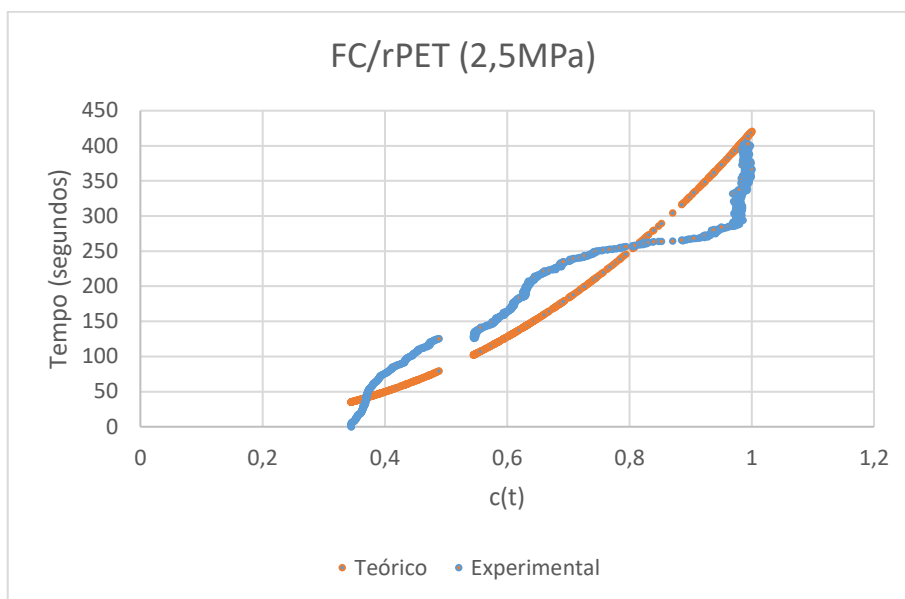


Figura 41 Curva de consolidação experimental e teórica de compósitos FC/rPET a 5,0 MPa

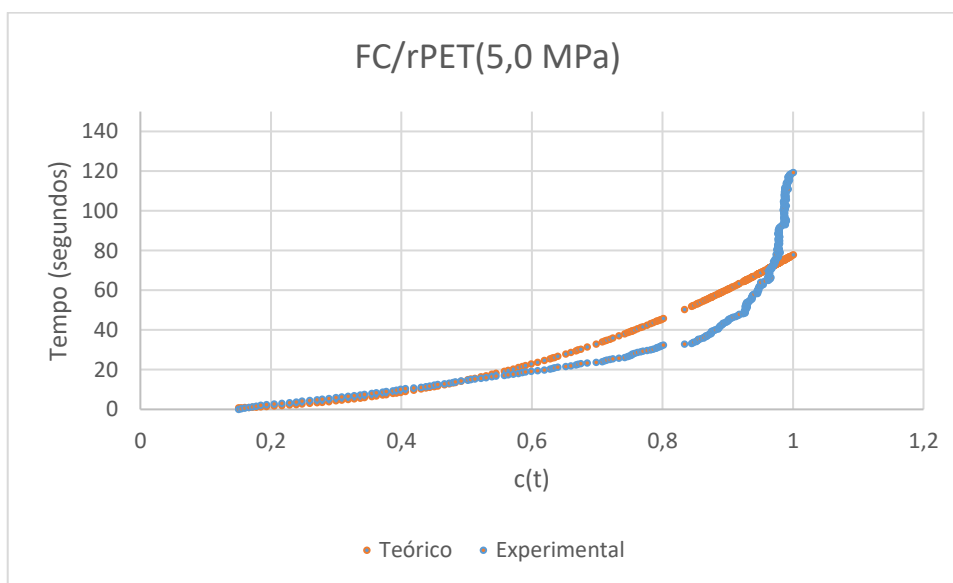


Figura 42 Curva de consolidação experimental e teórica de compósitos FC/rPET a 5,0 MPa

Tabela 15 Fatores K , α , e tempo de impregnação experimental dos laminados compósitos

	K	α	$t_{exp}(s)$
FC/PET (2,5 MPa)	28,75	2,40	250
FC/PET (5,0 MPa)	24,80	2,16	108
FC/rPET (2,5 MPa)	2,324	2,63	265
FC/rPET (5,0 MPa)	2,389	1,89	50

Por análise gráfica, é possível verificar que as curvas de consolidação obtidas pelo modelo generalizado, acompanham a consolidação dos laminados experimentalmente. É possível também verificar a diminuição de tempo de consolidação ao aplicar-se uma pressão de consolidação superior, notando-se aqui um tempo significativamente menor de processo.

Este modelo torna-se também interessante para avaliar o tempo de processo necessário para a obtenção de um certo nível de consolidação, que em casos de aplicação industrial poderá ser vantajoso quando a consolidação total não é exigida.

4.4 Ensaio de Calcinação

Como referido anteriormente, o ensaio de calcinação é realizado com o objetivo de determinar a fração mássica e fração volúmica de fibras nas amostras em estudo. Na Tabela 16 são apresentados os resultados do ensaio de calcinação das quatro placas em estudo. Por cada placa foram testadas três amostras para reduzir a taxa de erro.

Sabendo o valor da fração mássica de fibras do material e aplicando a equação (14) é obtido o valor da fração volumica de fibras.

$$v_f = \frac{w_f / \rho_f}{w_f / \rho_f + (1 - w_f) / \rho_p} \quad (14)$$

ρ_f / ρ_p – Massa volúmica de fibra e polímero, respetivamente (g/cm³);

v_f – Fração volúmica de fibras;

w_f – Fração mássica de fibras

Tabela 16 Resultados ensaio de Calcinação

	Temperatura de ensaio (°C)	Fração mássica de fibras (%)	Fração volúmica de fibras (%)
FC/PET (2,5MPa)	500	39,8 ± 2,6	31,5 ± 2,4
FC/PET (5,0MPa)	500	42,3 ± 2,6	33,8 ± 2,4
FC/rPET (2,5MPa)	500	43,7 ± 3,5	25,7 ± 2,7
FC/rPET (5,0MPa)	500	46,3 ± 2,2	27,7 ± 1,8

Com o conhecimento das frações mássicas e volúmicas de fibras é possível através de metodologias teóricas de micromecânica prever as propriedades mecânicas dos materiais compósitos em estudo. Através da equação (15) é possível obter o valor do modulo de elasticidade na direção das fibras.

$$E_1 = \eta * E_f * v_f + E_p(1 - v_f) \quad (15)$$

Em que,

η – Fator com valor 0,5 (tecido equilibrado);

E_f, E_p – Módulo de elasticidade da fibra e do polímero, respetivamente;

E_1 – Módulo de elasticidade na direção das fibras.

Na Tabela 17 são apresentadas as propriedades mecânicas previstas para os materiais compósitos produzidos com base no estudo realizado pelo ensaio de calcinação. Este ensaio permite obter os valores reais da constituição das placas criadas.

Tabela 17 Previsão teórica das propriedades mecânicas dos materiais compósitos em estudo

Material	E_1 (GPa)	σ (MPa)
FC/PET (2,5MPa)	39,2	315
FC/PET (5,0MPa)	41,9	338
FC/rPET (2,5MPa)	31,6	257
FC/rPET (5,0MPa)	33,9	277

4.5 Caracterização Mecânica

4.5.1 Ensaios de Tração

Foram efetuados ensaios de tração para os laminados compósitos produzidos a partir de fitas, reforçados com fibras de carbono, com o objetivo de as tensões máximas que os provetes estiveram sujeitos e a deformação na rotura. A totalidade dos resultados é apresentada no Apêndice F.

Durante os ensaios de tração, a obtenção da resistência dos compósitos revelou-se um desafio, pelo deslizamento do o provete ensaiado nas amarras da máquina de ensaio. A rotura dos compósitos foi conseguida em alguns provetes ensaiados, e os resultados são apresentados na

Tabela 18.

Através da análise dos resultados obtidos, apresentados na

Tabela 18 ,através dos ensaios de tração é possível concluir que na produção de laminados compósitos em que é utilizado o PET como matriz, o aumento da pressão se torna benéfico já que os laminados apresentam melhores propriedades mecânicas.

Tabela 18 Resultados dos ensaios de tração

	Força Máxima, F (N)	Tensão Máxima, σ (MPa)	Módulo de elasticidade, E (GPa)
FC/ PET (2,5MPa)	14330,3 $\pm$ 747,7	210,2 $\pm$ 21,1	28,9 $\pm$ 13,7
FC/ PET (5,0MPa)	9710,2 $\pm$ 5058,9	296,9 $\pm$ 157,3	50,3 $\pm$ 10,1
FC/ rPET (2,5MPa)	3465,5 $\pm$ 1549,2	205,0 $\pm$ 80,4	41,7 $\pm$ 5,8
FC/ rPET (5,0MPa)	2926,2 $\pm$ 1201,3	166,3 $\pm$ 60,9	46,8 $\pm$ 6,3

As curvas tensão-deformação, apresentadas na Figura 43 e na Figura 44, mostram o comportamento do material quando ensaiado. É possível observar comportamentos diferentes consoante a zona do laminado de onde foram retirados os provetes ensaiados , estas discrepâncias ocorrem por se tratar de um laminado com tecidos produzidos manualmente.

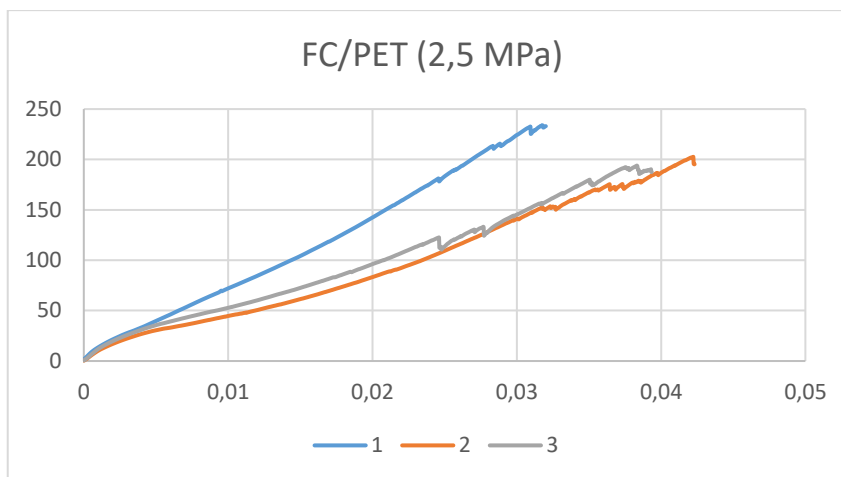


Figura 43 Curva tensão-deformação FC/PET (2,5 MPa)

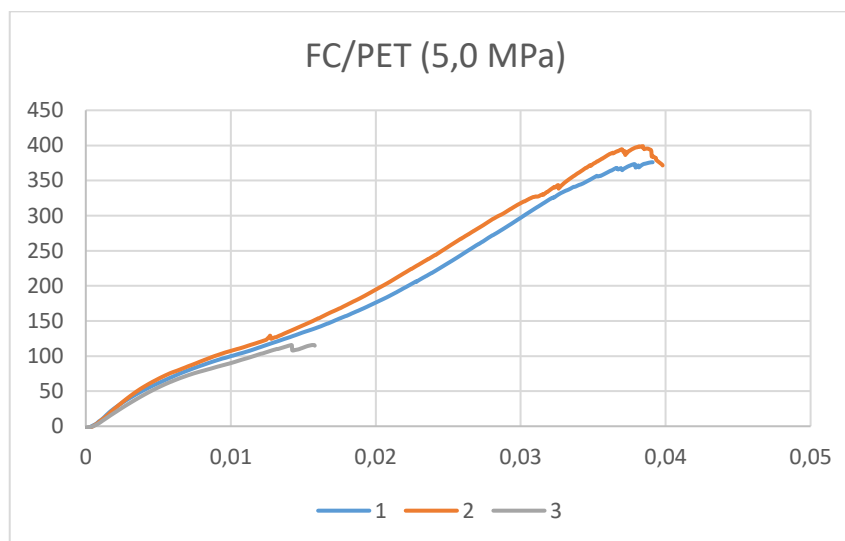


Figura 44 Curva tensão-deformação FC/PET (5,0 MPa)

No caso dos laminados reforçados em que é utilizado o rPET como matriz observa-se melhores propriedades a pressão mais baixa na sua consolidação. Durante os ensaios destes laminados ocorreu, também, o deslizamento dos provetes nas amarras da máquina de ensaios universal, dificultando a obtenção das propriedades mecânicas dos mesmos.

As curvas tensão-deformação destes laminados são apresentadas na Figura 45 e na Figura 46.

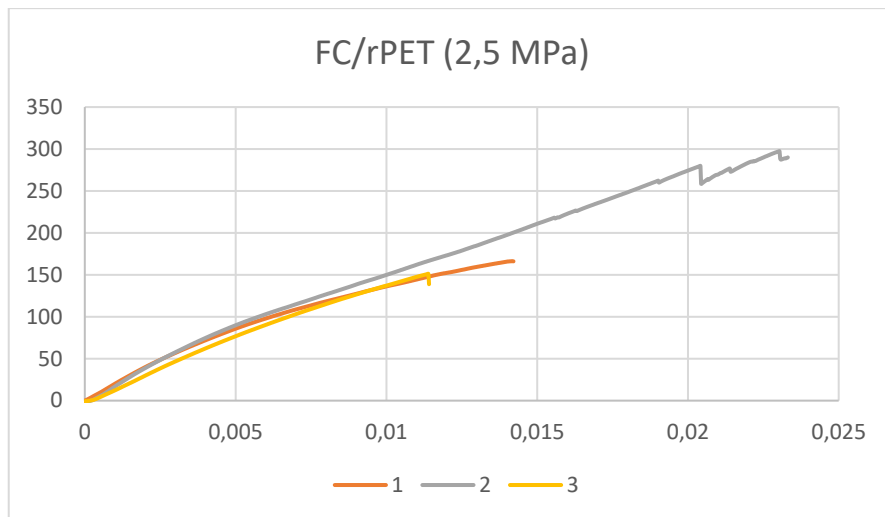


Figura 45 Curva tensão-deformação FC/rPET (2,5 MPa)

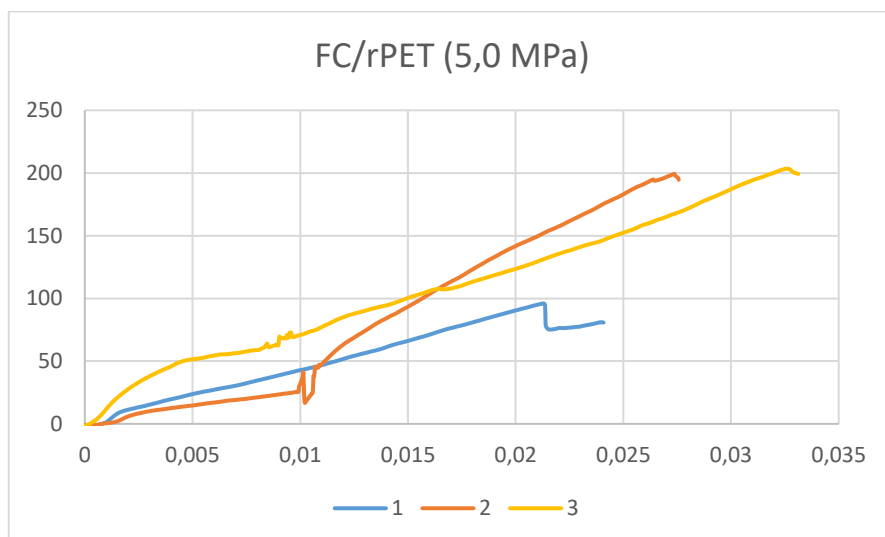


Figura 46 Curva tensão-deformação FC/rPET (5,0 MPa)

De notar que nestes ensaios existe uma pequena trepidação nas curvas durante ensaio, visto que o extensómetro de pinças foi removido pausando o ensaio. Nos outros ensaios, resolveu-se retirar o extensómetro com o ensaio a decorrer.

4.5.2 Ensaio de flexão

Foram efectuados ensaios de flexão para compreender o comportamento do material laminado transformado por compressão a quente. Os resultados serão comparados e apresentados neste capítulo. É importante referir que todos os gráficos desenvolvidos para analisar os resultados dos ensaios de flexão podem ser encontrados no apêndice G.

Os resultados dos ensaios de flexão dos laminados compósitos são apresentados na Tabela 19, onde é possível observar a força de flexão que os provetes resistiram, o módulo de flexão e a deformação na rutura.

Tabela 19 Resultados ensaios de flexão

	Resistência à flexão [MPa]	Módulo à flexão [GPa]	Deformação na rotura [%]
FC/ PET (2,5MPa)	191,6 ± 28,2	25,6 ± 5,1	0,95 ± 0,13
FC/ PET (5,0MPa)	291,6 ± 32,8	42,9 ± 7,1	0,84 ± 0,24
FC/ rPET (2,5MPa)	331,7 ± 65,8	33,9 ± 6,1	1,01 ± 0,93
FC/ rPET (5,0MPa)	233,3 ± 83,0	29,4 ± 14,9	1,01 ± 0,25

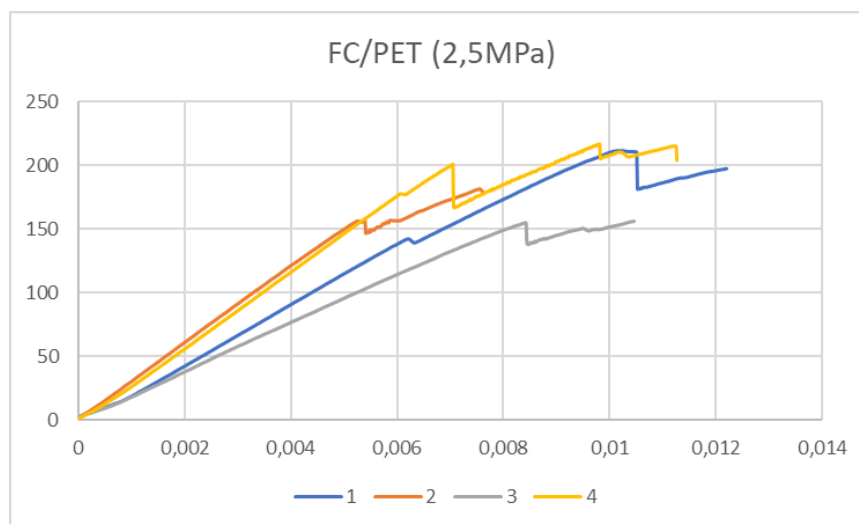


Figura 47 Curva tensão-deformação FC/PET (2,5 MPa)

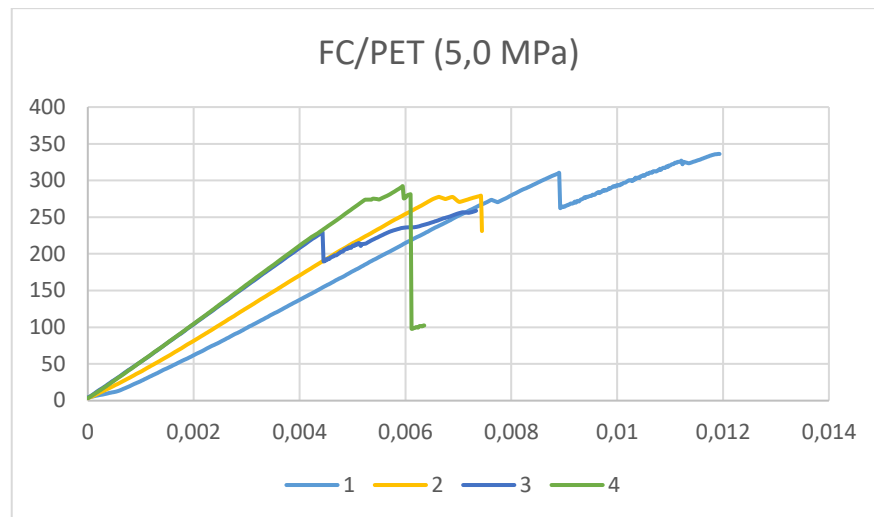


Figura 48 Curva tensão-deformação FC/PET (5,0 MPa)

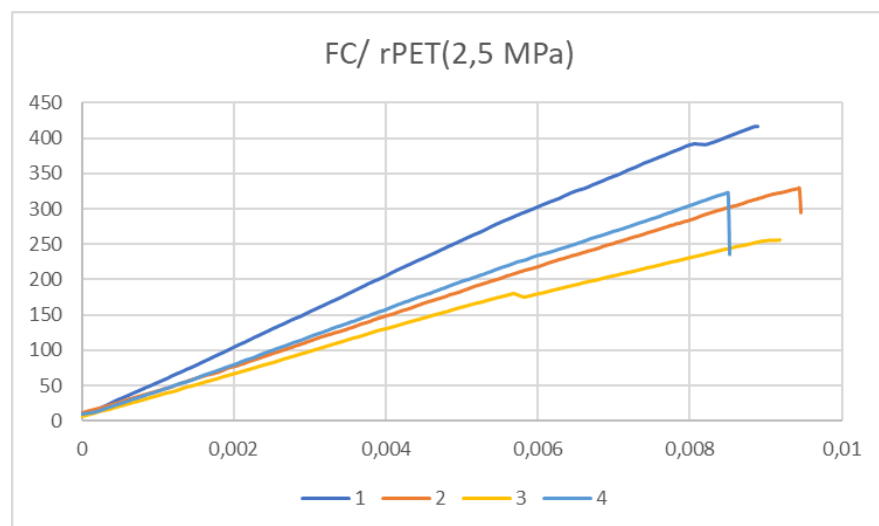


Figura 49 Curva tensão-deformação FC/rPET (2,5 MPa)

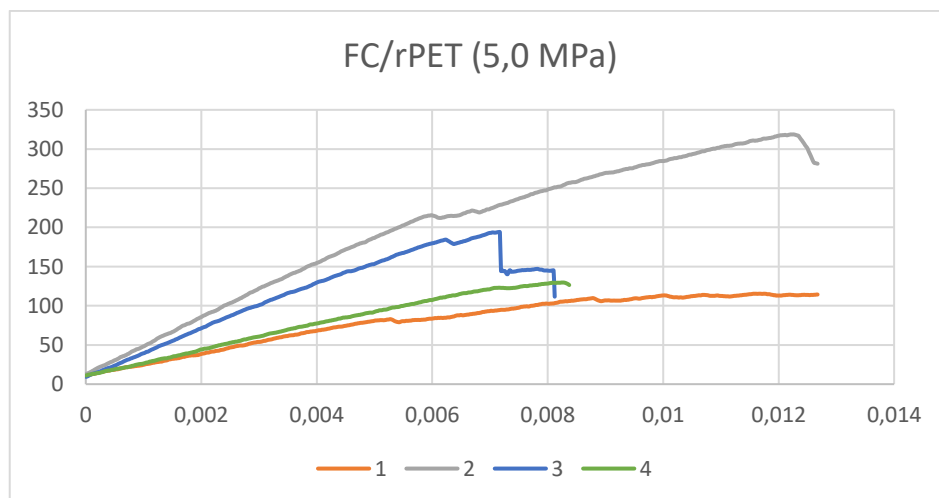


Figura 50 Curva tensão-deformação FC/rPET (5,0 MPa)

4.6 Análise de resultados dos ensaios

Considerando o estudo previamente realizado das propriedades mecânicas das amostras produzidas a partir do seu teor em fibras é possível perceber se os resultados experimentais são satisfatórios.

Na Tabela 20 são apresentados os resultados experimentais e os respectivos valores teóricos das principais propriedades mecânicas em estudo. Estas, o módulo de elasticidade à tração e à flexão e a repetiva tensão de rotura.

Tabela 20 Comparação dos resultados experimentais e teóricos

	Experimental			Teórico	
	Módulo de elasticidade E (GPa)	Módulo à flexão E _f (GPa)	Tensão Máxima σ (MPa)	E ₁ (GPa)	σ (MPa)
FC/ PET (2,5MPa)	28,9 ± 13,7	25,6 ± 5,1	210,2 ± 21,1	39,2	315
FC/ PET (5,0MPa)	50,3 ± 10,1	42,9 ± 7,1	296,9 ± 157,3	41,9	338
FC/ rPET (2,5MPa)	41,7 ± 5,8	33,9 ± 6,1	205,0 ± 80,4	31,6	257
FC/ rPET (5,0MPa)	46,8 ± 6,3	29,4 ± 14,9	166,3 ± 60,9	33,9	277

Pela análise dos resultados é possível observar que nenhuma das amostras atingiu a tensão de rotura prevista. Em termos de módulo de elasticidade a amostra FC/PET (5,0MPa) e FC/rPET (2,5MPa) apresentaram melhores resultados do que o previsto pelos cálculos feitos a partir dos ensaios de calcinação.

Apesar de todas as amostras serem produzidas pela mesma metodologia, existem algumas diferenças no seu comportamento resultante, já que algumas apresentam propriedades inferiores às expectáveis e noutros casos uma melhoria.

4.7 Microscopia Eletrônica de Varrimento (SEM)

Os ensaios óticos efetuados aos compósitos reforçados com fibra de carbono foram realizados por SEM. As imagens de superfície foram adquiridas em modo de elétrons secundários (SE) com uma tensão de aceleração de 10kV.

As amostras foram previamente preparadas para a execução do ensaio. As amostras foram embebidas em resina de epóxido e cortados numa serra de disco arrefecida a água para permitir a análise da secção transversal dos compósitos

A análise ótica SEM foi efetuada com o objetivo de conhecer a dispersão das fibras e do polímero após a produção das fitas. As fitas utilizadas para esta análise são constituídas por FC/PET e FC/rPET.

Na análise realizada às fitas produzidas com PET e fibras de carbono é possível observar as zonas impregnadas e as zonas que possuem menor teor de polímero. Na Figura 51 e na Figura 52 é apresentada essa amostra com ampliações diferentes. Esta análise pelo SEM permite verificar que o objetivo de impregnação das fitas pré-impregnadas é cumprido e que a consistência das mesmas é mantida.

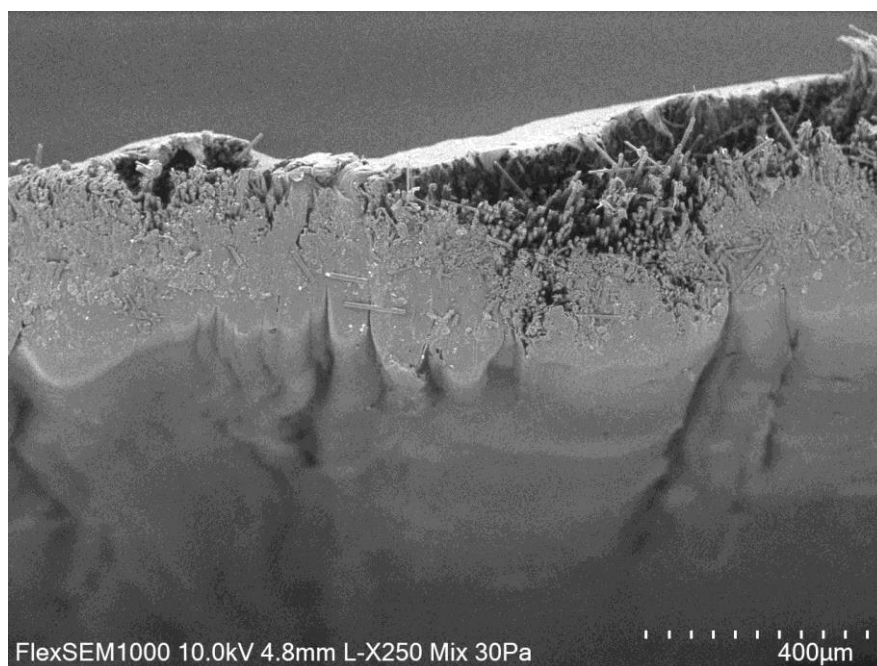


Figura 51 Fita pré-impregnada FC/PET (Ampliação 400 μm)

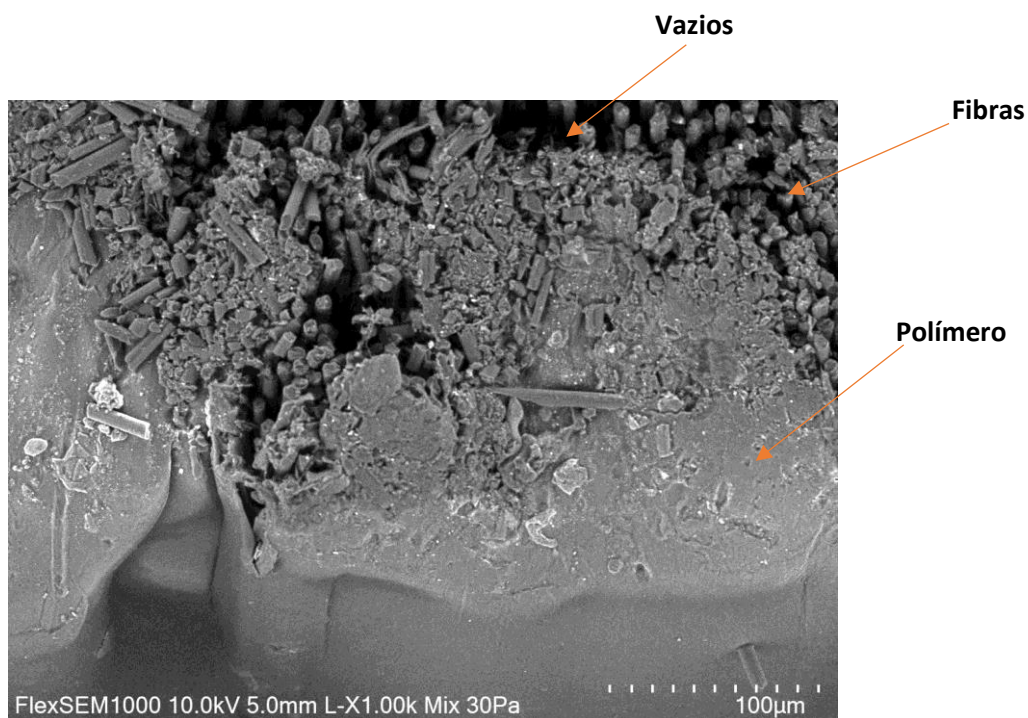


Figura 52 Fita pré-impregnada FC/PET (Ampliação 100 μm)

No caso das Fitas produzidas com rPET e Fibras de Carbono é possível observar comportamento semelhante às fitas produzidas com PET, como se pode observar na Figura 53 e na Figura 54, às mesmas ampliações. É de notar que o comportamento do polímero é diferente e que apesar da boa impregnação das fitas este se acumula mais nas extremidades e não tão homogeneamente como nas fitas produzidas com PET.

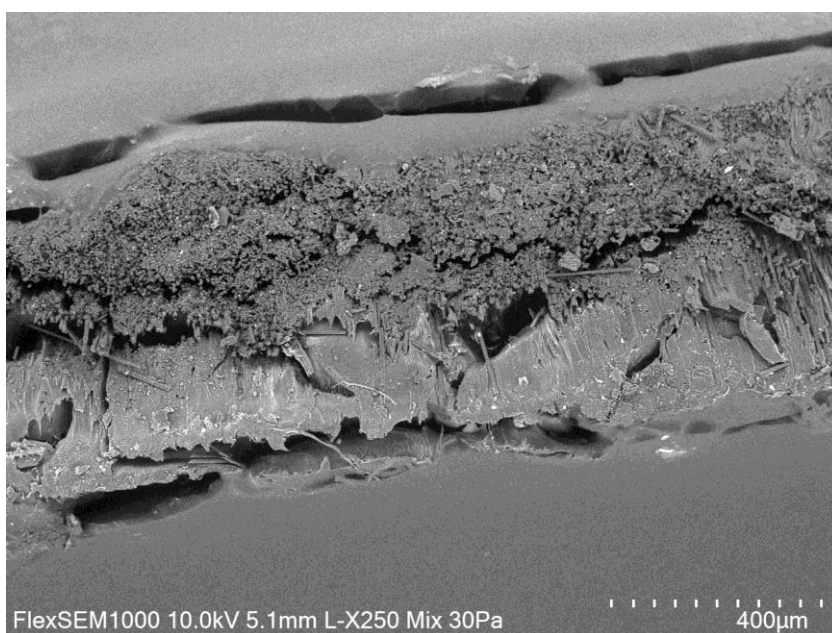


Figura 53 Fita pré-impregnada FC/rPET (Ampliação 400 μm)

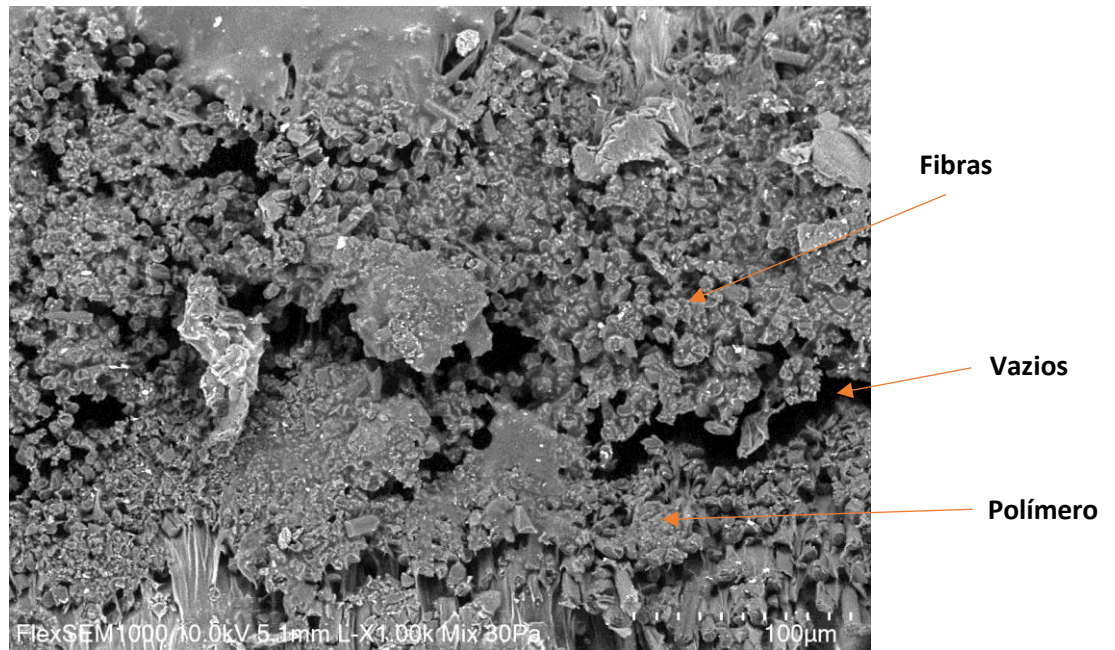


Figura 54 Fita pré-impregnada FC/rPET (Ampliação 100 µm)

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusões

Nesta dissertação procedeu-se ao fabrico de pré-impregnados sob forma de fita, reforçados com fibras de carbono, e de matriz em Polietileno Tereftalato (PET), de primeira utilização e também reciclada. Estas fitas pré-impregnadas foram depois processadas por compressão a quente, após serem tecidas manualmente.

A transformação destas fitas foi realizada numa prensa de pratos quentes, utilizando um transdutor linear para avaliar a consolidação do material processado.

Finalmente, foi efetuada uma afinação de parâmetros durante o processamento das fitas obtidas, com o objetivo de obter as melhores propriedades possíveis no material final.

As principais conclusões resultantes do estudo realizado são as apresentadas:

1. A impregnação por fusão é uma tecnologia que permite a produção de um pré-impregnado de matriz termoplástica, podendo atingir velocidades de processo compatíveis com produções a nível industrial. Além disso, equipamento, de simples funcionamento, permite a produção de fitas pré-impregnadas com boas características.
2. Durante o fabrico das fitas pré-impregnadas, verificam-se dificuldades em reduzir convenientemente a viscosidade do polímero para impregnar as fibras de carbono. A maior viscosidade dos termoplásticos foi contrabalançada com o desenvolvimento da pressão na matriz.
3. Relativamente à moldação por compressão a quente, verificou-se que os parâmetros utilizados permitiram uma boa consolidação dos laminados, como foi observado pelas curvas de consolidação, pela microscopia eletrónica de varrimento, e também pela relação entre os resultados experimentais e teóricos apresentados.. A versatilidade das fitas pré-impregnadas permite a produção de peças com formas mais complexas.
4. A realização dos ensaios TGA permitiu a definição da janela de processamento dos polímeros.
5. Os ensaios MFI permitiram conhecer melhor a viscosidade do polímero, e a sua variação, durante processamento.
6. Os ensaios de tração e flexão permitiram concluir que os compósitos de matriz reciclada têm propriedades adequadas para uso estrutural.
7. O modelo de consolidação permite obter uma aproximação das curvas teóricas às experimentais, de forma a otimizar tempos de processo para as especificações definidas.

5.2 Trabalhos futuros

Com o objetivo de dar continuidade ao trabalho desenvolvido e aqui apresentado, são propostos os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

1. Incorporação de resíduos de polímero não tratados no fabrico de fitas. Uma experiência específica deveria ser a utilização de garrafas de plástico em fim de vida, e colocar diretamente no equipamento para fabricar uma fita pré-impregnada.
2. Estudo da incorporação de fitas pré-impregnadas em diferentes técnicas de processamento como o enrolamento de filamentar.
3. Estudo mais profundo das características térmicas dos polímeros reciclados para melhor escolha de parâmetros no processamento dos mesmos.
4. Otimização da moldagem por compressão a quente através da análise de novos materiais e parâmetros na consolidação de laminados produzidos com fitas pré-impregnadas.
5. Aplicação das fitas pré-impregnadas em processos de consolidação como a pultrusão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Zanin and S. Donnini Mancini, *Resíduos plásticos e reciclagem*, 2nd ed. 2015.
- [2] A. Morais, A. Magalhães, and M. de Moura, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, 2ª Edição. PUBLINDUSTRIA, 2009.
- [3] D. Hull and T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*, 2ND ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [4] R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, and A. Elharfi, "Polymer composite materials: A comprehensive review," *Composite Structures*, vol. 262. Elsevier Ltd, Apr. 15, 2021. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113640.
- [5] B. Harris, "ENGINEERING COMPOSITE MATERIALS," London, 1999.
- [6] P. Vosynek, T. Navrat, M. Pec, J. Pořízka, and P. Diviš, "How the Decrease of Collagen or Mineral Affect the Fracture in the Turkey Long Bones," *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, vol. 12, pp. 1753–1756, Dec. 2014.
- [7] Valentina Grumezescu, *Materials for Biomedical Engineering*. Elsevier, 2019. doi: 10.1016/C2017-0-04394-X.
- [8] Enrique. Saldivar-Guerra and Eduardo. Vivaldo-Lima, "THERMOSETTING POLYMERS," in *Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing.*, New jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013, p. 658.
- [9] K. L. Forsdyke and T. F. Starr, *Thermoset Resins Market Report*. iSmithers Rapra Publishing, 2002. [Online]. Available: <http://www.rapra.net>
- [10] M. Biron, *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*, 3rd ed. 2012.
- [11] R. B. G. VALT, "ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE EMBALAGENS DE PET, DE ALUMÍNIO E DE VIDRO PARA REFRIGERANTES NO BRASIL VARIANDO A TAXA DE RECICLAGEM DOS MATERIAIS," UFPR UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA, Curitiba, 2004.
- [12] D. K. Rajak, D. D. Pagar, R. Kumar, and C. I. Pruncu, "Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 6354–6374, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.09.068.
- [13] Y. X. Gan, D. Solomon, and M. Reinbolt, "Friction stir processing of particle reinforced composite materials," *Materials*, vol. 3, no. 1, pp. 329–350, 2010, doi: 10.3390/ma3010329.
- [14] R. Casati and M. Vedani, "Metal matrix composites reinforced by Nano-Particles—A review," *Metals*, vol. 4, no. 1. MDPI AG, pp. 65–83, Mar. 01, 2014. doi: 10.3390/met4010065.

- [15] M. E. Smagorinski, P. G. Tsantrizos, S. Grenier, A. Cavašin, T. Brzezinski, and G. Kim, "The properties and microstructure of Al-based composites reinforced with ceramic particles," 1998.
- [16] S. Gopalakrishnan and N. Murugan, "Production and wear characterisation of AA 6061 matrix titanium carbide particulate reinforced composite by enhanced stir casting method," *Compos B Eng*, vol. 43, no. 2, pp. 302–308, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.08.049.
- [17] J. S. Jayan, S. Appukuttan, R. Wilson, K. Joseph, G. George, and K. Oksman, "1 - An introduction to fiber reinforced composite materials," in *Fiber Reinforced Composites*, K. Joseph, K. Oksman, G. George, R. Wilson, and S. Appukuttan, Eds., in Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, 2021, pp. 1–24. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821090-1.00025-9>.
- [18] S. Dixit, R. Goel, A. Dubey, and T. Bhalavi, "Natural Fibre Reinforced Polymer Composite Materials-A Review," *Polymers from Renewable Resources*, vol. 8, no. 2, Jan. 2017.
- [19] H. G. Kotik, "Natural fibers and composite materials reinforced with natural fibers: The motivation for their research and development," *Revista Materia*, vol. 24, no. 3. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019. doi: 10.1590/s1517-707620190003.0801.
- [20] I. M. Daniel and Ori. Ishai, *Engineering mechanics of composite materials*, 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2006.
- [21] F. R. Jones and N. T. Huff, "The structure and properties of glass fibers," in *Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres*, Elsevier, 2018, pp. 757–803. doi: 10.1016/B978-0-08-101272-7.00019-5.
- [22] P. Antequera, L. Jimenez, and A. Miravete, "Los Materiales Compuestos de Fibra de Vidrio ," *Secretariado de Publicaciones, Univ. Zaragoza*, 1992.
- [23] T. P. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, and J. Naveen, "Glass fiber-reinforced polymer composites - A review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, no. 13. SAGE Publications Ltd, pp. 1258–1275, 2014. doi: 10.1177/0731684414530790.
- [24] J.-M. Berthelot, *Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures*, 2e édition. in Recherche en mécanique. Paris: Masson, 1996.
- [25] X. Huang, "Fabrication and properties of carbon fibers," *Materials*, vol. 2, no. 4. pp. 2369–2403, 2009. doi: 10.3390/ma2042369.
- [26] M. L. Minus and S. Kumar, "The Processing, Properties, and Structure of Carbon Fibers:," Feb. 2005.
- [27] V. Vara Prasad and S. Talupula, "A Review on Reinforcement of Basalt and Aramid (Kevlar 129) fibers," *Mater Today Proc*, vol. 5, pp. 5993–5998, 2018, [Online]. Available: www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings

- [28] M. W. Benfer, E. Baur, R. ProzeBgestaltung, B. David Tanner, J. A. Fitzgerald, and B. R. Phillips, "The Kevlar Story-an Advanced Materials Case Study Process Development High Performance Fibers High Impact Composites Rigid-Rod Polymers," 1988.
- [29] T. Whelan and J. Goff, *Molding of Thermosetting Plastics*. Springer US, 1990. doi: 10.1007/978-1-4615-9759-9.
- [30] J. M. Castro and E. J. Straus, "Monitoring Cure in Sheet Molding Compound Processing," *Polym Eng Sci*, vol. 29, no. 5, pp. 308–314, 1989.
- [31] O. C. Zaske and S. H. Goodman, "Unsaturated Polyester and Vinyl Ester Resins," in *Handbook of Thermoset Plastics*, 2nd ed.1998.
- [32] C. H. Park and W. I. Lee, "Polymer Matrix Composites: Fundamentals," in *Comprehensive Composite Materials II*, 2018.
- [33] M. Biron, "Glass Mat Reinforced Thermoplastic Thermoplastic Composites," in *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*, 3rd ed.2018.
- [34] "Prepregs-raw material for high-performance composites," *REINFORCEDplastics*, 2002.
- [35] P. D. Mangalgi, "Composite materials for aerospace applications," *Bull. Mater. Sci*, vol. 22, no. 3, pp. 657–664, 1999.
- [36] C. D. Wingard, "Characterization of prepreg and cured epoxy/®berglass composite material for use in advanced composite piping systems," *Thermochimica*, pp. 293–301, 2000.
- [37] P. Esfandiari, J. F. Silva, P. J. Novo, J. P. Nunes, and A. T. Marques, "Production and processing of pre-impregnated thermoplastic tapes by pultrusion and compression moulding," *J Compos Mater*, vol. 56, no. 11, pp. 1667–1676, Jun. 2022, doi: 10.1177/00219983221083841.
- [38] J. Silva, "PRÉ-IMPREGNADOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA: FABRICO E TRANSFORMAÇÃO POR COMPRESSÃO A QUENTE E ENROLAMENTO FILAMENTAR," Faculdade de Engenharia do Porto Universidade do Porto, Porto, 2005.
- [39] H. Xiong, N. Hamila, and P. Boisse, "Consolidation modeling during thermoforming of thermoplastic composite prepregs," *Materials*, vol. 12, no. 18, Sep. 2019, doi: 10.3390/ma12182853.
- [40] J. P. Nunes *et al.*, "Production of Thermoplastic Towpregs and Towpreg-Based Composites," in *Polymer Composites: from Nano- to Macroscale*, pp. 189–213.
- [41] F. W. J. Van Hattum, J. P. Nunes, and C. A. Bernardo, "A theoretical and experimental study of new towpreg-based long fibre thermoplastic composites," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 36, no. 1, pp. 25–32, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.06.031.
- [42] P. Esfandiari, "Production and Processing of Pre-impregnated Thermoplastic Composites," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.

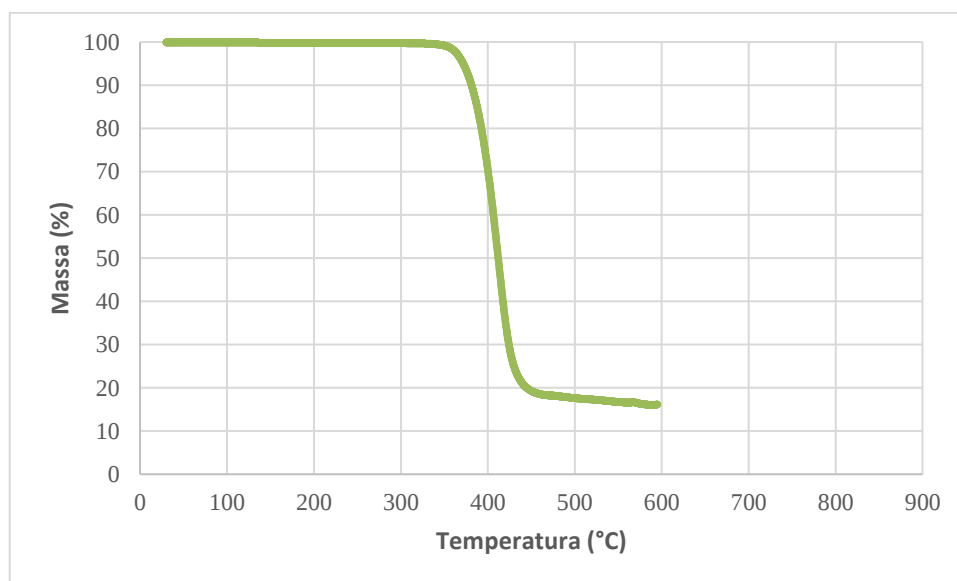
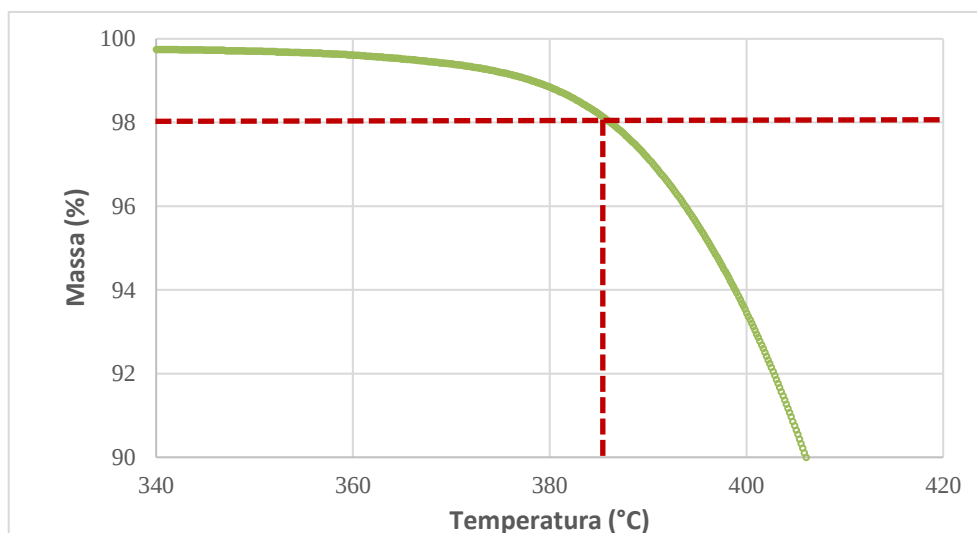
- [43] J. P. Nunes, J. F. Silva, P. J. Novo, and A. T. Marques, "Processing conditions and properties of continuous fiber reinforced GF/PP thermoplastic matrix composites manufactured from different pre-impregnated materials," *Canadian Association for Composite Structures and Materials (CAC SMA)*, 2013.
- [44] J. P. Nunes, J. Silva, A. Marques, N. Crainic, and S. Cabral-Fonseca, "Production of Powder-Coated Towpregs and Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials - J THERMOPLAST COMPOS MATER*, vol. 16, pp. 231–248, Jun. 2003, doi: 10.1177/0892705703016003003.
- [45] M. Valente, I. Rossitti, and M. Sambucci, "Different Production Processes for Thermoplastic Composite Materials: Sustainability versus Mechanical Properties and Processes Parameter," *Polymers*, vol. 15, no. 1. MDPI, Jan. 01, 2023. doi: 10.3390/polym15010242.
- [46] K. Minchenkov, A. Vedernikov, A. Safonov, and I. Akhatov, "Thermoplastic Pultrusion: A Review," 2021, doi: 10.3390/polym.
- [47] A. Ramasamy, Y. Wang, and J. Muzzy, "Braided thermoplastic composites from powder-coated towpregs. Part I: Towpreg characterization," *Polym Compos*, vol. 17, no. 3, pp. 497–504, 1996, doi: 10.1002/pc.10639.
- [48] B. R. Souza, R. M. Di Benedetto, D. Hirayama, O. De Andrade Raponi, L. C. M. Barbosa, and A. C. A. Juniora, "Manufacturing and characterization of jute/PP thermoplastic commingled composite," in *Materials Research*, Universidade Federal de Sao Carlos, 2017, pp. 466–471. doi: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0104.
- [49] N. Wiegand and E. Mäder, "Commingled yarn spinning for thermoplastic/glass fiber composites," *Fibers*, vol. 5, no. 3, Sep. 2017, doi: 10.3390/fib5030026.
- [50] K. Yassin and M. Hojjati, "Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods: A review," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 31, no. 12. SAGE Publications Ltd, pp. 1676–1725, Dec. 01, 2018. doi: 10.1177/0892705717738305.
- [51] G. Clancy, D. Peeters, R. M. O'Higgins, and P. M. Weaver, "In-line variable spreading of carbon fibre/thermoplastic pre-preg tapes for application in automatic tape placement," *Mater Des*, vol. 194, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108967.
- [52] M. A. Khan, P. Mitschang, and R. Schledjewski, "Parametric study on processing parameters and resulting part quality through thermoplastic tape placement process," *J Compos Mater*, vol. 47, no. 4, pp. 485–499, Feb. 2013, doi: 10.1177/0021998312441810.
- [53] A. Vedernikov *et al.*, "Effects of the Pre-Consolidated Materials Manufacturing Method on the Mechanical Properties of Pultruded Thermoplastic Composites," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 11, Jun. 2022, doi: 10.3390/polym14112246.
- [54] M. H. Akonda, D. U. Shah, and R. H. Gong, "Natural fibre thermoplastic tapes to enhance reinforcing effects in composite structures," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 131, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105822.

- [55] X. Gabrion, V. Placet, F. Trivaudey, and L. Boubakar, "About the thermomechanical behaviour of a carbon fibre reinforced high-temperature thermoplastic composite," *Compos B Eng*, vol. 95, pp. 386–394, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.03.068.
- [56] S. Tumkor, N. Turkmen", C. Chassapis, S. Manoochehri, J. P. Hartnett, and W. J. Minkowycz, "MODELING OF HEAT TRANSFER IN THERMOPLASTIC COMPOSITE TAPE LAY-UP MANUFACTURING," *Pergamon Int. Comm. Heat Mass Transfer*, vol. 28, no. 1, pp. 49–58, 2001.
- [57] K. Minchenkov, A. Vedernikov, A. Safonov, and I. Akhatov, "Thermoplastic Pultrusion: A Review," 2021, doi: 10.3390/polym.
- [58] J. Silva, J. P. Nunes, and A. Marques, "Consolidation of Glass Fibre-Polypropylene Towpregs by Compression Moulding," *Materials Science Forum*, vol. 514–516, pp. 677–681, Jun. 2006, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.514-516.677.
- [59] M. Bar, R. Alagirusamy, and A. Das, "Properties of flax-polypropylene composites made through hybrid yarn and film stacking methods," *Compos Struct*, vol. 197, pp. 63–71, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.04.078.
- [60] P. Ouagne, L. Bizet, C. Baley, and J. Bréard, "Analysis of the film-stacking processing parameters for PLLA/flax fiber biocomposites," *J Compos Mater*, vol. 44, no. 10, pp. 1201–1215, May 2010, doi: 10.1177/0021998309349019.
- [61] M. K. Eriksen, J. D. Christiansen, A. E. Daugaard, and T. F. Astrup, "Closing the loop for PET, PE and PP waste from households: Influence of material properties and product design for plastic recycling," *Waste Management*, vol. 96, pp. 75–85, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.07.005.
- [62] Damayanti and H. S. Wu, "Strategic possibility routes of recycled pet," *Polymers*, vol. 13, no. 9. MDPI AG, 2021. doi: 10.3390/polym13091475.
- [63] W. Cantwell, "The Fracture Behavior of Glass Fiber/Recycled PET Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 18, 1999.
- [64] R. Zhang *et al.*, "PET bottles recycling in China: An LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles," *J Environ Manage*, vol. 260, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.110062.

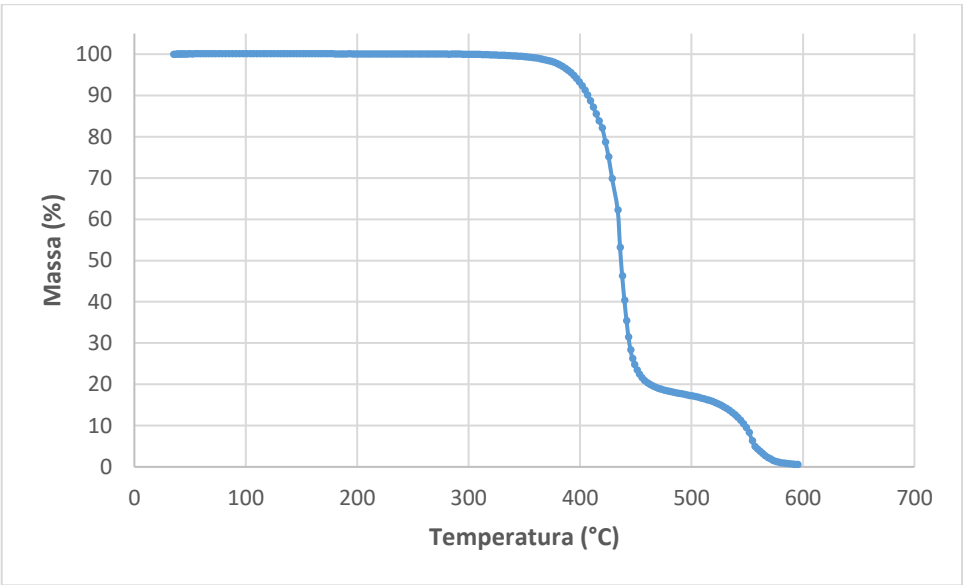
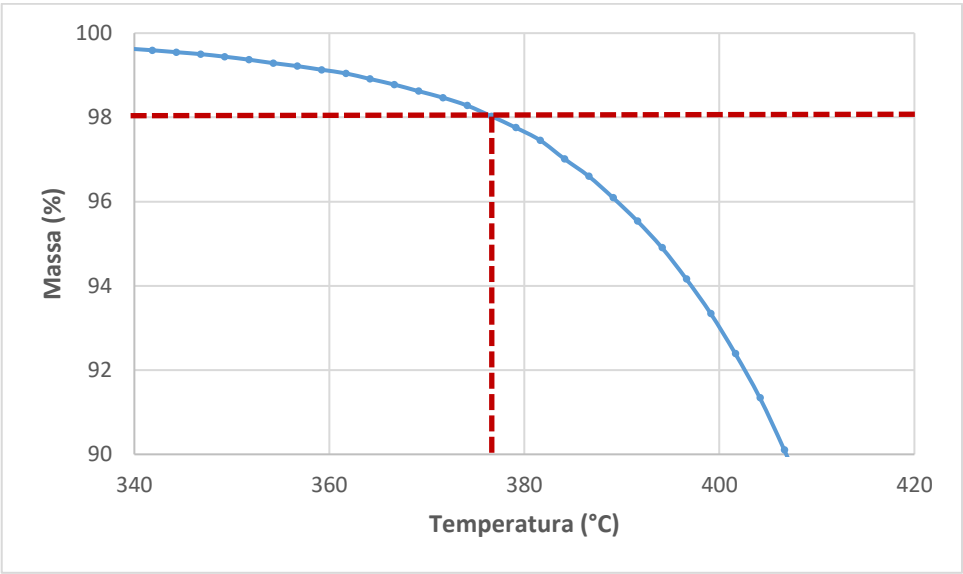
APÊNDICES

Apêndice A – Análise Termogravimétrica (TGA)

PET



rPET



Apêndice B - Resultados Índice de fluidez do material (MFI)

Resultados MFI PET

Teste	Amostra	Massa(g)	MFI (g/10min)	MFI (g/10min)	Desvio padrão (g/10min)
1	1	2,0646	82,584		
	2	1,9216	76,864	79,092	3,06
	3	1,9457	77,828		
2	1	0,9858	39,432		
	2	1,2308	49,232	45,968	5,66
	3	1,231	49,240		
3	1	1,2226	48,904		
	2	0,9033	36,132	44,717	7,44
	3	1,2279	49,116		
4	1	0,7391	29,564		
	2	0,5283	21,132	28,403	6,77
	3	0,8628	34,512		
5	1	1,8001	72,004		
	2	1,7044	68,176	69,193	2,46
	3	1,685	67,400		
6	1	2,0646	82,584		
	2	1,9216	76,864	79,092	3,06
	3	1,9457	77,828		
				68,176	

Resultados MFI rPET

Teste	Amostra	Massa(g)	MFI (g/10min)	MFI (g/10min)	Desvio padrão (g/10min)
1	1	0,9132	36,528		
	2	1,0010	40,040	36,408	3,69
	3	0,8164	32,656		
2	1	0,8881	35,524		
	2	1,0546	42,184	40,219	4,08
	3	1,0737	42,948		
3	1	0,8100	32,400		
	2	0,8213	32,852	33,056	0,78
	3	0,8479	33,916		
4	1	1,2107	48,428		
	2	1,1083	44,332	45,080	3,04
	3	1,0620	42,480		
5	1	1,1461	45,844		
	2	0,8880	35,520	43,691	7,33
	3	1,2427	49,708		
6	1	1,0737	42,948		
	2	1,170	46,800	42,491	3,39
	3	0,943	37,724		
				40,157	

Apêndice C – Fração mássica de fibras das fitas pré-impregnadas

Fitas	Amostra	Massa(g)	Massa de fibras (g)	Fração mássica de fibras (%)
FC/PET	1	3,7836		
	2	3,9709	1,64	41,80
	3	4,0251		
FC/ rPET	1	8,9298		
	2	9,0812	1,64	18,39
	3	8,7437		

Apêndice D – Resultados dos ensaios de Calcinação

Teste	Amostra	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	w _i (%)
FC/ PET (2,5MPa)	1	20,1813	23,4578	21,3985	39,8
	2	19,0065	22,7284	20,5847	
	3	20,6819	23,446	21,7864	
FC/PET (5,0MPa)	1	16,7248	19,6533	17,8774	42,3
	2	20,7806	23,6123	22,0113	
	3	19,0511	22,9155	20,7589	
FC/ rPET (2,5MPa)	1	20,1736	23,8327	21,7143	43,7
	2	16,7079	19,2985	17,9433	
	3	20,7733	22,9089	21,6571	
FC /rPET (5,0MPa)	1	19,0403	21,0595	19,9467	46,3
	2	19,000	21,2400	20,0106	
	3	20,6745	23,5842	22,0947	

Apêndice E – Dimensão dos provetes a ensaiar

PLACA FC/PET (2,5 MPa) - Ensaio de tração

	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
1	26,05	2,22	26,99	2,31
	27,08	2,32		
	27,63	2,42		
2	24,45	2,95	24,96	2,95
	25,18	3,09		
	25,15	2,84		
3	25,02	2,63	24,80	2,64
	24,91	2,61		
	24,37	2,66		
4	24,80	2,78	24,58	2,83
	24,55	2,96		
	24,46	2,79		

Ensaio de Flexão

	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
1	20,22	2,4	20,33	2,41
	20,33	2,38		
	20,45	2,46		
2	21,08	2,19	21,10	2,25
	21,12	2,24		
	21,11	2,33		
3	25,3	2,1	24,9	2,19
	25	2,2		
	24,4	2,28		
4	29,92	2,43	23,67	2,43
	20,71	2,44		
	20,39	2,43		

Placa FC/PET (5,0 MPa)- Ensaios de tração

	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
	27,25	1,3		
1	27,56	1,46	27,59	1,35
	27,96	1,3		
	20,94	1,33		
2	20,64	1,41	20,72	1,33
	20,58	1,26		
	26,52	1,31		
3	26,65	1,45	26,66	1,34
	26,8	1,26		
	23,46	1,24		
4	24,22	1,32	24,23	1,29
	25,01	1,31		

Ensaios de Flexão

	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
	27,44	1,54		
1	27,58	1,21	27,48	1,33
	27,43	1,25		
	27,92	1,51		
2	27,74	1,49	27,89	1,41
	28,03	1,22		
	25,63	1,48		
3	25,71	1,35	25,65	1,35
	25,62	1,21		
	25,48	1,62		
4	25,36	1,41	25,45	1,46
	25,52	1,34		

Placa FC/rPET (2,5 MPa) - Ensaios de tração

	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
	21,34	0,73		
1	21,5	0,6	21,65	0,63
	22,12	0,57		
	23,99	0,63		
2	24,48	0,65	24,53	0,66
	25,11	0,71		
	25,66	0,7		
3	25,71	0,72	25,68	0,69
	25,66	0,64		
	24,69	0,64		
4	24,39	0,63	24,37	0,66
	24,02	0,72		

Ensaios de Flexão

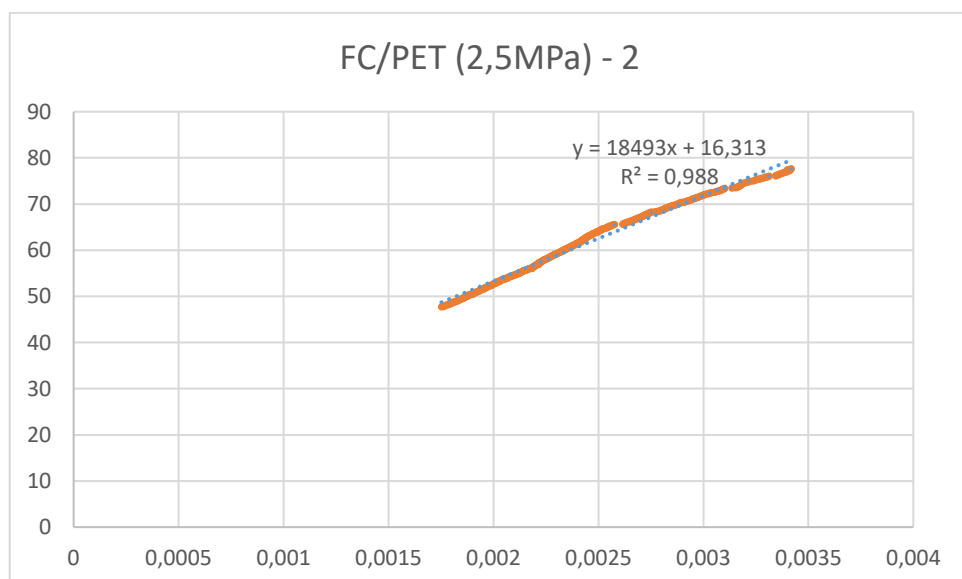
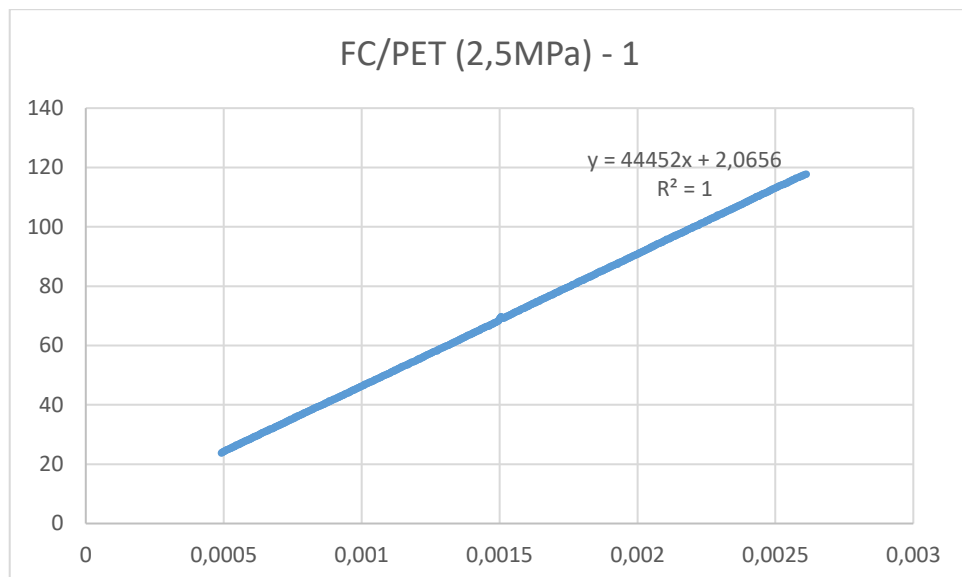
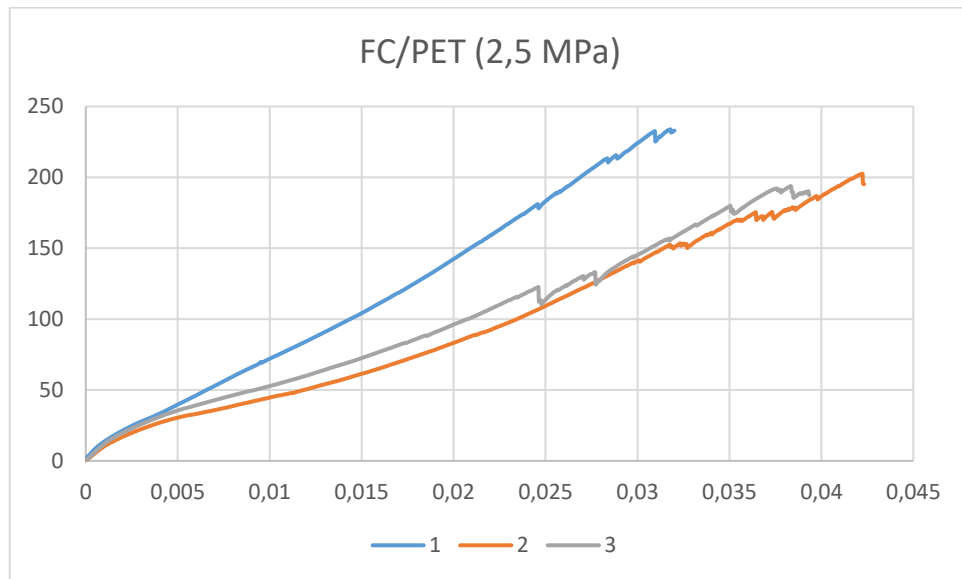
	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
	24,6	0,7		
1	24,69	0,66	24,61	0,68
	24,55	0,67		
	28,8	0,67		
2	28,56	0,67	28,65	0,66
	28,58	0,65		
	27,74	0,64		
3	27,77	0,69	27,81	0,69
	27,92	0,74		
	28,25	0,58		
4	28,17	0,64	28,10	0,65
	27,87	0,74		

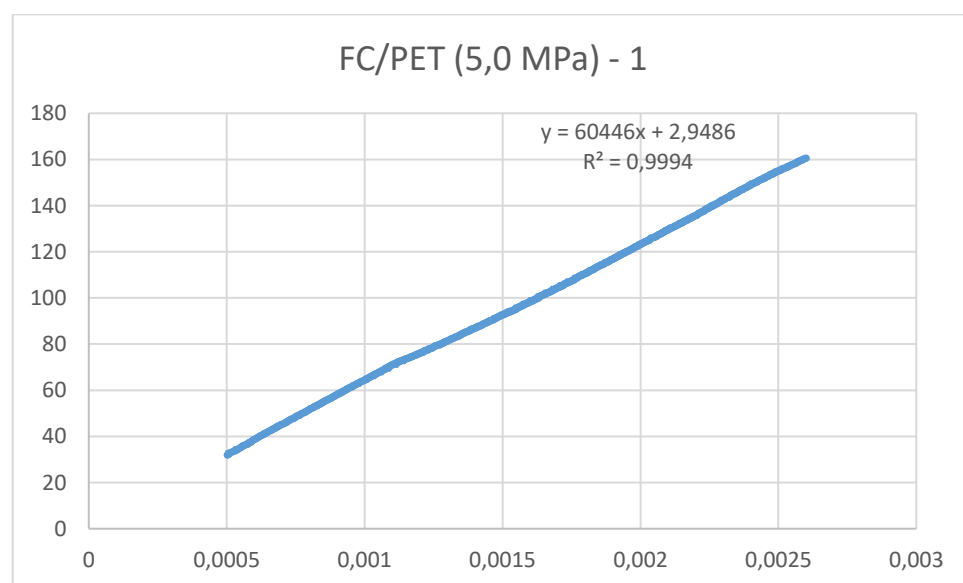
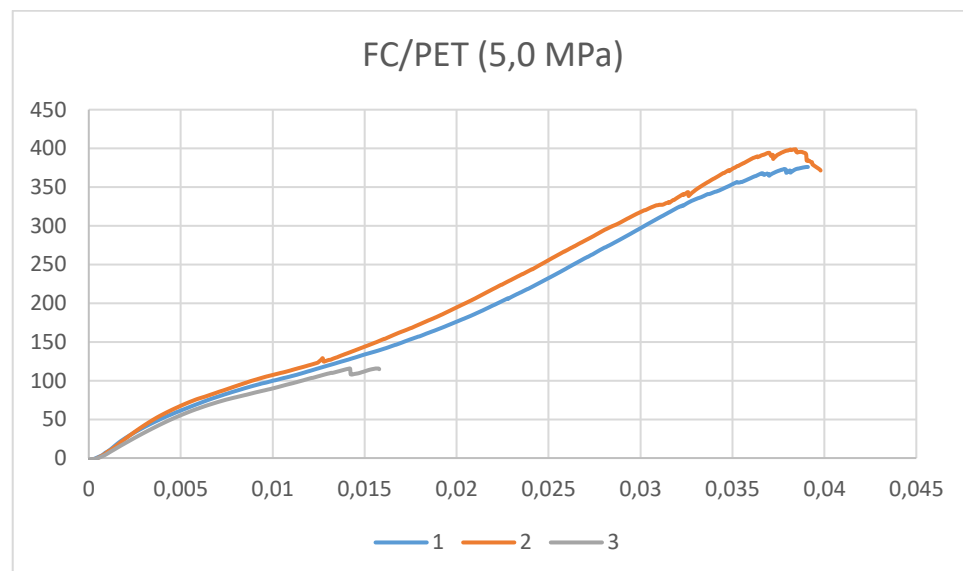
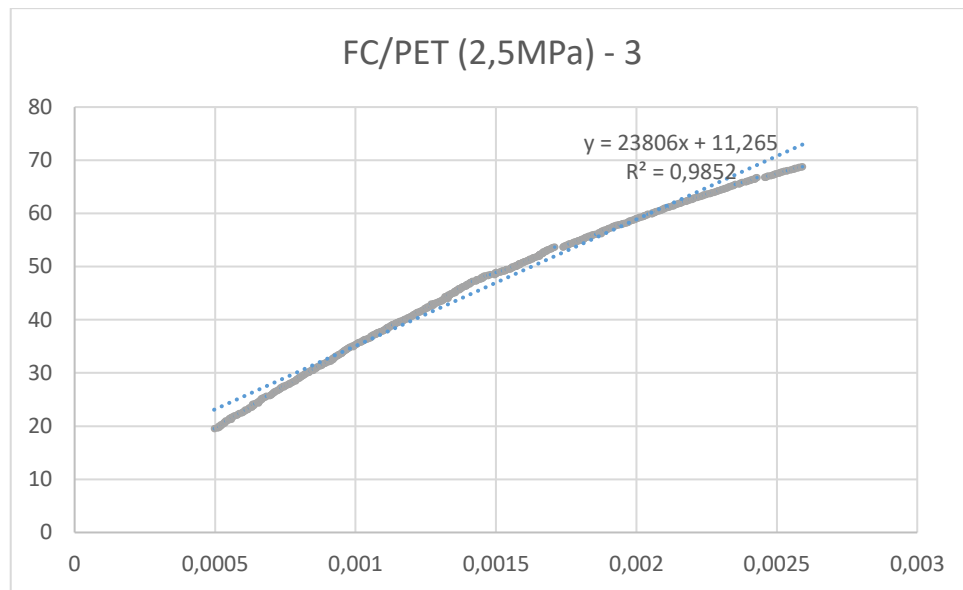
Placa FC/rPET (5,0 MPa) - Ensaio de tração

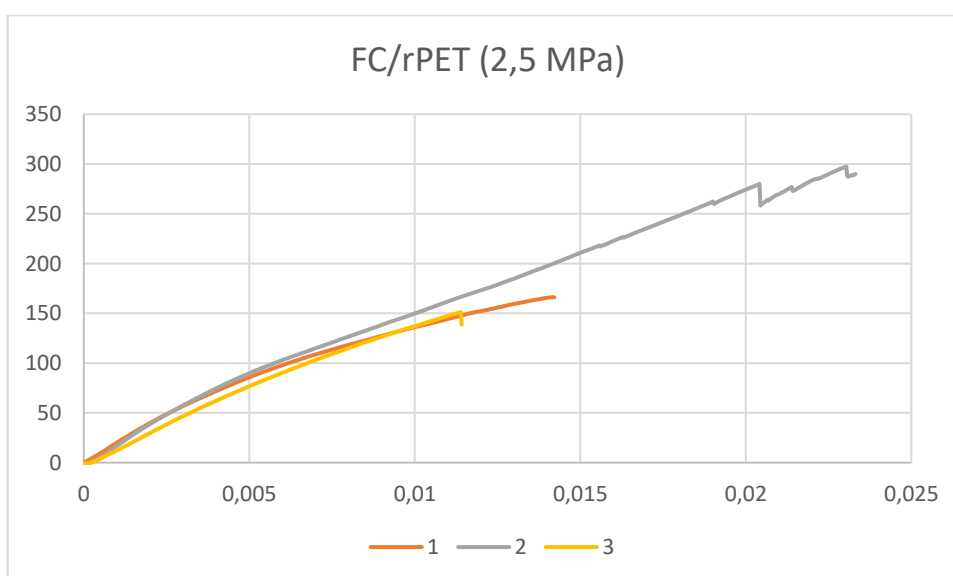
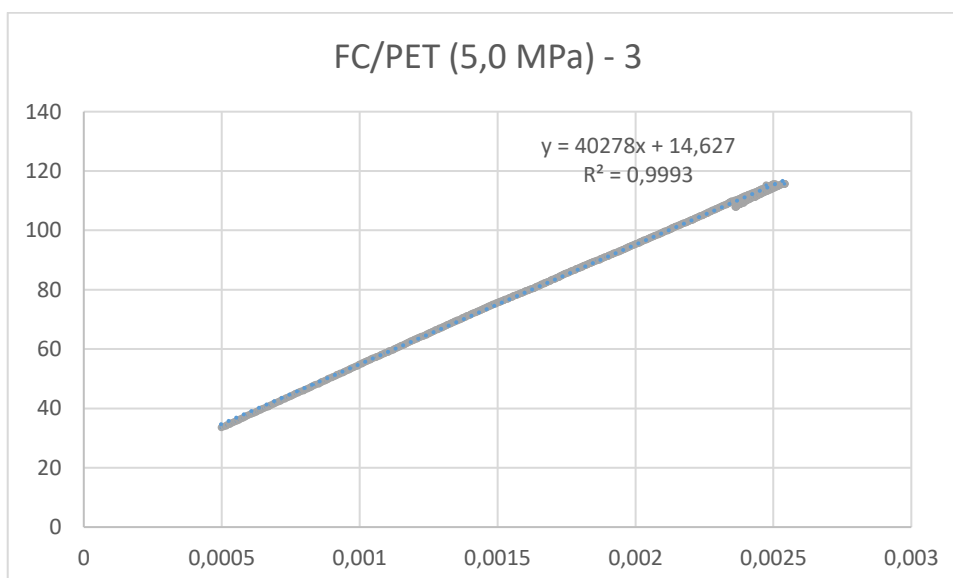
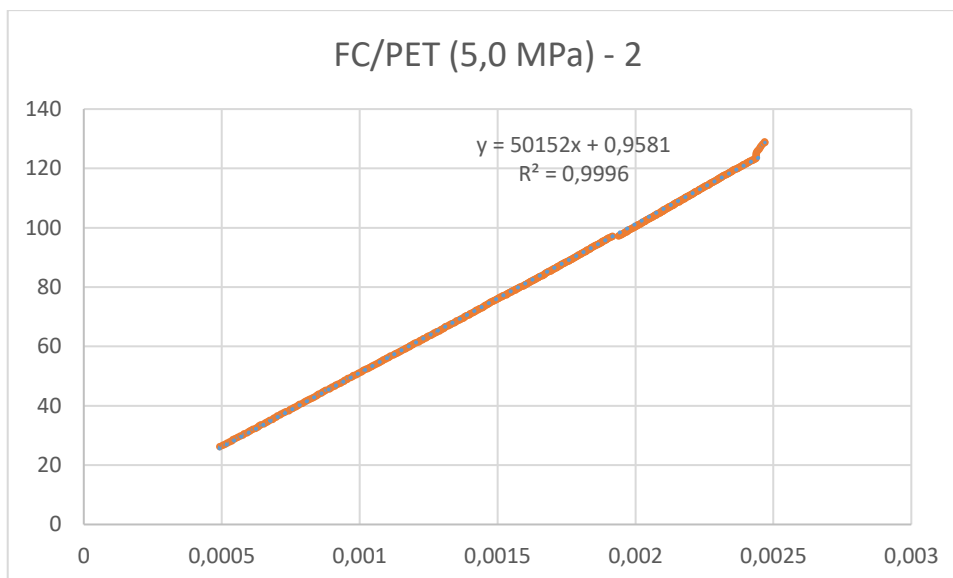
	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
	25,97	0,66		
1	25,28	0,65	25,38	0,67
	24,88	0,69		
	24,9	0,62		
2	24,42	0,63	24,65	0,64
	24,62	0,68		
	25,94	0,59		
3	25,09	0,58	25,04	0,60
	24,09	0,64		
	26,9	0,62		
4	27,45	0,71	27,38	0,72
	27,8	0,82		

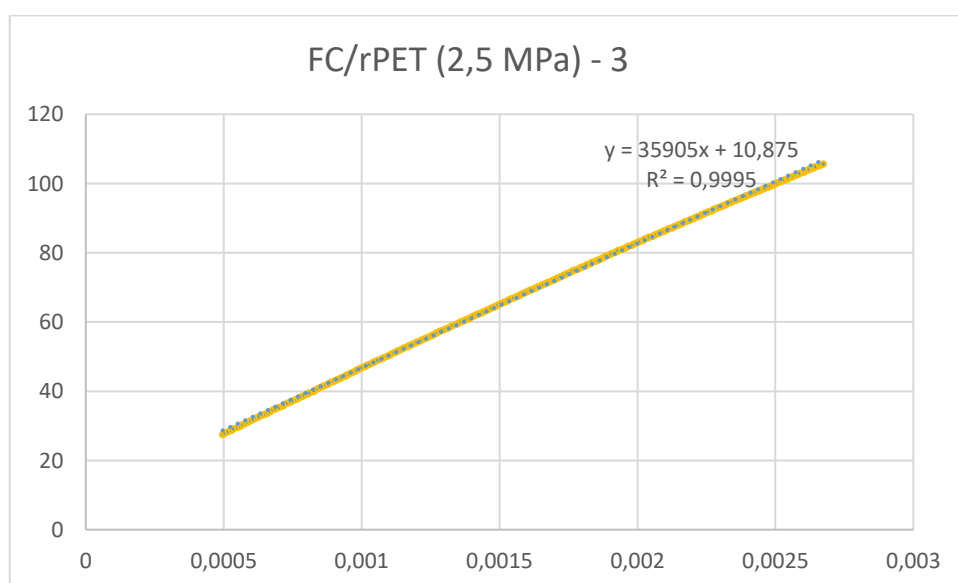
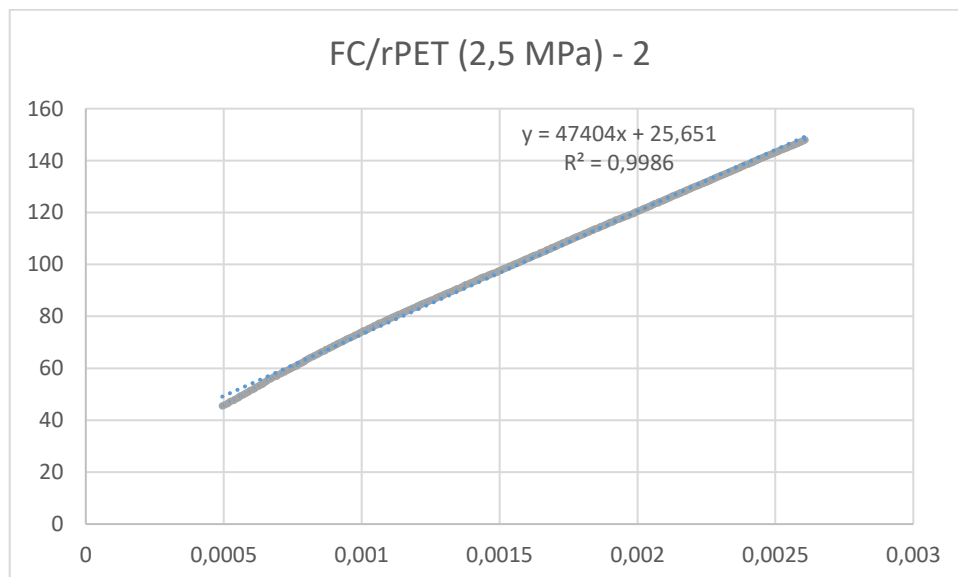
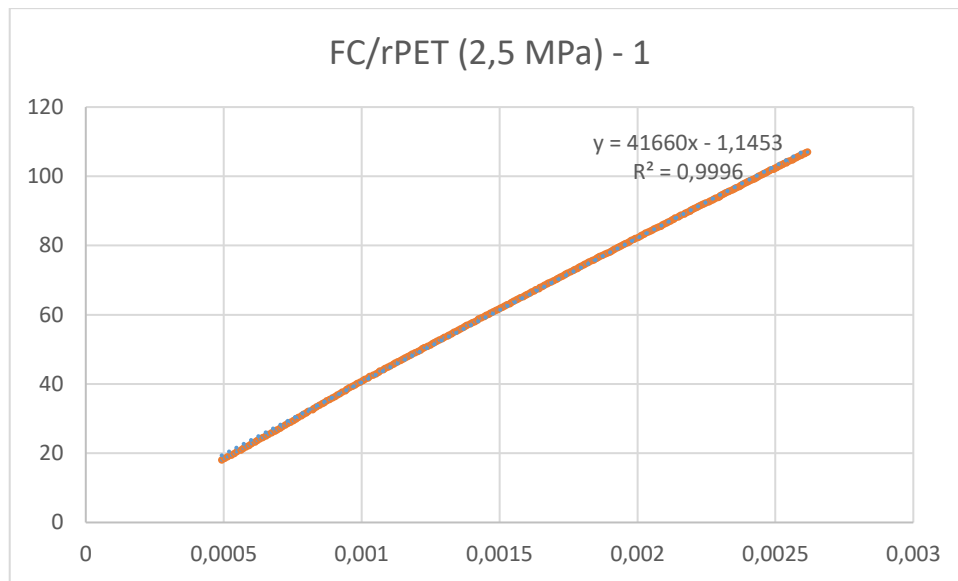
Ensaio de Flexão

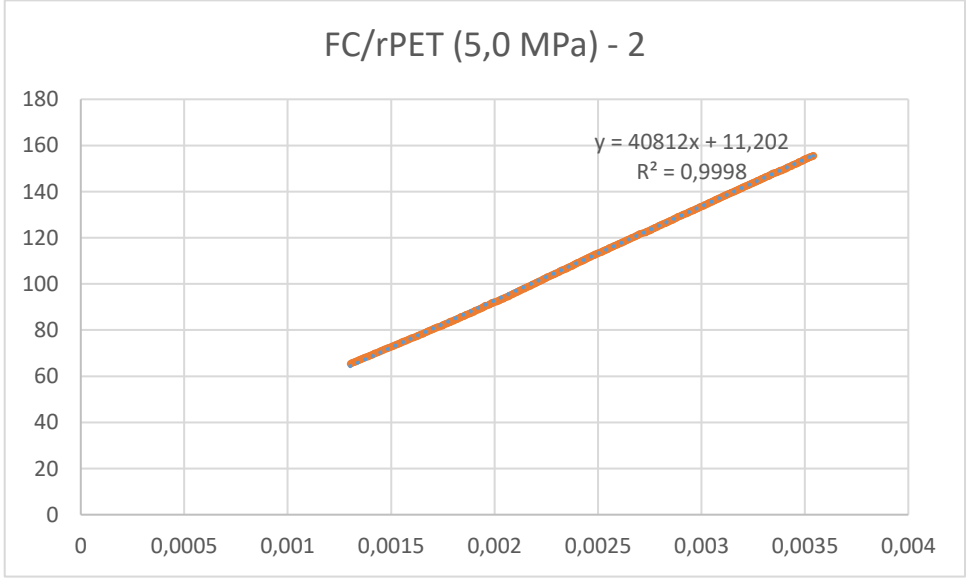
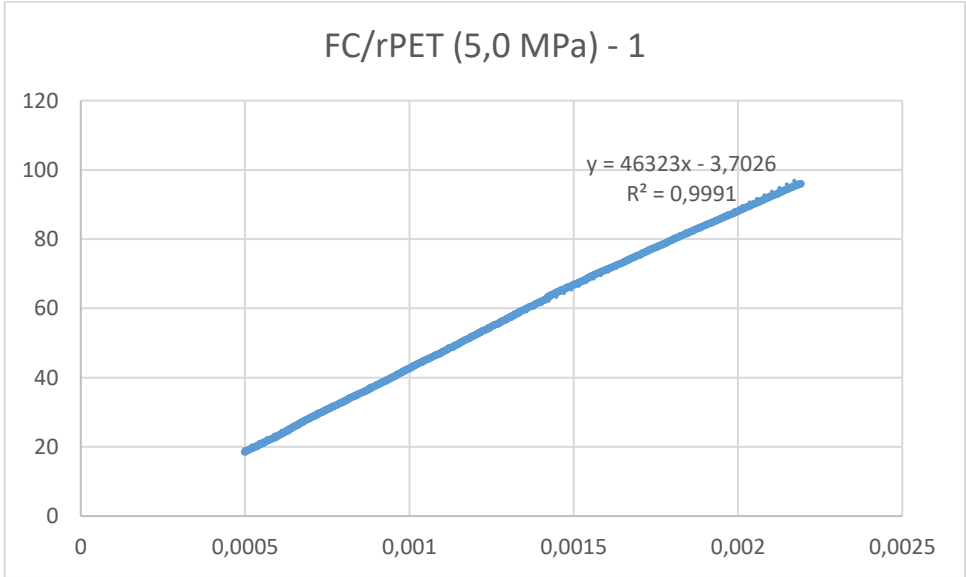
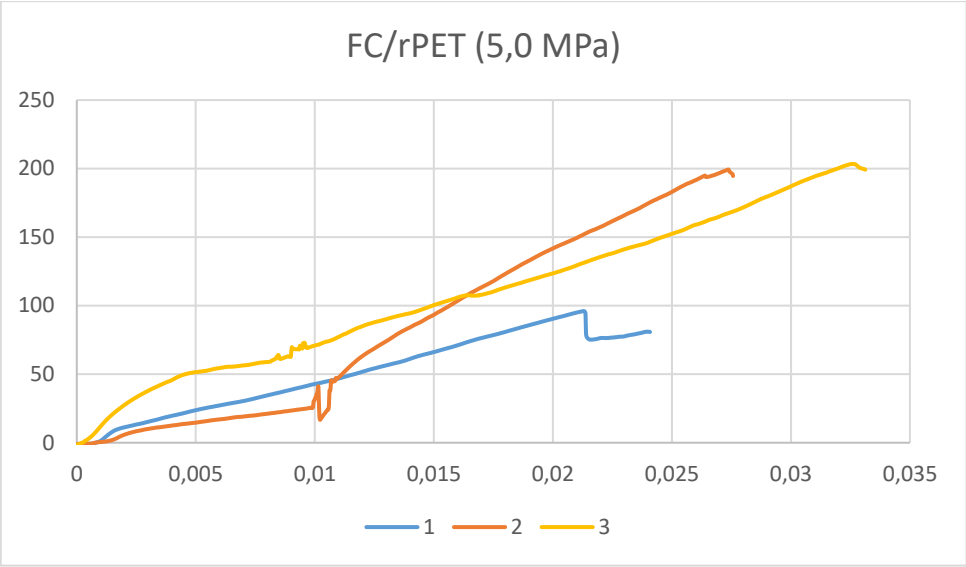
	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
	27,38	0,69		
1	27,57	0,59	27,54	0,62
	27,67	0,59		
	24,95	0,6		
2	25,03	0,62	25	0,62
	25,02	0,65		
	24,07	0,74		
3	23,72	0,7	23,8	0,68
	23,61	0,61		
	24,75	0,62		
4	24,67	0,62	24,67	0,63
	24,59	0,64		

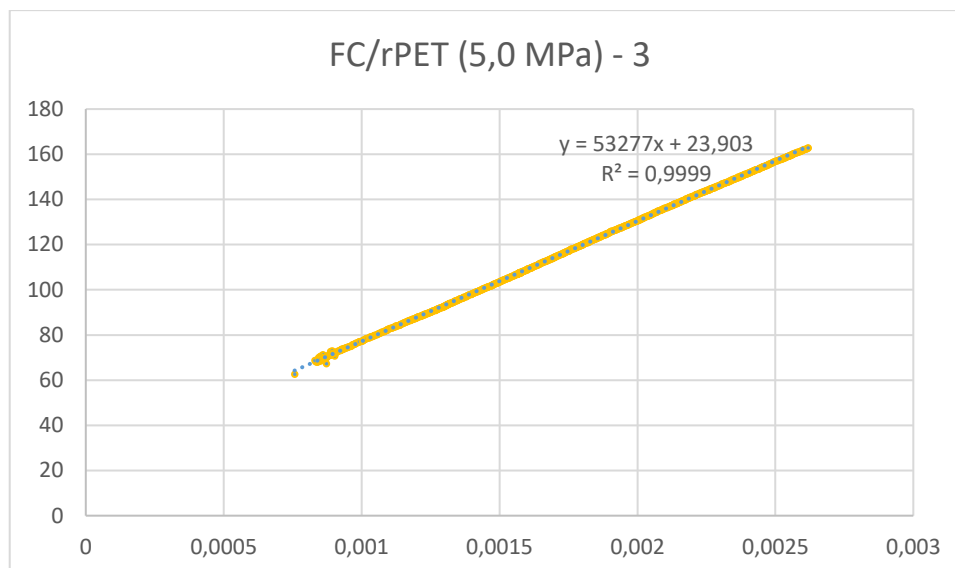
Apêndice F – Resultados dos ensaios de tração



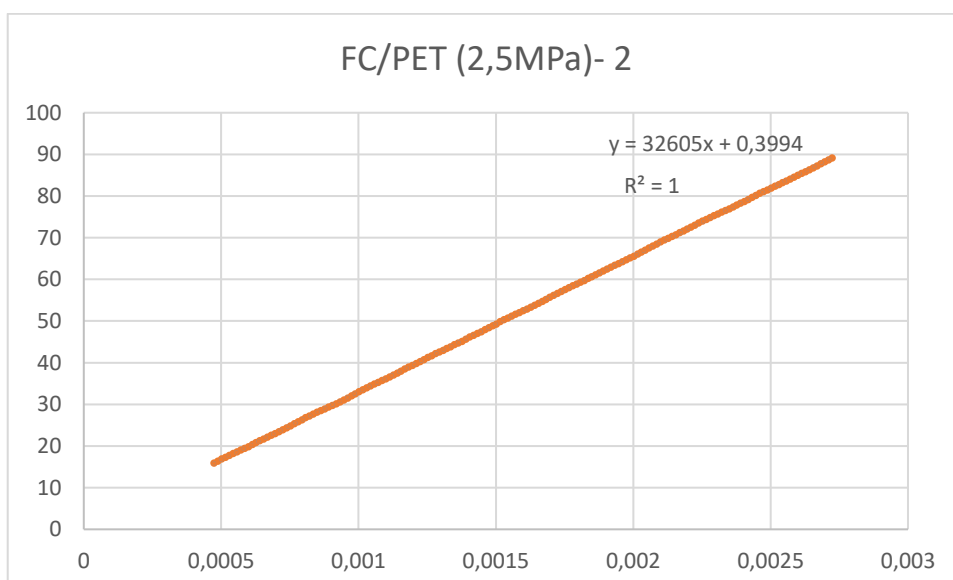
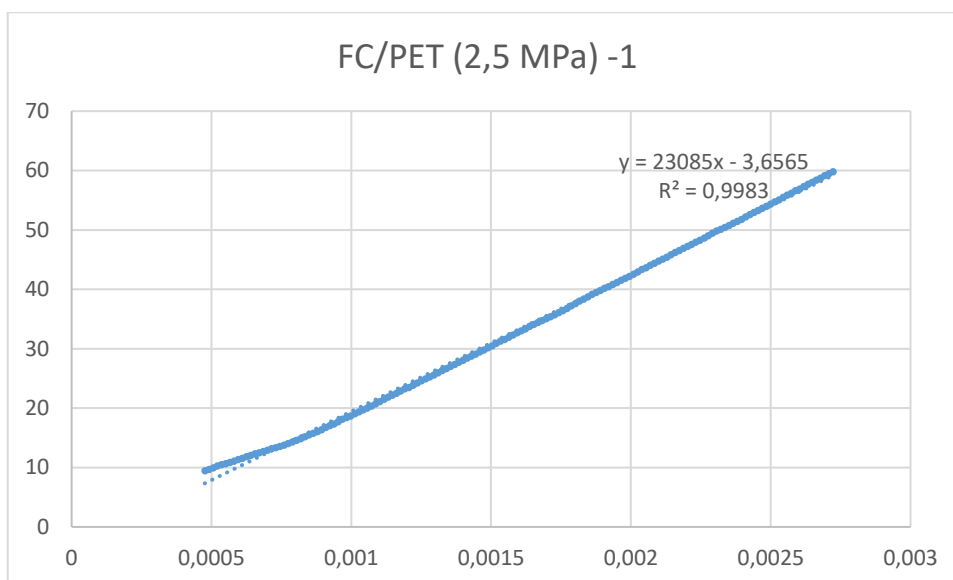
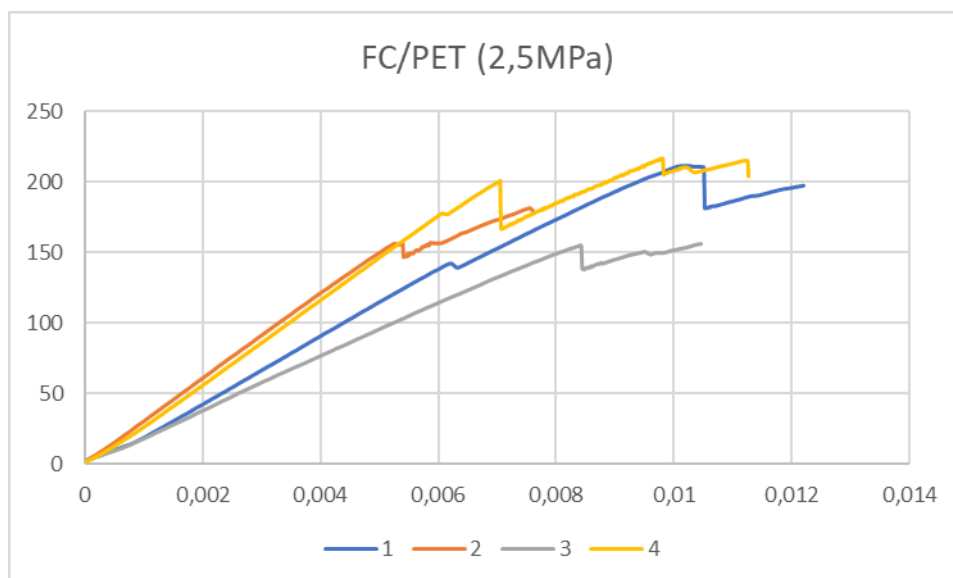


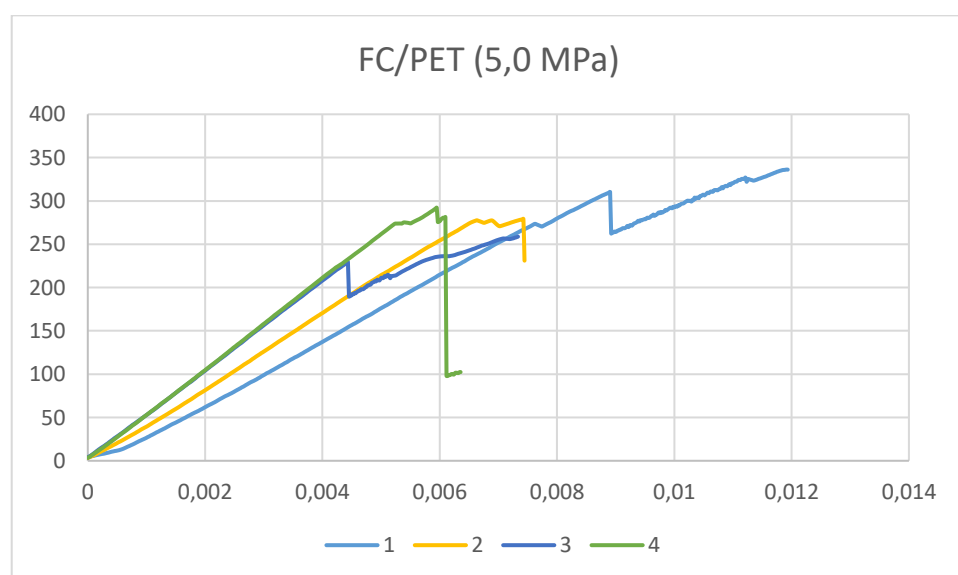
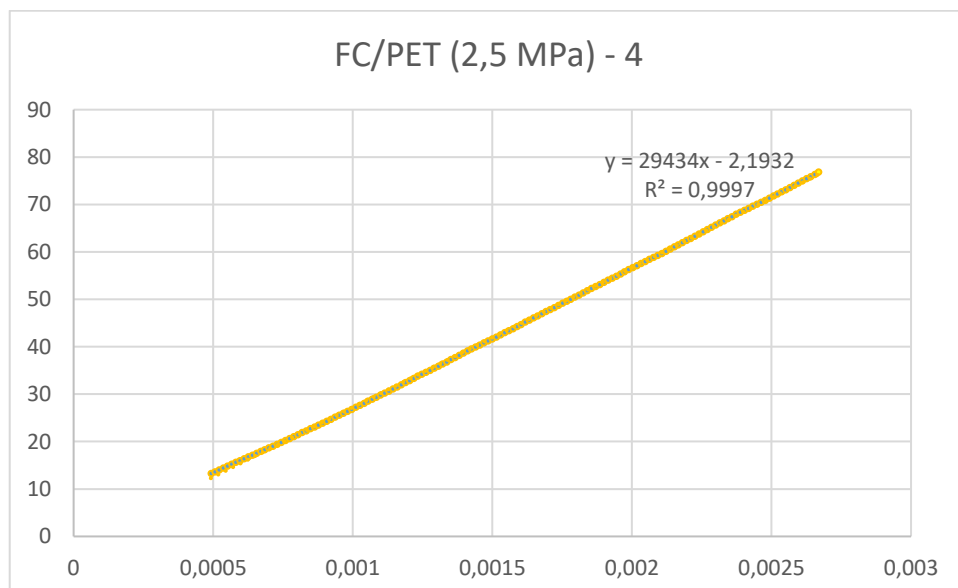
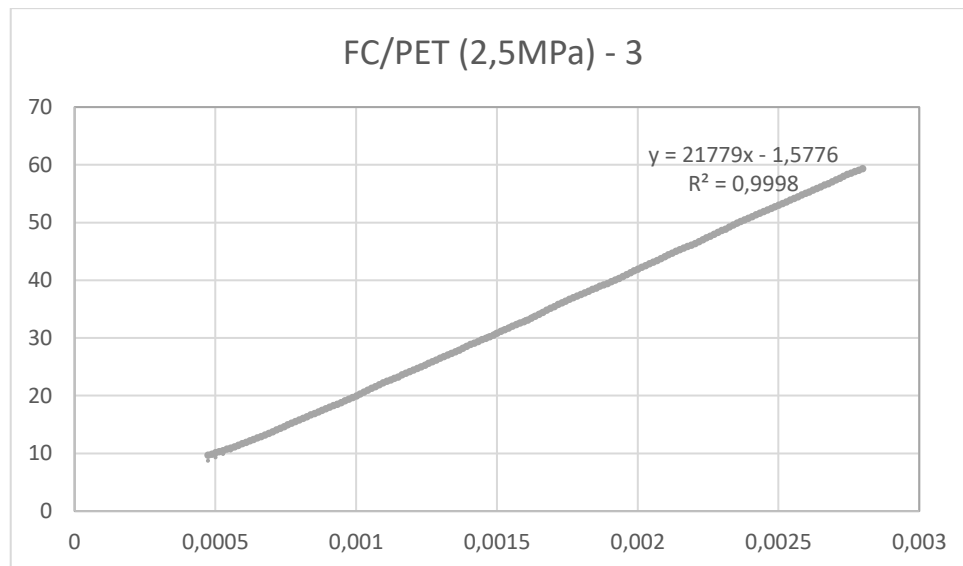


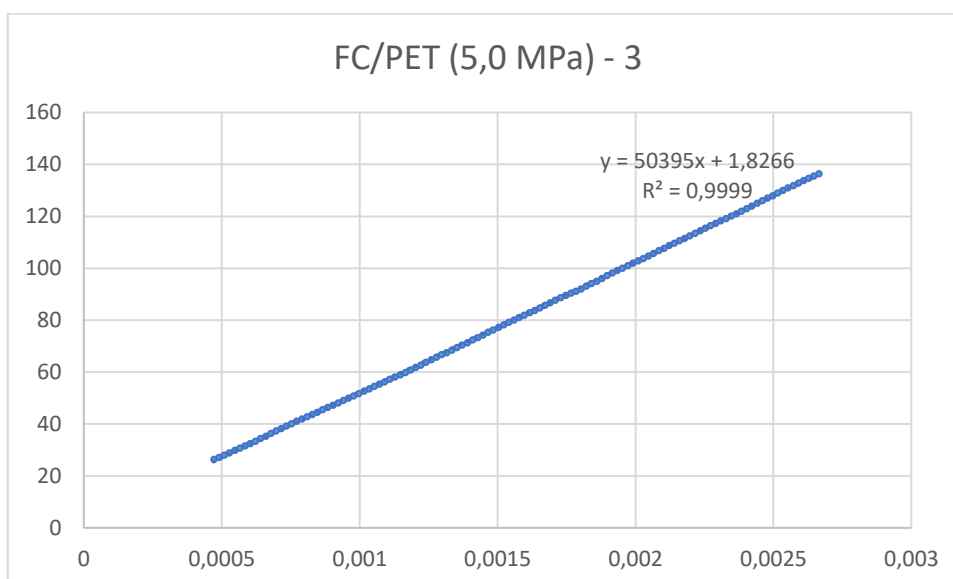
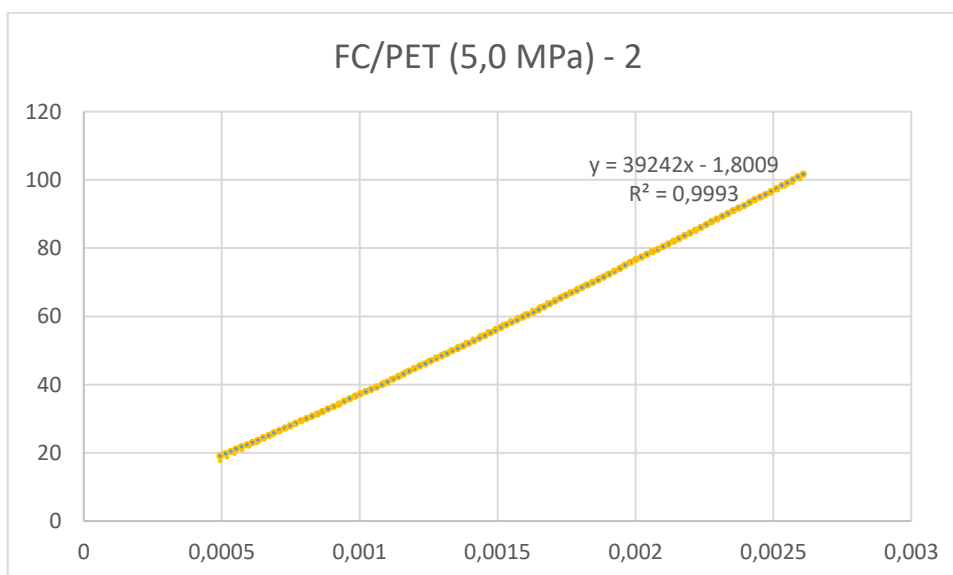
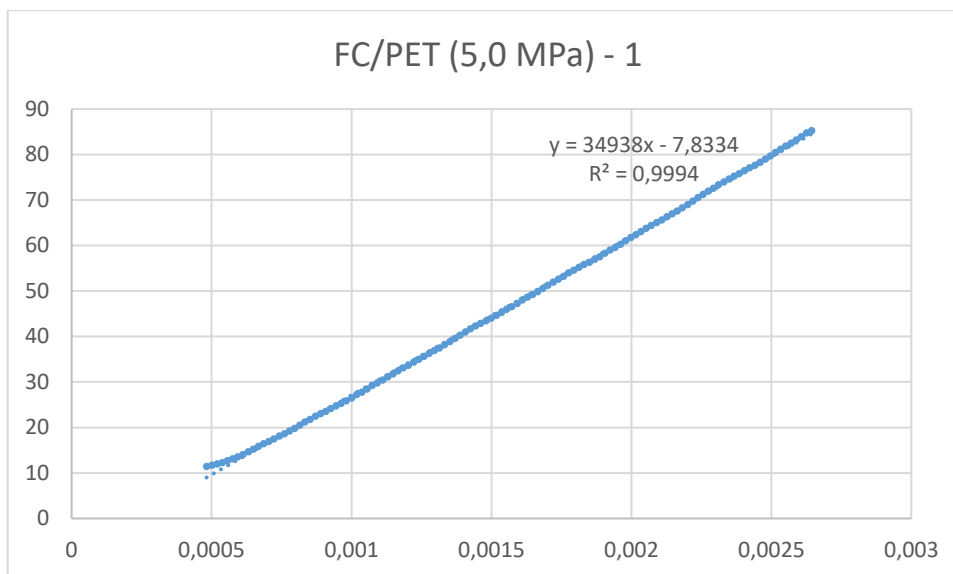


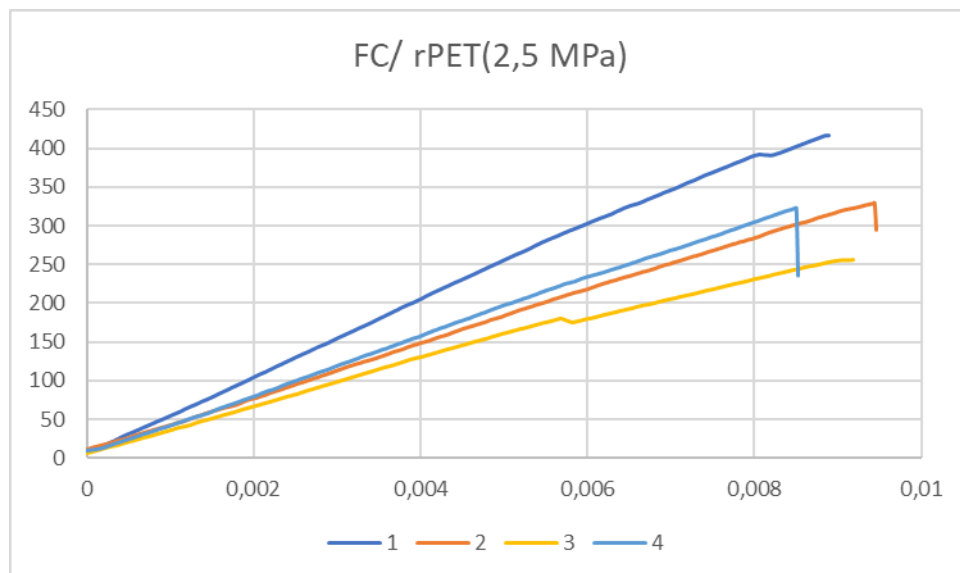
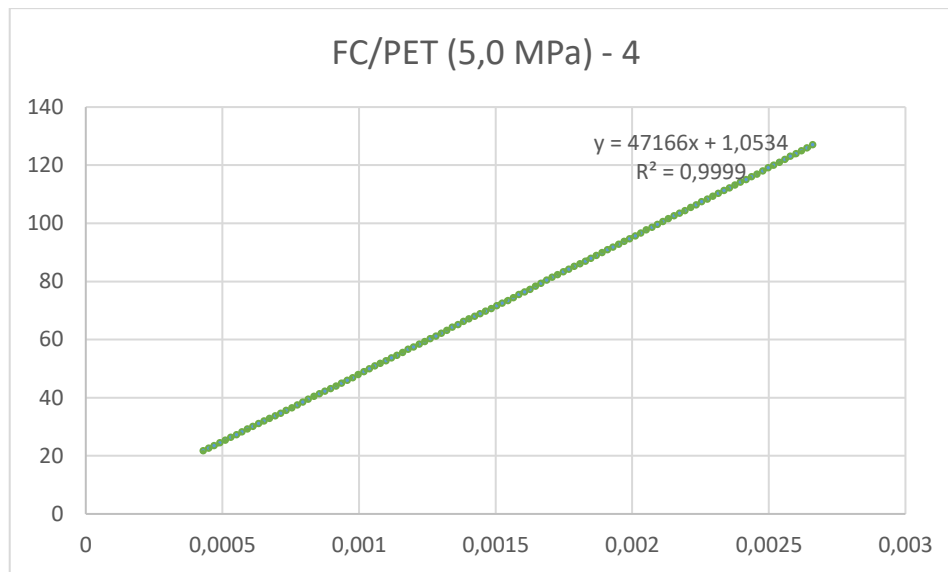


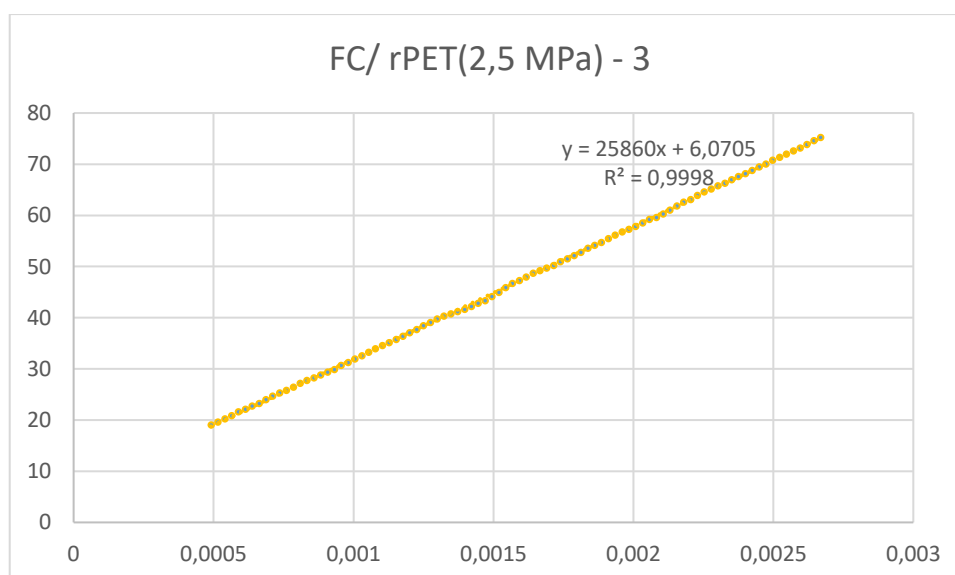
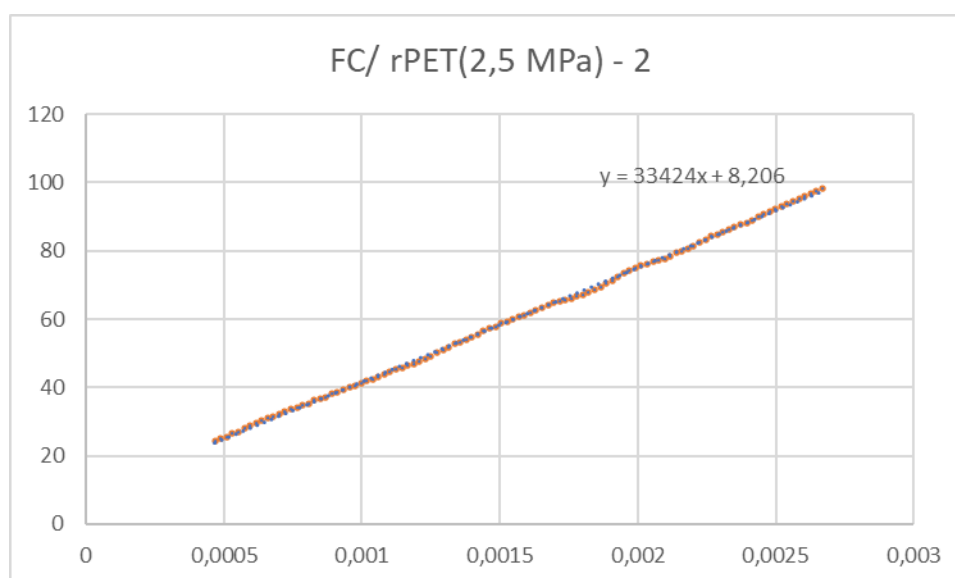
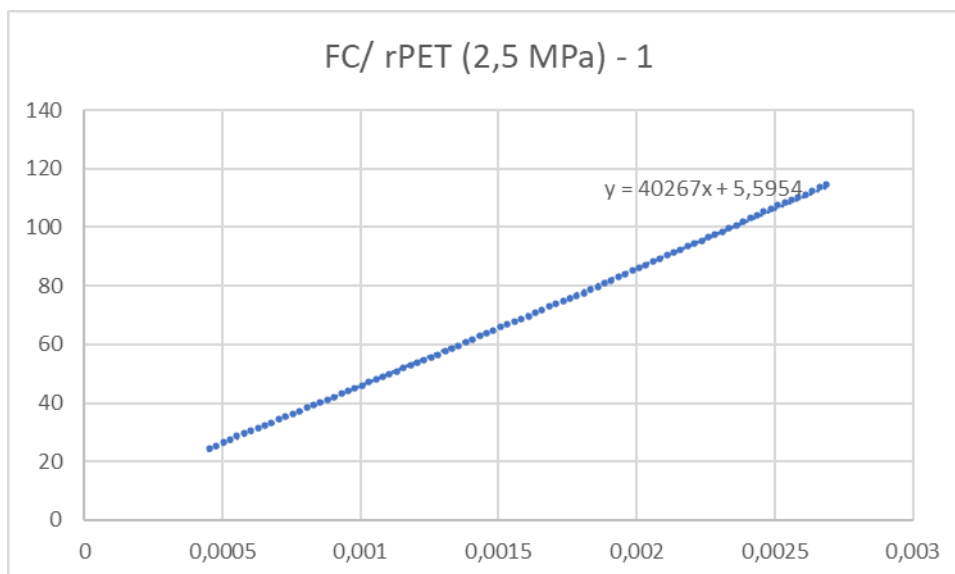
Apêndice G – Resultados dos ensaios de flexão

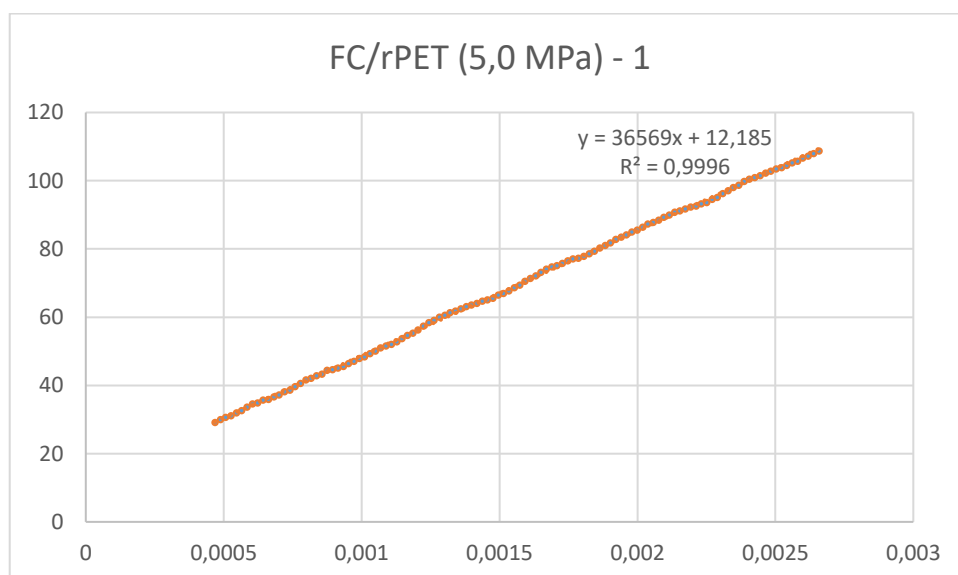
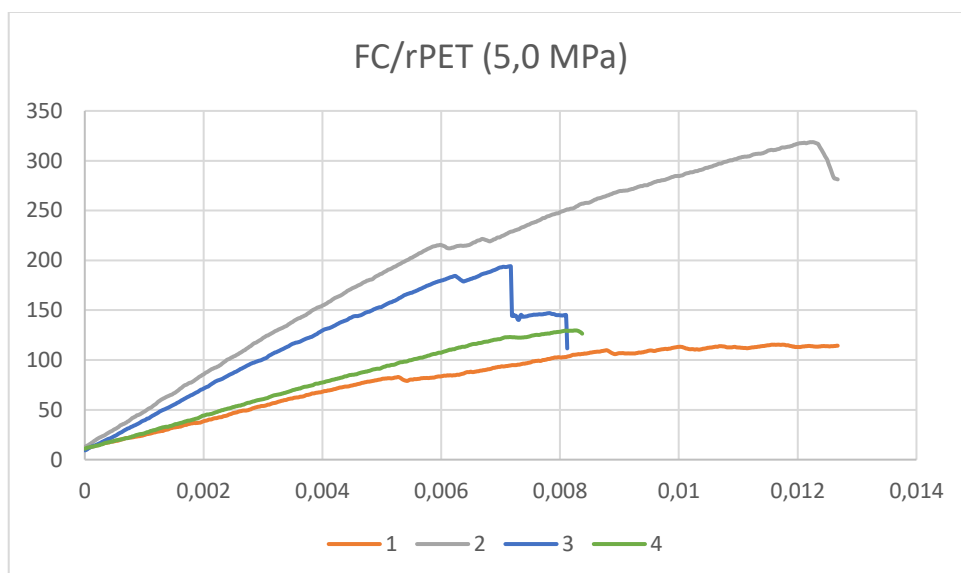
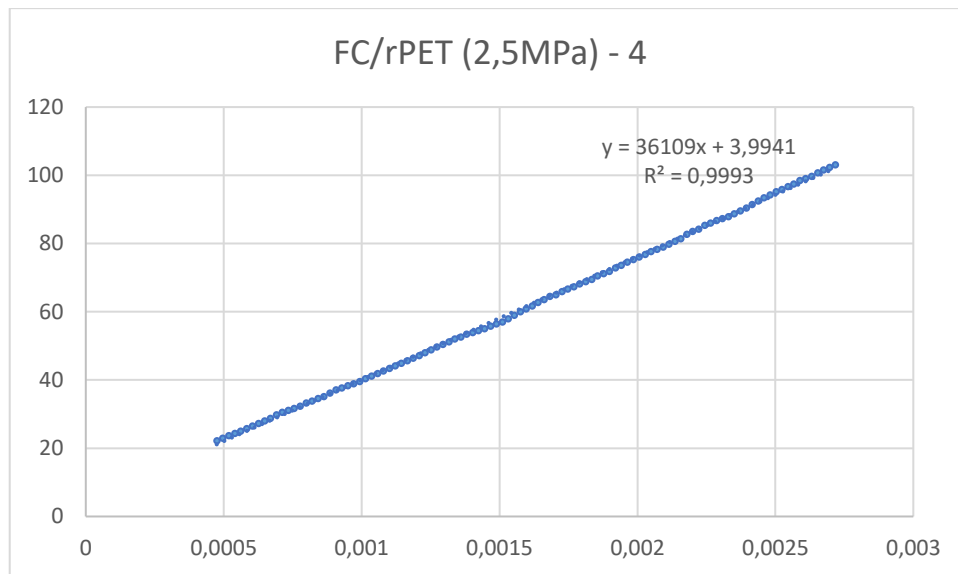


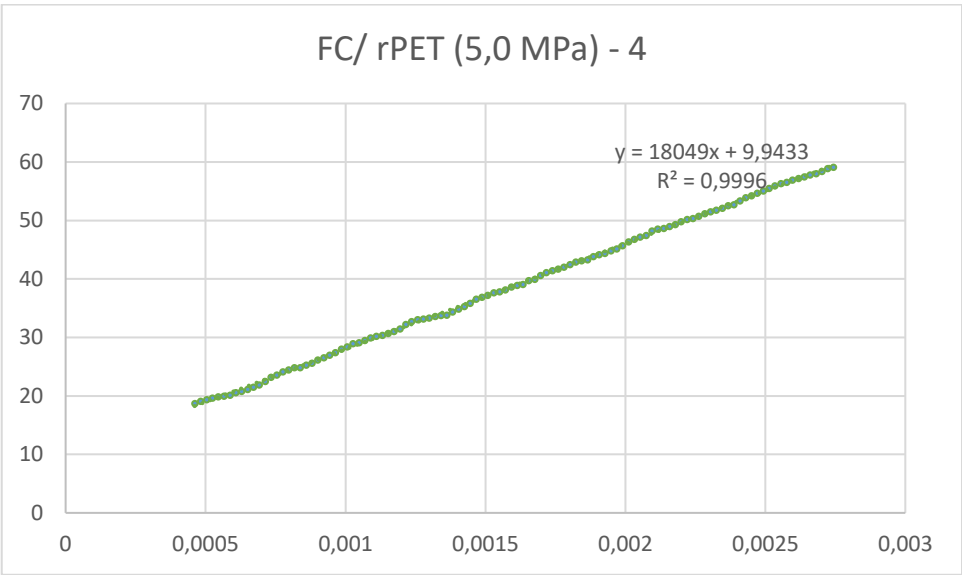
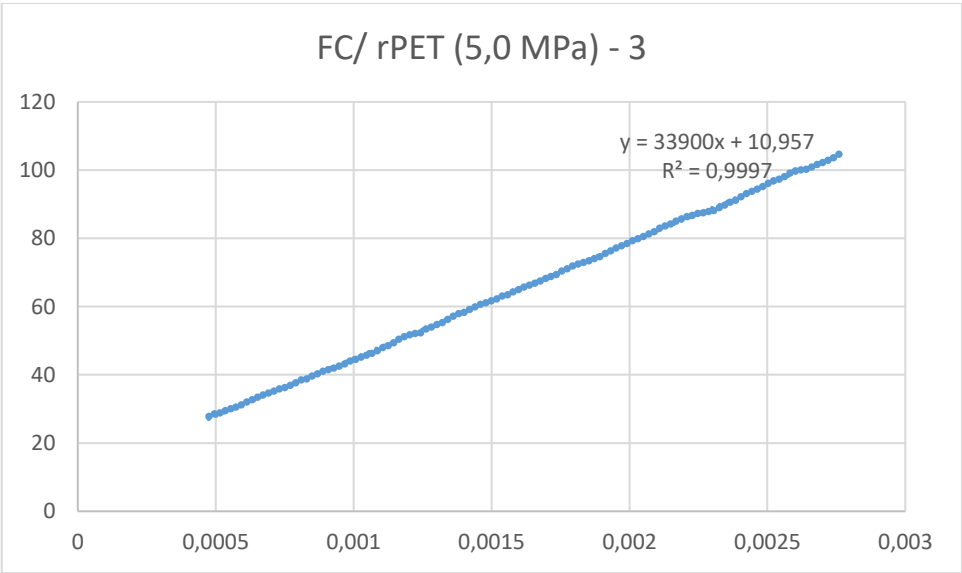
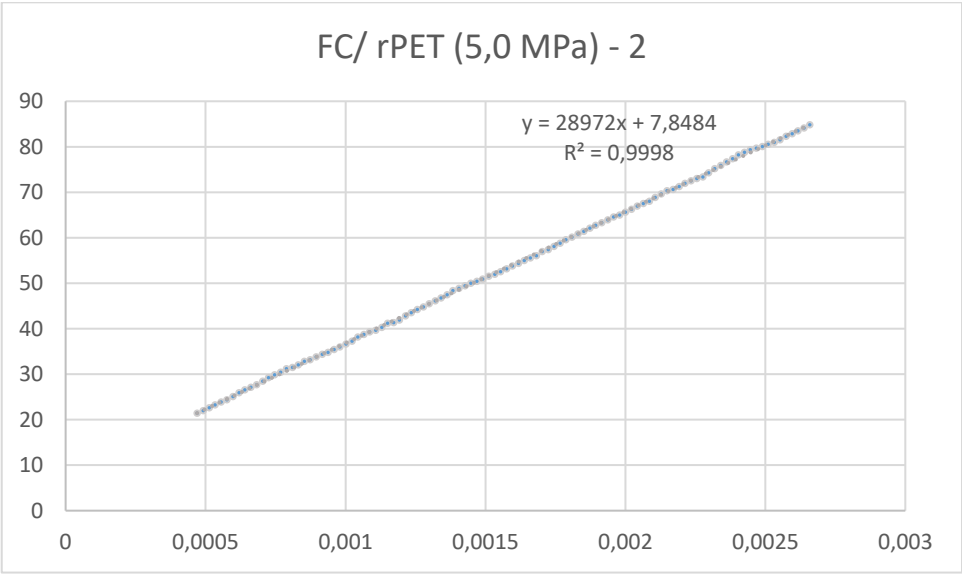




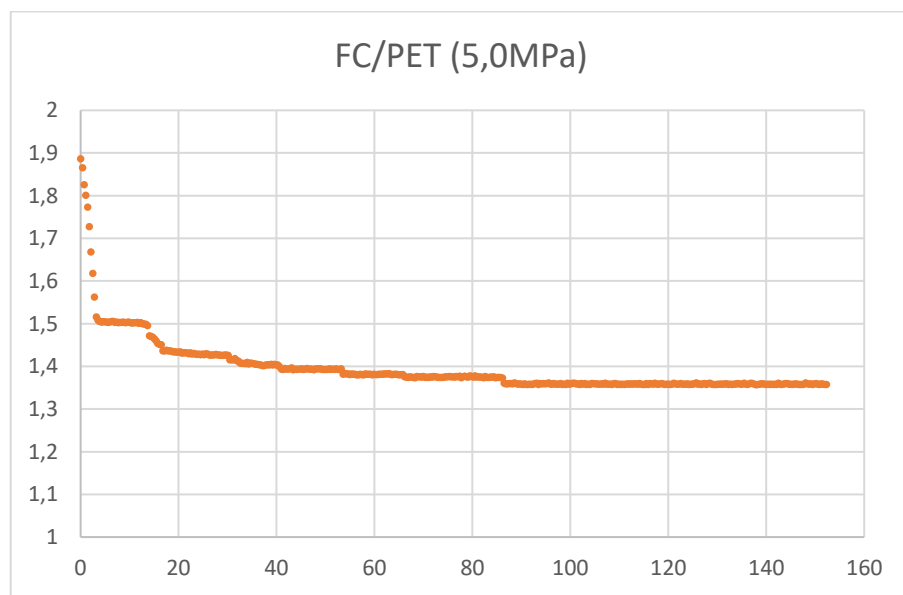
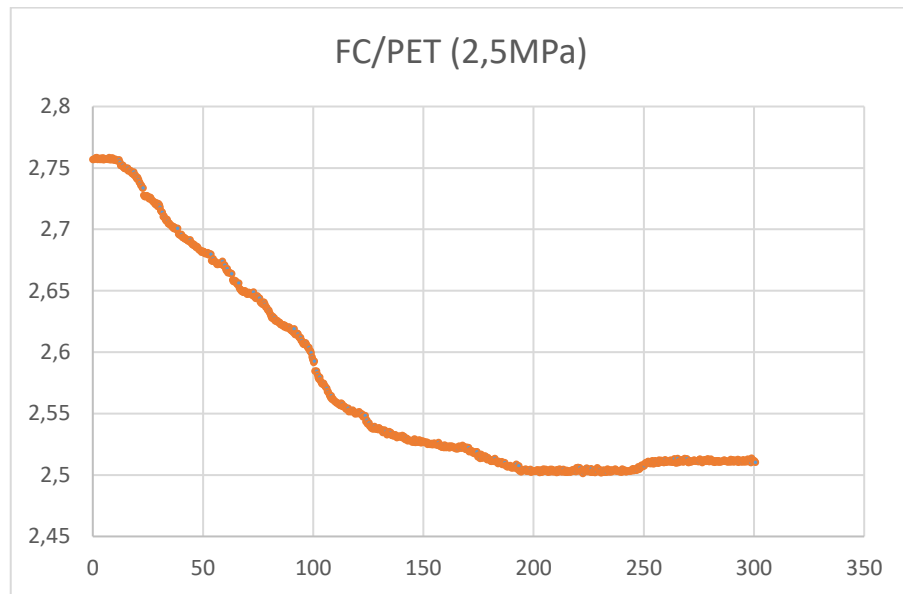


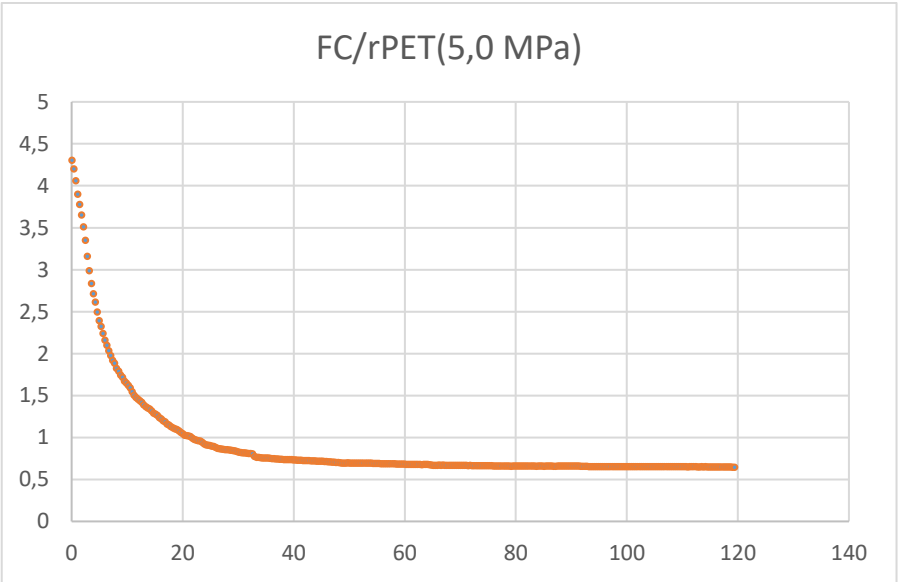
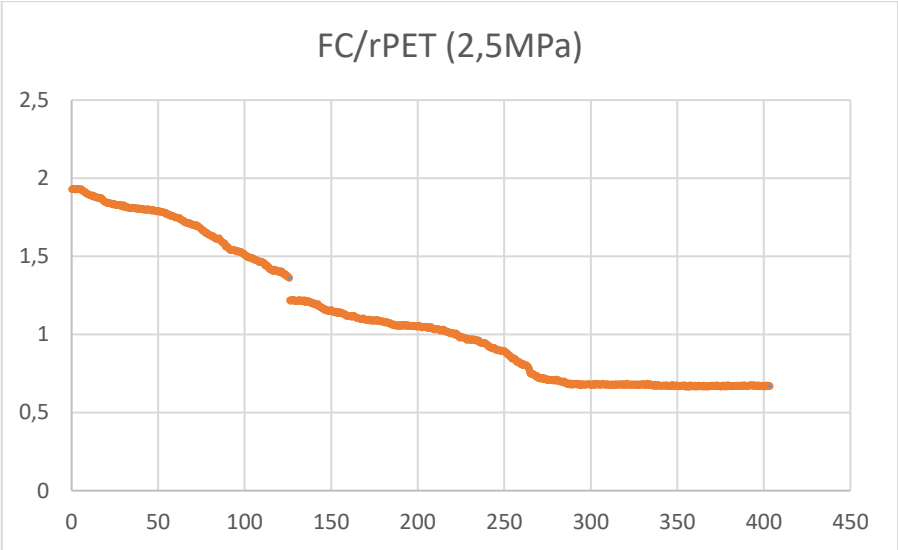






Apêndice H – Resultados da análise de consolidação





ANEXOS

ANEXO A- Ficha técnica do pet



越南百宏实业有限公司
BILLION INDUSTRIAL (VIET NAM) CO.,LTD
 LOT 43-16, ROAD N14, PHUOC DONG INDUSTRIAL PARK, PHUOC DONG COMMUNE,
 GO DAU DISTRICT, TAY NINH PROVINCE, VIET NAM

PET RESIN CHIPS SPECIFICATION

CODE NO. : 31W56/W

WATER BOTTLE GRADE (AA GRADE)

ITEM	UNIT	INDEX	TEST METHOD
IV	dl/g	0.80±0.02	ASTM D4603-03
AA	ppm	≤1.0	GC
DEG	%	1.25±0.2	GC
Melting Point	°C	249±2	DSC
COOH	mmol/kg	≤35	Titration
L Value	-	≥80	GS
B Value	-	≤0	GS
Crystall-zation	%	≥45	DSC
Humidity	%	≤0.4	IR
Impurities	granula/500g	NULL	GS
ASH	%	≤0.08	GS
DUST	mg/kg	≤100	GS

BILLION Q.C. DEPT.
 MAY 13, 2020

ANEXO B - Ficha técnica do rPET



ISO 9001:2015 FSC 22000
 ISO 14001:2015 GRS, RCS
 ISO 45001:2018 GMP, HACCP

rPET iSS01G

Recycled Polyethylene Terephthalate iSS01G

TECHNICAL DATASHEET

Product Description

rPET iSS01G is the reheat-efficient PET resin.

- Good Processability
- Low acetaldehyde content
- Uses: Hot fill/ warm fill bottles, jars
- Application: Injection and injection stretch blow molding.

Property	Test method	Value	Unit
Physical			
Intrinsic Viscosity (IV)	ASTM D1238	0.8 ± 0.02	dl/g
Bulk density	Internal method	≥ 800	kg/m³
Pellet shape	Internal method	oval	
Pellet weight	Internal method	1.5 ± 0.5	g/100pellets
Thermal			
Melt Temperature	ASTM D3418	245 ± 5	°C
Other (visual, odor)			
Color	Visual inspection	Light blue	
	Spectrophotometer	L= 71 ± 3	
	Spectrophotometer	b = - 4 ± 2	
Acetaldehyde	HS GC/MS	≤ 1	ppm
Regulatory			
Food contact approval	US FDA 21 CFR Part 177.1630, EN 10/2011, QCVN 12-1:2011 BYT		
Contains no substance on the REACH 223 SVHC list			

Date of issue: August 5, 2022

Version: 02

DUY TAN PLASTIC RECYCLING CO. LTD.

Lot D2, Duc Hoa Ha Plastics Industrial Clusters,
 Duc Hoa Ha Commune, Duc Hoa District 850000,
 Long An Province, Vietnam.

Email: info@duytanrecycling.com
 Website: www.duytanrecycling.com
 Tel: (+84) 272.377.9920

ANEXO C - Ficha técnica das Fibras de Carbono

Material data of our SIGRAFIL® continuous carbon fiber tows

Typical properties	Units	C T50-4.0/240	C T50-4.5/260	C T50-4.8/280
Number of filaments		50k	50k	50k
Fineness of yarn dry	tex [g/1000 m]	3420	3420	3070
Density	g/cm³	1.80	1.80	1.78
Single filament diameter	µm	7.0	7.0	6.6
Tensile strength	GPa	4.0	4.6	4.8
Tensile modulus	GPa	240	260	280
Elongation at break	%	1.70	1.70	1.65
Single filament resistivity	µΩm	15	17	16

Compatible matrix systems for our SIGRAFIL® continuous carbon fiber tows

Matrix compatibility
Epoxy, polyurethane, phenol
Vinyl ester (and all radical-based curing systems), unsaturated polyester
Polyurethane, polycarbonate, polyester, polysulfone, cyanate ester, polyamide, BML, PESU, PEEK, PEKK, PVC, polyimide
Polypropylene
Polyamide
PA-RIM process (in-situ polymerization of caprolactam, e.g. reactive PA processing)

Enhanced performance by sizing
By applying different types of sizing, the carbon fibers can be optimally matched to different matrix systems. In this way, it is possible to produce application-tailored versions as well as the standard materials. So, together with our customers, we find optimized solutions for their challenges.

Nomenclature



SIGRAFIL C T50-4.0/240-E100

1 2 3 4 5 6

1 Brand name	SIGRAFIL
2 Material	C = carbon
3 Type	T = Continuous tow
4 Number of filaments	50 = 50 000
5 Mechanical properties	Tensile strength/elastic modulus in GPa
6 Sizing type	e.g. E100 = epoxy