



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Abílio José Araújo Vieira

Pultrusão de perfis para aplicações avançadas
a partir de towpregs de elevado desempenho



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Abílio José Araújo Vieira

Pultrusão de perfis para aplicações avançadas
a partir de towpregs de elevado desempenho

Dissertação de Mestrado
Propriedades e Tecnologia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Professor João Pedro Lourenço Gil
Nunes

e co-orientação do
Professor Doutor Professor João Francisco Machado
Gomes da Silva

DECLARAÇÃO

Nome: Abílio José Araújo Vieira

Endereço electrónico: abilio.j.vieira@gmail.com Telefone: 916441584

Número do Bilhete de Identidade: 13272275

Título da dissertação:

Pultrusão de perfis para aplicações avançadas a partir de towpregs de elevado desempenho

Orientador:

Doutor João Pedro Lourenço Gil Nunes

Co-Orientador:

Doutor João Francisco Machado Gomes da Silva

Ano de conclusão: 2015

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Mestrado em Propriedades e Tecnologia de Polímeros

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, 15/07/2015

Assinatura: _____

Agradecimentos

O culminar deste trabalho só foi possível graças ao valioso contributo proporcionado por diversas pessoas e entidades. Gostaria de agradecer em particular:

Ao Professor Doutor João Pedro Nunes, Professor do Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho (DEP-UM), orientador deste trabalho, pelo apoio, rigor científico, revisão crítica, disponibilidade, pela sua amizade e simpatia que, desde sempre, constituíram um estímulo para a conclusão desta dissertação.

Ao Professor Doutor João Francisco Machado Gomes da Silva, Professor no Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (DEM-ISEP), meu co-orientador, pelo apoio, pela disponibilidade na partilha de saber, pela motivação, pelo interesse e pela amizade que sempre demonstrou durante a realização deste trabalho.

Ao PIEP, instituição onde foi desenvolvido parte do trabalho, por me facultar todas as condições necessárias para a sua realização.

Ao Engenheiro Luís Oliveira, investigador do Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros (PIEP), pela partilha de conhecimento que me facultou e pela disponibilidade demonstrada ao longo do trabalho.

Ao Eng.º Paulo Novo, Professor do Instituto Politécnico de Leiria, pelos seus ensinamentos, rigor científico e colaboração na produção e caracterização dos compósitos.

À Feliciano pela colaboração na produção dos *towpregs* e dos perfis. A amizade desenvolvida ao longo do tempo e os momentos partilhados em conjunto contribuíram, decisivamente, para o êxito no percurso académico e valorização pessoal.

Por fim, gostaria de agradecer à minha família, aos meus pais, à minha irmã e aos meus amigos pelo apoio e encorajamento.

(Página intencionalmente deixada em branco)

Resumo

Nas últimas duas décadas, tem-se verificado um aumento do emprego de matrizes termoplásticas, em substituição das mais tradicionais termoendurecíveis, em compósitos reforçados com fibras em virtude das inúmeras vantagens associadas à sua aplicação. No entanto, a maior dificuldade de processamento destas matrizes, devido à inexistência de processos comercialmente rentáveis que permitam facilmente impregnar fibras longas com termoplásticos, tem limitado a sua aplicação.

Por isso, um dos maiores desafios deste sector é, atualmente, o desenvolvimento de novas técnicas de impregnar fibras longas ou contínuas com termoplásticos e de transformação de compósitos de matriz termoplástica. Muitos dos desenvolvimentos em curso nesta área resultam da simples adaptação das tecnologias atualmente já empregues na transformação de compósitos de matriz termoendurecíveis.

Neste trabalho, pretendeu-se produzir pré-impregnados termoplásticos, por deposição a seco de polifenileno auto reforçado (SRP) em pó sobre fibras de carbono contínuas e posteriormente transforma-los em perfis por pultrusão. Os compósitos resultantes foram caracterizados quantitativamente e qualitativamente.

Estabeleceu-se, uma janela operatória que permite obter os pré-impregnados (*towpregs*) com frações mássicas em polímero entre os 32 e os 42%. Os parâmetros mais relevantes para a produção de *towpregs* foram otimizados através do método de Taguchi.

As propriedades mecânicas obtidas em tração e flexão dos perfis produzidos foram comparadas com as estimadas pela teoria clássica dos laminados (CLT) usando a lei das misturas.

Por fim, os resultados obtidos nos ensaios a que foram submetidos os perfis pultrudidos foram também comparados com as propriedades doutros compósitos de matriz termoplástica existentes no mercado.

(Página intencionalmente deixada em branco)

Abstract

In the last two decades the world face an increase of employment thermoplastic matrices replacing the more traditional thermosetting matrices in fiber reinforced polymer composites because of the numerous advantages associated with their application. However, the greatest difficulty processing these matrices, due to the lack of commercially viable processes which easily impregnate long fibers with thermoplastics, has limited their application.

Therefore, one of the biggest challenges of this sector is currently developing new techniques to impregnate long or continuous fibers with thermoplastics and techniques to processing thermoplastic matrix composites. Many of the ongoing developments in this area are the result of simple adaptation of technologies currently employed in the processing of thermosetting matrix composites.

The aim of this thesis was produce prepregs (towpregs) by dry deposition of a self-reinforced poly- phenylene (SRP) powder on continuous carbon fibers, which were after processed by pultrusion. The resulting composites were characterized by adequate testing.

Towpregs production was optimized and relevant operational parameters established. A processing window was also determined allowing their production with polymer mass fractions from 32 to 42%.

The mechanical properties obtained on the manufactured composites were compared with the theoretical predictions made by using the Classical Lamination Theory (CLT) and the Rule of Mixture (ROM).

Finally, the mechanical properties of composites processed from towpregs were also compared with those of other available thermoplastic matrix composites.

(Página intencionalmente deixada em branco)

Índice

1	Introdução	1
1.1	Introdução.....	2
1.2	Motivação e Objetivos	4
1.3	Referências	6
2	Revisão Bibliográfica	7
2.1	Compósitos de matriz polimérica	9
2.1.1	Pré-impregnados de matriz termoplástica.....	12
2.1.1.1	Fibras de reforço	13
2.1.1.2	Matrizes termoplásticas	17
2.1.2	Produção de pré-impregnados de matriz termoplástica de fibras contínuas	19
2.1.2.1	Impregnação por termoplástico fundido.....	20
2.1.2.2	Impregnação por solução.....	21
2.1.2.3	Impregnação por mistura íntima de fibras termoplásticas e de reforço..	21
2.1.2.4	Impregnação por mistura íntima pó termoplástico com as fibras de reforço	22
2.1.3	Transformação pré-impregnados de matriz termoplástica de fibras contínuas	24
2.1.3.1	Compressão a quente.....	25
2.1.3.2	Enrolamento filamentar	25
2.1.3.3	Pultrusão.....	26
2.2	Referências	29
3	Método de Taguchi.....	35
3.1	Método de Taguchi	37
3.2	Descrição do Método	39
3.3	Referências	44
4	Procedimento experimental.....	47
4.1	Seleção das matérias-primas.....	49
4.1.1	Matriz	49
4.1.2	Fibras.....	50
4.2	Produção e caracterização dos <i>towpregs</i>	51

4.2.1	Determinação do teor mássico de polímero nos <i>towpregs</i>	51
4.3	Produção e caracterização dos compósitos transformados por pultrusão.....	52
4.3.1	Produção de compósitos por pultrusão.....	52
4.3.2	Caracterização dos compósitos	52
4.3.2.1	Ensaio de flexão	52
4.3.2.2	Ensaio de tração	53
4.3.2.3	Ensaio de corte interlaminar	54
4.3.2.4	Determinação da densidade no compósito.....	55
4.4	Referências	56
5	Apresentação e discussão dos resultados	57
5.1	Produção e caracterização dos <i>towpregs</i>	59
5.1.1	Produção dos <i>towpregs</i>	59
5.1.1.1	Otimização da produção de <i>towpregs</i>	61
5.2	Produção e caracterização dos compósitos transformados por pultrusão.....	64
5.2.1	Procedimento pré-operatório	65
5.2.2	Produção de compósitos por pultrusão.....	65
5.2.3	Caracterização dos compósitos	67
5.2.3.1	Ensaio de flexão	67
5.2.3.2	Ensaio de tração	68
5.2.3.3	Ensaio de corte interlaminar	70
5.2.3.4	Determinação da densidade do compósito.....	70
5.2.3.5	Comparação entre as propriedades mecânicas obtidas nos perfis com as teoricamente esperadas	71
5.2.3.6	Comparação das propriedades mecânicas obtidas nos perfis FC/PR120 com outros compósitos FC/PR120.....	72
5.2.3.7	Comparação das propriedades mecânicas dos perfis FC/PR120 com as de outros perfis termoplásticos reforçados com fibras.....	73
5.2.3.8	Comparação das propriedades mecânicas nos perfis FC/PR120 com outros materiais utilizados em engenharia	74
5.3	Referências	76
6	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	79
6.1	Conclusões.....	81
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	83

Anexo 1.....	85
Anexo 2.....	89
Anexo 3.....	93
Anexo 4.....	97

(Página intencionalmente deixada em branco)

Capítulo 1

Introdução

(Página intencionalmente deixada em branco)

1.1 Introdução

O presente capítulo destina-se essencialmente a apresentar motivação para o trabalho que foi realizado e a descrever os seus principais objetivos. Seguidamente, é ainda efetuada uma pequena revisão de alguns conceitos relativos aos materiais e tecnologias nele usados.

Os materiais compósitos resultam da combinação de diferentes materiais e permitem obter propriedades que cada um dos componentes individualmente e por si só não pode alcançar [1].

Estes materiais têm vindo a ser largamente utilizados em diferentes aplicações comerciais e industriais, destacando-se, os de matriz polimérica, cuja aplicação é cada vez mais significativa na indústria aeroespacial e no sector dos transportes, devido ao elevado módulo específico e resistência mecânica [2,3].

Entre os compósitos de matriz polimérica, podem-se distinguir os tradicionalmente mais utilizados, de matriz termoendurecível, e os de matriz termoplástica que, recentemente, têm vindo a ser cada vez mais usados por apresentarem vantagens relevantes, como sejam, uma maior resistência ao impacto e tenacidade, maior resistência química, maior durabilidade, baixa absorção de humidade, ciclos de reprodução mais curtos, possibilidade de reprocessamento e reciclagem [2,4,5].

Tendo em conta essas vantagens, o interesse e procura deste tipo de matrizes tem aumentado [6]. No entanto, a maior dificuldade em processar compósitos de matriz termoplástica reforçada com fibras longas/contínuas tem limitado fortemente a sua aplicação.

De facto, o principal problema que se tem oposto a uma maior aplicação dos compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibras longas/contínuas é a dificuldade encontrada em impregnar, a baixo custo, as fibras com matrizes termoplásticas por estas apresentarem, mesmo no estado fundido, viscosidades muito mais elevadas que os termoendurecíveis [7].

Face a esta situação, vários esforços têm vindo a ser feitos nos últimos anos no intuito de ultrapassar os desafios tecnológicos e científicos que a utilização de matrizes

termoplásticas coloca. Como consequência, recentemente tem aparecido métodos de fabrico capazes de melhorar o processo de impregnação e transformação.

Nos últimos anos em Portugal tem existido uma prolífera colaboração nesta área da ciência entre o Instituto de Polímeros e Compósitos (IPC) e o Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) que resultou em vários equipamentos patenteados, artigos em revistas científicas e em conferências. Dos equipamentos desenvolvidos, podemos destacar o equipamento de produção de *towpregs*, existente nas instalações do Pólo de Investigação em Engenharia de Polímeros (PIEP), e o equipamento de pultrusão existente no ISEP.

1.2 Motivação e Objetivos

Este trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de perfis em compósito inovadores, leves e com desempenho mecânico e térmico acrescido, que possam ser usados em componentes estruturais de mercados avançados de engenharia, como sejam, o aeronáutico, de defesa e o espacial.

Pensa-se que essas aplicações possam vir a usufruir de uma significativa redução de custos efetivos como resultado da utilização da pultrusão na produção desses perfis e, ainda das enormes vantagens resultantes do emprego duma nova matriz termoplástica de elevado desempenho, o PrimoSpire[®] da Solvay Advanced Polymers, como sejam, maior resistência ao impacto, tenacidade, resistência química e durabilidade, cumulativamente, com uma menor absorção de humidade, ciclos de reprodução mais curtos e as vantagens ecológicas inerentes, como sejam, a possibilidade de reprocessamento e reciclagem, eliminação da libertação de solventes e das reações químicas no processamento e a diminuição dos problemas de armazenamento e associados a ambientes de trabalho “mais sujos” que normalmente se associam à transformação dos termoendurecíveis.

Finalmente, pretende-se ainda produzir esses perfis compósitos de elevado desempenho a partir de pré-impregnados de matriz termoplástica (*towpregs*) fabricados por deposição a seco do polímero em pó. Trata-se de utilizar um novo processo de fabrico de baixo custo recentemente desenvolvido em Portugal, que se pensa poder vir a contribuir para aumentar a competitividade dos produtos finais no mercado.

São, assim, principais objetivos do trabalho:

- Produzir pré-impregnados (*towpregs*) de PrimoSpire® reforçado com fibras de carbono no equipamento-protótipo de deposição de polímero em pó existente nos laboratórios Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros (PIEP);
- Determinar e avaliar as propriedades dos *towpregs* produzidos de modo a poder contribuir para o melhorar e otimizar o seu processamento;
- Produzir perfis pultrudidos a partir dos *towpregs* previamente fabricados num novo equipamento-protótipo de pultrusão, totalmente desenvolvido em Portugal que se encontra atualmente montado no laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP);
- Caracterizar os perfis produzidos através, nomeadamente, de ensaios mecânicos e de outros ensaios físicos quantitativos;
- Comparar os valores das propriedades mecânicas teoricamente esperados com os valores obtidos experimentalmente nos perfis produzidos.

1.3 Referências

- [1] D. D. L. Chung, *Composite Materials: Science and Applications*, 2^a ed. Londres: Springer, 2010.
- [2] H. Ning, *et al.*, “Design, Manufacture and Analysis of a Thermoplastic Composite Frame Structure for Mass Transit”, *Composite Structures*, vol. 80, no. 1, pp. 105-116, 2007.
- [3] F. O'Brien Bernini, “Composites and Sustainability - When Green becomes Golden”, *Reinforced Plastics*, vol. 55, no. 6, pp. 27-29, 2011.
- [4] T. Weustink, “Development of a Rapid Thermoplastic Impregnation Device”, Tese de doutoramento, Delft University, Delft, 2008.
- [5] R. Vodicka, “Thermoplastics for Airframe Applications - A Review of the Properties and Repair Methods for Thermoplastic Composites”, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Department of Defense, Melbourne, 1996.
- [6] Thermoplastic Composites in Europe to 2025 - Foresight Study into Future Research Needs, 2004. [Online]. Available: <http://www.coronet.eu.com/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=226>.
- [7] C. Zaniboni, “Oligomere Technologies for Cost-Effective Processing High-Performance Polyphthalamide Composites”, Tese de doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Zurich, Zurich, 2010.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

(Página intencionalmente deixada em branco)

Neste capítulo efetua-se uma revisão do estado atual de desenvolvimento em que se encontram os compósitos de matriz termoplástica reforçada com fibras longas ou contínuas, pré-impregnados de matriz termoplástica existentes, bem como, as principais tecnologias usadas no seu fabrico e transformação em componentes estruturais de materiais compósitos.

2.1 Compósitos de matriz polimérica

Um compósito pode ser definido como uma combinação de pelo menos dois materiais, distinguíveis a nível macroscópico, que apresenta melhores propriedades que cada um dos seus constituintes isoladamente [1]. Os materiais compósitos são heterogêneos e geralmente anisotrópicos [2].

Os elementos que compõem um compósito são a matriz e o reforço. O reforço é o constituinte que apresenta maior rigidez, dureza e resistência mecânica. Tem como principal função suportar os esforços a que a peça está sujeita. A matriz, por seu lado, deve garantir uma adequada transmissão e repartição dos esforços aplicados, conferir à estrutura uma forma estável, preencher os espaços vazios, bem como servir de barreira química contra ambientes agressivos [3,4].

Os materiais compósitos podem também classificar-se quanto à forma e quanto à natureza dos seus constituintes. Quanto à forma, podem ser compósitos reforçados com partículas ou com fibras. Nos compósitos reforçados com fibras, estas podem ser contínuas ou descontínuas. No caso das partículas, elas são normalmente utilizadas para melhorar as propriedades do compósito, por exemplo, aumentado a sua rigidez, a resistência à abrasão ou para diminuição da dilatação térmica. Em relação à natureza, os compósitos podem ser de matriz polimérica, matriz metálica ou matriz cerâmica e ter reforços de fibras ou de partículas com natureza diversa.

A quantidade de reforço presente numa matriz é limitada por alguns fatores. Por exemplo, em metais reforçados com partículas a quantidade limite de reforço é de cerca de 40% do volume, dado que quantidades superiores criam problemas de processamento e de elevada fragilidade. No caso de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras, o limite superior é de cerca de 70% do volume. [5].

Os compósitos são empregues extensamente em mercados avançados (militar, espacial e aeronáutico) e têm vindo a substituir paulatinamente materiais tradicionais em aplicações mais vulgares de engenharia como, por exemplo, nos sectores da construção civil, energia e transportes.

Embora a utilização destes materiais tem aumentado significativamente ao longo das últimas décadas eles são, contudo, relativamente recentes e representam aproximadamente 0,5% do mercado de matérias-primas utilizadas no fabrico de componentes, o qual ainda é dominado pelo aço [6].

Embora seja difícil encontrar dados estatísticos da produção de compósitos a nível global, estima-se que em 2000 tenham sido produzidos de 7 milhões de toneladas e que em 2006 se tenham alcançado os 10 milhões de toneladas [7].

O aumento da procura de compósitos deve-se, sobretudo, à facilidade com que diferentes materiais se podem combinar. Em consequência deste aumento, diferentes tecnologias de fabrico com características muito distintas têm vindo a ser desenvolvidas, para os sectores de mercado com maior expressão [8].

Os compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras, também conhecidos por plásticos reforçados com fibras (PRF), são os mais utilizados globalmente. Para este facto contribuem a elevada rigidez e resistência mecânica, baixo peso específico e a relativa facilidade de processamento que eles apresentam.

Na Europa, a Alemanha apresenta a maior participação no mercado dos compósitos poliméricos, seguindo-se Itália e a França. Estas três nações representam mais de 60% do mercado. Esta situação está relacionada com a forte tradição da indústria automóvel e aeroespacial nestes três países [7].

As matrizes utilizadas no fabrico destes compósitos podem ser de dois tipos: termoplásticas ou termoendurecíveis.

Os termoendurecíveis apresentam maior facilidade de impregnação em comparação com os termoplásticos por apresentarem valores de viscosidade bastante inferiores. Esta é uma das principais razões para que estes polímeros sejam os mais empregues no fabrico de compósitos. As resinas termoendurecíveis mais utilizadas em aplicações não-estruturais e semi-estruturais são os poliésteres insaturados, as resinas de vinilester e as resinas

fenólicas. Em aplicações de elevada performance, as epóxi, bismaleimidas e as poliimidas são as mais comuns [9].

Embora os termoplásticos sejam empregues como matriz de compósitos de fibras curtas desde a década de 60 do séc.XX, só em finais desse século começaram a ser utilizados em compósitos reforçados com fibras contínuas. A principal razão para isso prendia-se com a inexistência de métodos capazes de impregnar convenientemente fibras contínuas com termoplásticos, apresentando os compósitos obtidos fraca adesão fibra/matriz e, conseqüentemente, baixas propriedades mecânicas [10].

Durante a década de 1980 constatou-se que os requisitos cada vez mais exigentes dos mercados avançados, não podiam ser cumpridos, na totalidade, com a utilização de matrizes termoendurecíveis. Efetivamente, estas matrizes apresentavam baixa resistência ao impacto o que provocava em alguns casos delaminação da estrutura.

Por conseguinte, iniciaram-se pesquisas por materiais mais tenazes, tendo-se identificado os termoplásticos como uma alternativa viável. Como resultado, vários esforços foram feitos no sentido de desenvolver novos métodos de produção e transformação de compósitos baseados nestes materiais. Nessa mesma década, surgiram, efetivamente, os primeiros pré-impregnados de matriz termoplástica para aplicações estruturais. Eles usavam termoplásticos de elevado desempenho reforçados com fibras de carbono e eram fabricados por processos de fusão direta, como, por exemplo, a pultrusão em contínuo, ou utilizando precursores de baixa viscosidade. Estes pré-impregnados extremamente caros demonstraram, no entanto e desde logo, serem capazes de substituir com sucesso os de matriz termoendurecível [8,11].

O aparecimento de novos termoendurecíveis mais resistentes, associado à inexistência de processos comercialmente rentáveis que permitissem facilmente impregnar fibras contínuas com termoplásticos, limitava o emprego das matrizes termoplásticas [12,13].

Apesar disso, o interesse na substituição das matrizes termoendurecíveis por termoplásticas em materiais compósitos tem vindo a intensificar-se devido às inúmeras vantagens que apresentam, tais como: maior tolerância ao dano, resistência ao impacto e às vibrações superior, maiores deformações na rotura e ductilidade, ciclos de fabrico mais curtos, maior facilidade de reciclagem, possibilidade reparação e reprocessamento, assim como ambientes produtivos mais ecológicos (ambientes livres de estireno) [10].

Ao longo dos anos, tem surgido novos produtos e tecnologias na tentativa de tornar os compósitos termoplásticos rentáveis, permitindo consequentemente a sua utilização em mercados mais correntes e competitivos. [8,11]. Paralelamente têm sido desenvolvidos técnicas que permitem soldar peças compósitas de matriz termoplástica, obtidas por diferentes processos, permitindo desta forma, obter-se produtos com geometrias bastante complexas.

Devido a estes fatores, a procura destes compósitos pela indústria tem aumentado, sendo expectável que até finais de 2014, nos Estados Unidos, a procura de compósitos de matriz termoplástica tenha superado a de termoendurecíveis, destacando-se neste caso, a procura de compósitos com matriz em polipropileno (PP). Neste período estima-se que o mercado dos compósitos termoplásticos de fibras contínuas tenha chegado aos 188.7 milhões de dólares [14]. Até 2017, prevê-se que o mercado dos compósitos termoplásticos cresça à taxa de 4.9% ao ano, atingindo este sector um valor comercial no mercado de 8.2 biliões de dólares.

2.1.1 Pré-impregnados de matriz termoplástica

Os pré-impregnados de matriz termoplástica classificam-se, em função do comprimento característico das fibras de reforço, em: pré-impregnados de fibras curtas (SFRT's), de fibras longas (LFRT's) e de fibras contínuas (CFRT's).

Os pré-impregnados de fibras curtas são bastante atrativos devido à sua fácil produção, baixo custo e às superiores propriedades mecânicas relativamente aos termoplásticos não reforçados [15]. Estes pré-impregnados apresentam-se normalmente sob forma de grânulos, produzidos por mistura do termoplástico com as fibras numa extrusora. Os SFRT's são transformados em de injetoras convencionais, sem que seja necessário efetuar qualquer adaptação [16]. Embora a extrusão dos grânulos seja bastante interessante do ponto de vista económico, esta provoca uma acentuada degradação das fibras permitindo apenas atingem alguns milímetros de comprimento nos grânulos finais [8].

Os LFRT's apresentam a forma de grânulos cilíndricos alongados (*pellets*). São, normalmente, obtidos por co-extrusão ou pultrusão [17], evitando grandes danos nas fibras de reforço, cujo comprimento é superior a 2 mm. A utilização de pré-impregnados de fibras longas tem vindo a crescer na substituição de componentes em metal e de SFRT's. A procura de LFRT's relativamente aos SFRT's tem aumentado, devido à maior

estabilidade dimensional e às suas melhores propriedades mecânicas dos produtos finais fabricados a partir deles [14]. A definição de uma fibra como longa não é linear e depende frequentemente do processo de transformação associado [18]. Os LFRT's são, geralmente, transformados por injeção ou compressão a quente [17]. Nos últimos anos têm sido desenvolvidas técnicas de obtenção de LFRT's sem necessidade de utilizar *pellets*, obtendo-se peças finais diretamente dos seus constituintes elementares, o que permite reduzindo os custos de processamento [18].

Os pré-impregnados de fibras contínuas podem ser subdivididos com base na flexibilidade apresentada. Assim, temos: os i) pré-impregnados flexíveis ou com impregnação parcial, caracterizados por não apresentarem as fibras totalmente impregnadas, e os ii) pré-impregnados semi-rígidos ou com impregnação total, caracterizados por apresentarem as fibras totalmente impregnadas. Nos pré-impregnados flexíveis, a impregnação total ocorre durante a transformação, por outro lado, nos pré-impregnados semi-rígidos o reforço já se encontra totalmente impregnado, a transformação é utilizada apenas para conferir a forma final à peça [8,19].

As mechas de reforço impregnadas com termoplástico em pó (*towpregs*), as mechas constituídas por filamentos de termoplástico e reforço dispostos paralelamente (*commingled fibres*) e a mistura de mechas de reforço com termoplástico em pó embebidas numa bainha de termoplástico (FIT) são exemplos de pré-impregnados com impregnação parcial. A pultrusão, o enrolamento filamental e a compressão a quente são as técnicas mais utilizadas na transformação destes materiais [10].

Os pré-impregnados com impregnação total são vulgarmente denominados por *prepregs*, estes encontram-se comercialmente na forma de placas, chapas laminadas, fitas ou bandas e barras. Os *prepregs* na forma de chapa e fita são processadas por compressão a quente, estampagem ou pultrusão [8].

2.1.1.1 Fibras de reforço

Os materiais compósitos poliméricos são normalmente reforçados com fibras de vidro, carbono ou aramidas. As fibras de vidro são, de longe, as mais usadas como reforço, representando 90% do mercado [22].

As fibras de vidro são obtidas através da fusão de sílica com outros minerais, essencialmente óxidos, num forno a mais de 1370°C. A massa fundida é extrudida por

gravidade através de pequenos orifícios, produzindo-se assim os filamentos que são puxados e enrolados em bobines [11,23].

Estas fibras apresentam excelente aderência às matrizes poliméricas, boas propriedades dielétricas, ótima estabilidade dimensional e uma boa relação desempenho mecânico/custo [6]. As fibras de vidro são produzidas com uma variedade de composições químicas, cada uma delas exibindo diferentes propriedades mecânicas e químicas e designadas por uma letra do alfabeto. De toda essa diversidade, o vidro E (elétrico) e o vidro S (elevada resistência mecânica) são os tipos mais utilizados na produção de compósitos de matriz polimérica. O vidro E tem baixo teor alcalino, apresenta boas propriedades elétricas e mecânicas associadas a um baixo custo, este tipo de vidro é empregue em 80% das aplicações em compósitos a nível industrial. As fibras tipo S contêm maior percentagem de alumínio e sílica, o que representa um aumento de 20% a 40% nas propriedades mecânicas. O vidro S é cinco a nove vezes mais caro que o vidro E e destinam-se sobretudo a aplicações militares e aeronáuticas [14,24].

A maioria das fibras de vidro comerciais recebem um tratamento superficial denominado de *sizing*, que se destina a reduzir a abrasão e a eletricidade estática entre os filamentos, evitar a absorção de humidade e melhorar a sua adesão à matriz [25].

As fibras de carbono (FC) são menos usadas que as de vidro, como resultado do seu elevado custo. Estas fibras são, empregues em situações que normalmente requerem elevado módulo e/ou resistência específica. As fibras de carbono são maioritariamente utilizadas nos sectores aeroespacial/defesa, energias renováveis e desporto/lazer. Estes três mercados representam no seu conjunto cerca de 58% do mercado das fibras de carbono.

As FC são obtidas por pirólise de fibras de poliacrilonitrilo (PAN) ou de resíduos resultantes da destilação do petróleo devidamente tratados (*Pitch*) [26].

O processo de fabricação varia ligeiramente segundo o precursor utilizado. No entanto, de forma geral, o método envolve uma primeira etapa em que as fibras precursoras são oxidadas a temperaturas entre os 200 e 300°C de maneira lenta e controlada, para evitar uma excessiva volatilização ou fusão do precursor [27-29]. Posteriormente, a temperatura é elevada para valores entre os 1000 e 2000°C numa atmosfera inerte, permitindo assim remover elementos como o H, O e N existentes nas cadeias moleculares sob a forma de

subprodutos voláteis. Este estágio é denominado por carbonização e o precursor é convertido em fibras de carbono com um arranjo turbostrático [30, 31].

No final desta etapa as fibras apresentam percentagem em massa de carbono entre 92 e 99% [32]. Em alguns casos, o material pode ser ainda aquecido a temperaturas acima dos 2000°C. Esta fase é denominada por grafitação e permite melhorar a orientação das camadas de grafeno [26,33]. As fibras de carbono recém preparadas, apresentam uma fraca adesão às resinas poliméricas, no entanto esta pode ser melhorada através de tratamentos superficiais de oxidação ou de plasma. Por último nas fibras é aplicado um *sizing* que tem como função facilitar a manipulação das fibras assim como melhorar a interface matriz-fibra [34].

As propriedades das FC podem ser moldadas através de variações no processo, produzindo fibras com um módulo de elasticidade melhorado ou com uma tensão de cedência melhorada. As fibras aquecidas no intervalo de 1500 a 2000°C exibem uma tensão de cedência melhorada enquanto as fibras de carbono aquecidas de 2500 a 3000°C exibem um módulo de elasticidade melhorado [32].

As FC podem ser classificadas segundo o grau de orientação preferencial das camadas de grafeno na direção axial das fibras. Baseado neste aspeto, as fibras são denominadas de alto módulo (AM), módulo intermédio (MI) e baixo módulo (BM), sendo classificadas como tipo I, tipo II e tipo III, respetivamente. As fibras de alto módulo têm um elevado grau de alinhamento carbono-carbono, ligados paralelamente na direção axial da fibra. Esse tipo de fibra é preparado por meio de materiais precursores como o *pitch* de mesofase e PAN. As FC de módulo intermédio são obtidas através de precursores PAN. Já as fibras de baixo módulo resultam da pirólise de materiais como o *pitch* isotrópico [29].

Para além das excelentes propriedades mecânicas, as FC apresentam baixo coeficiente de dilatação térmica e boa condutibilidade elétrica e térmica, fazendo com que possam ser empregues em componentes que requeiram elevada estabilidade dimensional e/ou exijam condução de eletricidade e/ou calor [8].

O diâmetro dos filamentos das fibras de carbono produzidas varia em média entre 6 e 12 µm, estas fibras estão disponíveis comercialmente em mecha contínua, tecidos e entrelaçados [35]. A Toray, a Toho e a Zoltek são os maiores fabricantes de fibras de carbono.

Vários estudos têm demonstrado, que sujeitando as fibras precursoras a tratamentos pós-fiação é possível melhorar significativamente as propriedades das fibras de carbono. Bahl *et al.* conseguiu aumentar em 100% a resistência á tração e em 50% o módulo, tencionando fibras precursoras PAN na presença de CuCl numa atmosfera rica em azoto. Jei e Wangxi por sua vez demonstraram que modificando fibras precursoras com uma solução aquosa de $KMnO_4$ é possível aumentarem a resistência á tração em 20% e o alongamento em 30%. Apesar das melhorias evidenciadas nas propriedades, os fabricantes das FC ainda não fazem uso destes tratamentos [27].

Dos reforços mencionados, as fibras aramidas (FA) são as menos empregues. Trata-se de fibras orgânicas produzidas a partir de poliamidas aromáticas. As aramidas podem ser divididas em para-aramidas e meta-aramidas.

As para-aramidas mais utilizadas são comercializadas pela DuPont com Kvlar® e pela Teijin com Twaron®, já as meta - aramidas de maior expressão são a Nomex® da DuPont e a Technora® da Teijin [36]. Estas fibras estão disponíveis na sua cor natural (amarelo), verde, azul e preto, quanto a forma as FA podem ser adquiridas como mecha continua, tecidos e polpa [37].

Estas fibras apresentam uma elevada resistência à tração, ao impacto e à abrasão, boa estabilidade dimensional e oxidativa e boa resistência á chama [38]. A sua baixa resistência à compressão, a dificuldade com que podem ser maquinadas, a fraca aderência às matrizes poliméricas e a baixa resistência à radiação UV têm restringido a sua aplicação [39]. As fibras aramidas são aplicadas em nichos de mercado, dedicados ao fabrico de peças que exijam elevadas resistências ao impacto e à abrasão, com por exemplo, os capacetes à prova de bala ou placas de proteção na parte inferior dos F1 [8,11].

A fraca adesão das FA as matrizes poliméricas esta relacionada com a sua elevada orientação e cristalinidade. As aramidas são sujeitas a tratamentos superficiais de modo a aumentar a sua rugosidade e polaridade, como resultado a adesão às matrizes é melhorada. Os métodos de modificação superficial são normalmente de origem química, no entanto, a diminuição das propriedades mecânicas causados por estes métodos, tem elevado nos últimos anos ao desenvolvimento de outros métodos como é o caso do tratamento por plasma [40].

A Tabela 2.1 compara as fibras de reforço acima mencionadas do ponto de vista das suas propriedades mais relevantes.

Tabela 2.1: Propriedades típicas das fibras de reforço [41].

Material	Diâmetro do filamento (μm)	Densidade	Modulo (GPa)	Resistência á Tração (GPa)	Custo relativo
Vidro, E	7	2,54	70	3,45	Baixo
Vidro, S	15	2,50	86	4,50	Moderado
Carbono, PITCH	7,5	1,9	400	1,8	Elevado
Carbono, PAN	7,5	1,7	240	2,6	Elevado
Arimidas, Kevlar 49	12	1,45	80	2,8	Moderado

2.1.1.2 Matrizes termoplásticas

Na seleção da matriz a utilizar, é fundamental ter em consideração as propriedades térmicas do termoplástico, devido à influência que elas apresentam na processabilidade do pré-impregnado e no desempenho do componente final à temperatura de serviço. As propriedades mecânicas, do material, a absorção de humidade, a resistência química e a resistência aos raios UV são outros parâmetros a ter em conta na seleção da matriz polimérica para uma dada aplicação.

Em aplicações não estruturais e semi-estruturais utiliza-se, normalmente, a poliamida (PA), o polipropileno (PP), o poliéster termoplástico (PET) e o policarbonato (PC). Em aplicações avançadas, onde geralmente é requerida resistência a elevadas temperaturas utiliza-se sobretudo a polisulfona (PSU), a poli-eter-imida (PEI), a poli-eter-eter-cetona (PEEK) e o polisulfureto de fenileno (PPS) [9].

Recentemente, a Solvay Advanced Polymers introduziu no mercado um novo polímero de elevado desempenho, denominado de PrimoSpire[®]. Este polímero é obtido através da modificação do poli-p-fenileno (PPP).

Este termoplástico é apresentado como um dos polímeros mais rígidos e resistentes disponíveis comercialmente. O seu desempenho mecânico é mantido dentro de uma ampla gama de temperaturas. Por exemplo, as propriedades mecânicas mantêm-se inalteradas até $-232,15^{\circ}\text{C}$. O PPP apresenta ainda uma grande resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito e, tratando-se dum termoplástico altamente aromático, possui inerentemente resistente à chama. O PrimoSpire[®] apresenta ainda excelente resistência química, sendo solúvel em poucos solventes orgânicos (*e.g. methylene*

chloride, N-methyl pyrrolidinone, dimethyl acetamide). A figura 2.1 apresenta a fórmula de estrutura do poli-p-fenileno modificado.

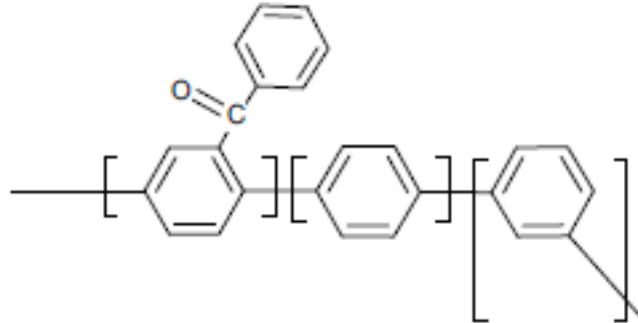


Figura 2.1:Formula de estrutura do poli-p-fenileno [20].

A Solvay Advanced Polymers possui dois tipos de PPP, o PR-120 empregue, essencialmente, em extrusão e o PR-250 utilizado em injeção. O primeiro apresenta menos de 25% mol de meta-fenileno na sua estrutura química, enquanto o segundo apresenta 40-60% mol de meta-fenileno.

O PrimoSpire[®] pode ser utilizado na produção de pré-impregnados termoplásticos de fibras contínuas, através de processos baseados na fusão direta do polímero, uso de solventes e mistura íntima pó termoplástico com as fibras de reforço [20]. As técnicas de impregnação de termoplásticos com fibras contínuas serão descritas no parágrafo 2.1.2.

A poliamida é o polímero mais utilizado como matriz em compósitos termoplásticos. Isto deve-se sobretudo à sua aplicação em peças injetadas para mercados de grande consumo, como é o da indústria automóvel [8]. A tabela 2.2 apresenta as propriedades típicas de alguns termoplásticos usados em compósitos.

Tabela 2.2: Propriedades típicas dos termoplásticos mais usados em compósitos [21].

<i>Material</i>	<i>Densidade</i>	<i>Módulo (GPa)</i>	<i>Resistência à tracção (MPa)</i>	<i>T_{fusão} (°C)</i>	<i>T_{processo} (°C)</i>	<i>Custo (€/kg)</i>
Polipropileno (PP)	0,9	1,4	31-42	165	190-230	1,64
Poliéster termoplástico (PET)	1,3	3,5	48-73	250	260-350	4,55
Poliamida 6 (PA6)	1,1	3,0	35	220	230-285	3,00
Polisulfureto de fenileno (PPS)	1,35	3,4	48-87	285	310-335	7,99
Poli-eter-imida (PEI)	1,26	3,4	62-150	-	340-370	17,93
Poli-eter-eter-cetona (PEEK)	1,3	3,6	70-105	335	340-400	83,70

2.1.2 Produção de pré-impregnados de matriz termoplástica de fibras contínuas

O processamento de materiais compósitos termoplásticos consiste na impregnação das fibras, consolidação e transformação. A impregnação das fibras com polímero é uma etapa crucial no fabrico destes materiais, visto que é neste ponto que se cria a sinergia entre a matriz e o reforço do qual resultam as propriedades únicas que o compósito apresenta [42].

Através da lei de Darcy, é possível relacionar a velocidade do fluxo de polímero, u_p , com a pressão aplicada, P , a permeabilidade das fibras, K , a viscosidade do termoplástico, η , e o comprimento a impregnar, a .

$$u_p = \frac{da}{dx} = \frac{KP}{\eta a} \quad (2.1)$$

Integrando a equação 2.1 e considerando constante a permeabilidade durante o processo de impregnação, o tempo necessário para garantir a impregnação completada do reforço, t_{imp} , pode ser estimado através de:

$$t_{imp} = \frac{\eta a^2}{2KP} \quad (2.2)$$

Da equação anterior, torna-se evidente que o tempo de impregnação é proporcional à viscosidade. Como a viscosidade dos termoplásticos é bastante superior à dos termoendurecíveis, os processos de impregnação utilizados são diferentes.

Aumentando a pressão, é possível acelerar o processo de impregnação, contudo, a pressão máxima, P , aplicada está limitada ao tamanho do equipamento utilizado e há resistência à compressão das fibras. Além disso, a permeabilidade das fibras, K , diminui com o aumento da pressão aplicada, dificultando a impregnação. A Equação 2.2 também revela que o fator que mais influencia o tempo de impregnação é o quadrado do comprimento a impregnar, a .

Tendo por base as considerações anteriores, diferentes técnicas têm vindo a ser desenvolvidas na tentativa de obter pré-impregnados de matriz termoplástica reforçados com fibras contínuas com qualidade e custos acessíveis [43]. As técnicas de produção de

pré-impregnados podem ser divididas em: técnicas que se baseiam na redução da viscosidade e técnicas que se baseiam na redução do comprimento a impregnar [42].

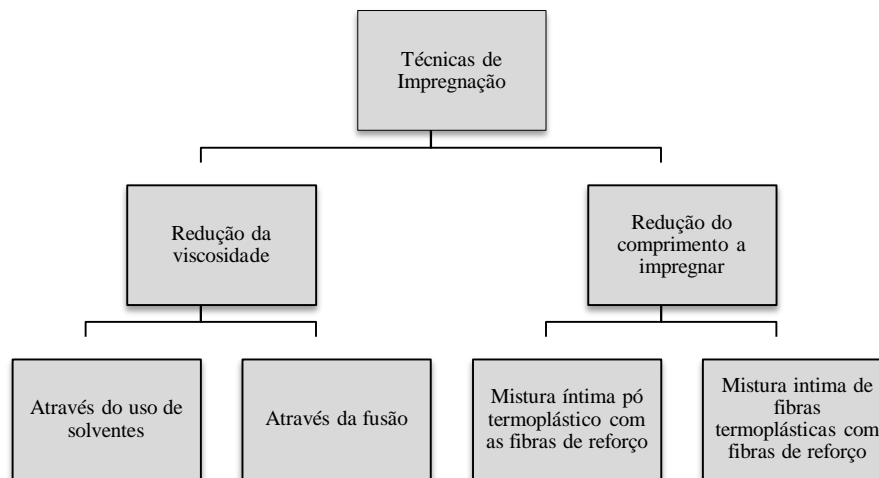


Figura 2.2: Técnicas de impregnação de termoplásticos (adaptado de [19]).

Como se pode verificar através da figura 2.2, no primeiro caso, incluem-se todos os processos baseados na utilização de solventes e de termoplásticos fundidos. A partir destes processos, são produzidos os pré-impregnados com impregnação total. No segundo, incluem-se os processos baseados na mistura íntima de termoplástico em pó com fibras de reforço e os processos baseados na mistura íntima de fibras termoplásticas com fibras de reforço. Os pré-impregnados flexíveis são obtidos através destes métodos [23].

2.1.2.1 Impregnação por termoplástico fundido

A impregnação por termoplástico fundido é a forma mais comum de impregnar fibras contínuas de reforço [44]. A co-extrusão e a pultrusão em contínuo são os métodos de impregnação mais utilizados. Na co-extrusão, o termoplástico fundido é extrudido para uma fiação onde passam as fibras de reforço. No caso da pultrusão em contínuo, as fibras atravessam um banho de termoplástico fundido e, neste processo, são empregues conjuntos de rolos para separar os filamentos, melhorando, desta forma, a impregnação.

Nas técnicas de impregnação por termoplástico fundido, apresentam resultados satisfatórios quando são empregues polímeros com baixa viscosidade, como o *Nylon 66*, podendo ser utilizadas velocidades de processamento até 30 m/min [43].

Todavia, a utilização de termoplásticos de elevada viscosidade, dificulta significativamente o processo, conduzindo a um aumento forçado da pressão e temperatura a aplicar, o que torna o custo do processamento bastante elevado e apenas viável para grandes volumes de produção [39,45]. A utilização destas matrizes reduz consideravelmente a velocidade de processamento, não sendo garantido o total preenchimento dos interstícios das fibras [43].

2.1.2.2 Impregnação por solução

Nesta técnica, adiciona-se um solvente a um termoplástico em pó de modo a diminuir a viscosidade do mesmo, facilitando a impregnação das fibras. A granulometria do pó e a sua concentração na solução são as variáveis mais importantes neste processo. Geralmente, apenas podem ser usados polímeros amorfos, devido à insolubilidade dos semicristalinos [19,46].

Apesar do aspeto atrativo dos impregnados obtidos, esta técnica apresenta algumas desvantagens, destacando-se a dificuldade em obter solventes que se adequem a todos os termoplásticos e a necessidade de remover o seu excesso após impregnação. Uma inadequada remoção do solvente pode levar à formação de vazios, condicionando o desempenho do compósito às condições de serviço. A remoção do solvente é normalmente um processo dispendioso e pouco ecológico [42,47].

Os pré-impregnados a passe de PEI da Tem Cate comercializado sob o nome de CETEX[®], tem sido bastante utilizados pela Airbus e Fokker nas suas aeronaves [48].

2.1.2.3 Impregnação por mistura íntima de fibras termoplásticas e de reforço

Esta tecnologia, desenvolvida, pela NASA permite produzir pré-impregnados flexível designado por *commingled fibers*, através da combinação de filamentos de reforço e de polímero [49]. A grande flexibilidade destes materiais permite que estes sejam convertidos na forma de tecidos [42,43]. Bernet *et al.* demonstraram que estes pré-impregnados são adequados no processamento rápido de formas complexas [50].

Normalmente as peças que resultam da transformação destes pré-impregnados, apresentam zonas mais ricas em polímero do que outras. Para se assegurar uma boa distribuição do polímero no compósito, é essencial que os filamentos da matriz e do reforço tenham diâmetros semelhantes [51]. Geralmente, são utilizados polímeros com

baixo peso molecular, para facilitar o processo de impregnação. O *commingled fiber* de maior sucesso comercial é uma combinação de fibras de vidro tipo-E e de polipropileno, comercializado sob o nome de *Twintex*® pela empresa francesa Saint-Gobain Vetrotex [52].

2.1.2.4 Impregnação por mistura íntima pó termoplástico com as fibras de reforço

Esta tecnologia de produção de pré-impregnados foi usada, pela primeira vez, em 1973, por Price, no entanto, só no final da década 1980, é que a comunidade científica e a indústria demonstraram interesse no processo [42].

A mistura pó termoplástico com as fibras de reforço apresenta algumas vantagens comparativamente aos processos mencionados anteriormente, destacando-se a combinação de fibra e matriz sem influência significativa da viscosidade do termoplástico, a não utilização de solventes e a inexistência de operações caras como as que envolve o fabrico de filamentos termoplásticos usadas na produção de *commingled fibers*. Os pré-impregnados obtidos por esta técnica designam-se *towpregs* [43,47].

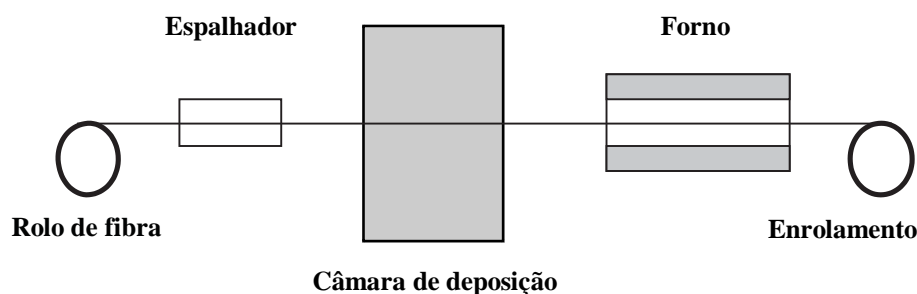


Figura 2.3: Esquema da deposição de polímero em pó sobre fibras contínuas [8].

Na figura 2.3, está esquematizado este método de produção. A mecha de fibra desenrolada da bobine passa por um espalhador, onde ocorre a separação dos filamentos. De seguida, a fibra mergulha numa câmara de deposição, onde o termoplástico em pó é depositado sobre a superfície dos filamentos. Posteriormente, faz-se passar a mecha de fibra num forno, para que ocorra uma conveniente adesão do pó aos filamentos. Por último, o pré-impregnado é arrefecido e enrolado em bobines no final do aparelho.

Ao longo dos tempos, variantes do processo original têm sido ser desenvolvidas, algumas delas podem ser consultados nas seguintes referências [42,47]. No presente trabalho, foi

utilizado o protótipo desenvolvido por Nunes *et al.*, que se encontra esquematizado na figura 2.4.

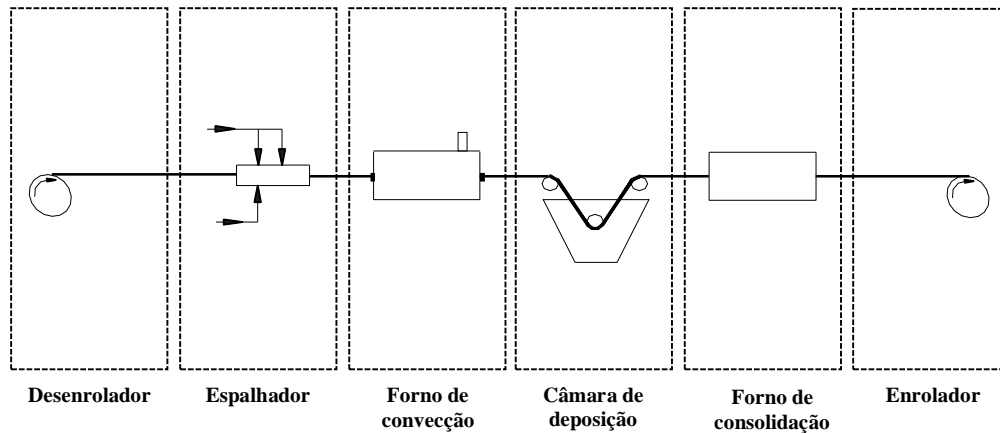


Figura 2.4: Esquema do equipamento de produção de *towpregs* do PIEP (modificado de [53]).

Como é possível observar na figura anterior, esta máquina pode ser dividida em seis módulos: duas bobinas com movimentos sincronizados de rotação (desenrolador e enrolador final das fibras) responsáveis pela velocidade de produção dos *towpregs*, o espalhador das fibras, o forno de convecção, a câmara de deposição e o forno de consolidação, que garante a conveniente adesão do termoplástico em pó às fibras.

O espalhador separa os filamentos da mecha de fibra, aumentando assim a sua superfície de contacto. Como consequência, a distância que a partícula de pó necessita de percorrer para chegar ao centro fibra diminui. Este módulo tem influência direta na flexibilidade do pré-impregnado.

De forma a aumentar a adesão entre as fibras e o pó, aquelas são aquecidas num forno de convecção. A fixação promovida por este módulo é transitória e tem como objetivo durar até que a mecha entre no forno de consolidação.

Como é possível verificar através da figura 2.4, na câmara de deposição, a fibra passa por um conjunto de rolos que tem uma dupla função: forçar as partículas de pó a alojarem-se nos interstícios da fibra e manter os filamentos da fibra devidamente espalhados.

O forno de consolidação tem um papel bastante importante na qualidade apresentada pelo *towpreg*. Para que haja uma conveniente adesão entre as fibras e o pó, é necessário que o polímero seja aquecido acima da sua temperatura de fusão.

A forma e o tamanho das partículas de pó são fatores que afetam a impregnação das fibras e posterior consolidação; é desejável que as partículas de pó tenham uma forma arredondada e que o seu diâmetro seja semelhante ao das fibras utilizadas como reforço [12]. Na prática, devido a questões económicas, pós com granulometria de 400 μm têm sido usados com sucesso.

Os towpregs podem ser convertidos cuidadosamente em formas têxteis tais como: tecidos, entrelaçados (*braiding*) e malhas (*knitting*), sendo posteriormente transformados por compressão em formas bastante complexas [54].

A ATOCHEM em França desenvolve um derivado do *towpreg* denominado FIT (*Fibre Impregneé de Thermoplastic*) [49]. O FIT é constituído por *towpreg* embebido numa bainha exterior tubular em termoplástico. Os primeiros FIT foram produzidos a partir de aramidas com Poliamida 12 (PA12) [55]. Para se obter este derivado, primeiro, produz-se o *towpreg*, numa linha de deposição de termoplástico em pó sobre fibras e, depois, este é feito passar por uma co-extrusora, onde é envolvido pela bainha termoplástica.

2.1.3 Transformação pré-impregnados de matriz termoplástica de fibras contínuas

A qualidade final de uma peça é determinada pelo método de fabrico e respetivas variáveis de processamento. A otimização das variáveis de processamento é função do equipamento utilizado e das propriedades intrínsecas dos materiais [8]. A pressão aplicada, temperatura e tempo de ciclo são os parâmetros mais relevantes.

Tempos de ciclos elevados tendem a diminuir a reprodutividade da peça, aumentando os custos de produção. Por outro lado, ciclos bastante curtos tendem a provocar tensões residuais na peça [12]. Operacionalmente, tenta-se estabelecer um intervalo de combinações possíveis entre as variáveis de processamento para os diferentes processos de fabrico, de forma a obter-se peças finais com as características pretendidas. O intervalo de combinações possíveis é designado por “janela de processamento”.

Os processos de transformação de termoplásticos reforçados com fibras contínuas mais utilizados são a moldação por compressão a quente, o enrolamento filamentar e a pultrusão.

2.1.3.1 Compressão a quente

A compressão a quente é um método bastante utilizado no fabrico de compósitos. Através deste processo, é possível fabricar componentes estruturais para a indústria automóvel, equipamentos elétricos e eletrónicos, peças para a indústria da construção e mobiliário urbano.

As peças processadas apresentam elevadas quantidades de reforço, o que permite obter boas propriedades mecânicas.

Os compósitos são fabricados colocando a matéria-prima na cavidade do molde, o qual se encontra entre os pratos de uma prensa, aplicando um ciclo de pressão e temperatura. Geralmente, o molde é aquecido até à temperatura de processamento, seguindo-se a aplicação da pressão, mantendo a temperatura durante o tempo de consolidação necessário. Por fim, o molde é arrefecido, retira-se a pressão e extrai-se o material compósito [6].

O ciclo de produção depende da temperatura, complexidade e peso da peça moldada, podendo variar entre os 30 segundos e os 4 minutos [9].

Este processo de transformação é bastante utilizado para validar modelos de teóricos de consolidação de pré-impregnados. Para este facto, contribui a simplicidade do processo e o fácil controlo das variáveis operatórias mais importantes: pressão e temperatura [39].

2.1.3.2 Enrolamento filamentar

O enrolamento filamentar é uma técnica utilizada no fabrico de estruturas compósitas, no qual as fibras impregnadas são dispostas sobre um mandril em rotação de acordo com ângulos pré-definidos [14]. Através da sincronização da velocidade linear do distribuidor das mechas com a velocidade de rotação do mandril, conseguem-se obter padrões de enrolamento muito complexos, com controlo do ângulo de enrolamento.

O ângulo de orientação das fibras pode variar desde pequenos ângulos longitudinais até enrolamentos circunferenciais (cerca de 90°), permitindo, deste modo, tirar partido do comportamento anisotrópico dos materiais compósitos, por forma a obterem-se estruturas com o desempenho mecânico desejado [5,14].

Os equipamentos de enrolamento filamental de pré-impregnados termoplásticos resultam da adaptação de máquinas convencionais usadas no fabrico de termoendurecíveis reforçados, apenas sendo necessário instalar sistemas de aquecimento para fundir/amolecer o termoplástico e de consolidação das camadas enroladas [8].

As peças obtidas por enrolamento filamental apresentam elevadas percentagens de fibras (60 a 75%) em massa, sendo que o tamanho destas pode variar entre alguns centímetros até muitos metros [9]. Os produtos produzidos através desta tecnologia cobrem uma ampla área de diferentes mercados tais como: indústria automóvel, aeronáutica, desportiva, militar. Reservatórios de pressão, tanques, eixos, secções de fuselagem, raquetes de ténis são alguns exemplos de aplicações [5].

2.1.3.3 Pultrusão

A pultrusão é um processo contínuo, através do qual se podem produzir perfis de secção constante, ocos ou maciços, de diferentes formas. Esta técnica, desenvolvida por W. Brandt Goldsworthy, foi patenteada em 1951. Este equipamento apresenta um elevado grau de automatização e elevada cadência de produção o que permite reduzir os custos de fabrico [56].

Os perfis pultrudidos apresentam excelentes características mecânicas na sua direcção longitudinal, em virtude da orientação e elevadas percentagens ponderais de fibras (30 a 70%) que permite obter [9]. Os reforços podem ser utilizados na forma de bobinas, mantas e tecidos [52].

Os equipamentos utilizados na pultrusão de perfis em termoplástico reforçado resultam da adaptação de máquinas convencionais já usadas para fabrico de perfis em termoendurecível reforçado. Na pultrusão de perfis de matriz termoplástica utilizam-se, normalmente, duas feiras, uma de aquecimento e outra de arrefecimento. A feira aquecida apresenta habitualmente um canal interior convergente para permitir pressurizar e consolidar o polímero fundido enquanto a feira arrefecida apresenta uma secção transversal constante [57,58].

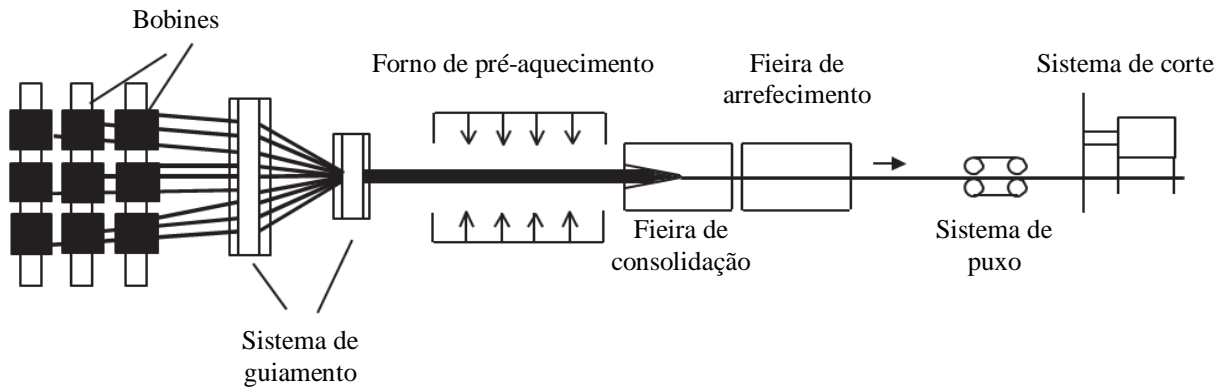


Figura 2.5:Esquema de um equipamento de pultrusão de termoplásticos reforçados [53].

Na figura 2.5 apresenta-se esquematicamente um equipamento de pultrusão para compósitos de matriz termoplástica. A matéria-prima em bobine é guiada para um forno de pré-aquecimento que se encontra a uma temperatura adequada. Após ter sido pré-aquecido, o material é então conduzido até à fieira de consolidação, onde adquire a secção transversal pretendida para o perfil. De seguida, este é obrigado a passar pela fieira de arrefecimento de modo a solidificar [58]. Por último, o perfil final é puxado até ao sistema de corte, onde é cortado com os comprimentos pretendidos.

A maioria dos estudos efetuados em pultrusão de compósitos termoplásticos envolve o uso de pré-impregnados como matéria-prima. As *tapes* e os *commingled fibres* são as formas mais comuns. No entanto, existem alguns equipamentos que utilizam fieiras com sistemas de injeção de precursores termoplásticos de baixa viscosidade, tornando possível o emprego direto das mechas de fibras de reforço sem qualquer pré-impregnação [59].

A implementação a nível comercial destes equipamentos é condicionada, pelas baixas velocidades de produção, quando comparados com os equipamentos utilizados no fabrico de perfis em termoendurecível [57].

Os custos associados a um equipamento de pultrusão podem ser determinados através da expressão seguinte:

$$C_{pro} = C_{Mat} + C_{lab} + C_{oh} \quad (2.3)$$

onde

C_{Mat} representa os custos com o material,

C_{lab} os custos de laboração e,

C_{oh} são custos indiretos.

Informações adicionais sobre as variáveis utilizadas para determinar os custos do processo podem ser consultadas no trabalho realizado por Y. Kin [60].

2.2 Referências

- [1] F. C. Campbell, *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. Oxford: Elsevier, 2004.
- [2] G. H. Staab, *Laminar Composites*. Wobum: Butterworth Heinemann, 1999.
- [3] S. G. Advani, E. M. Sozer, *Process Modeling in Composites Manufacturing*. Nova Iorque: Marcel Dekker, 2003.
- [4] R. E. R. Lobo, “Estudo e Desenvolvimento do Comando e Controlo para um Equipamento Industrial Automatizado de Enrolamento Filamentar”, Tese de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2012.
- [5] D. S. C. Santos, “Estudo do Impacto a Baixa Velocidade em Compósitos Epóxi/fibra de vidro Nanoreforçados”, Tese de mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.
- [6] L. N. M. Torres, “Fabrico e Aplicação de Towpregs de FV/PVC em Tubagens”, Tese de mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2008.
- [7] Y. Yang, *et al.*, “Recycling of Composite Materials”, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 51, no. 10, pp. 53-68, 2012.
- [8] J. F. Silva, “Pré-impregnados de Matriz Termoplástica: Fabrico e Transformação por Compressão a Quente e Enrolamento Filamentar”, Tese de doutoramento, Universidade do Porto, Porto, 2005.
- [9] S. M. M. L. Correia, “Estudo da Tolerância ao Dano de Tubagens em PRFV”, Tese de mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2008.
- [10] J. C. V. Pereira, “Reservatórios em Material Compósito para Fluidos sob Pressão” Tese de mestrado, Universidade do Minho, Guinares, 2007.
- [11] D. B. Miracle, S.L. Donaldson, Ed., *Composites*. ASM Handbook, 2001.
- [12] Anthony Kelly and Carl Zweben, Ed., *Comprehensive Composite Materials, Volume 2-Polymer Matrix Composites*. Pergamon, 2000.

- [13] U. I. Thomann “Direct Stamp Forming of Non-Consolidated Carbon/Thermoplastic Fibre Commingled Yarns”, Tese de doutoramento, Ècole Polytechnique Fédérale de Zurich, Zurich, 2003.
- [14] J. R. S. Costa, “Projecto e Desenvolvimento de Equipamento Industrial para Aquecimento de Material Compósito Polimérico Reforçado com Fibras Contínuas”, Tese de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2012.
- [15] S. Fu, *et al.*, “Tensile Properties of Short Glass fiber and Short Carbon Fiber Reinforced Polypropylene Composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 10, pp. 1117-1125, 2000.
- [16] S. Fu, B. Lauke, “Effects of Fiber Length and Fiber Orientation Distributions on the Tensile Strength of Short-Fiber-Reinforced Polymers”, *Composites Science and Technology*, vol. 56, no. 10, pp. 1179-1190, 1996.
- [17] D. L. Krasteva, “Integrated Prediction of Processing and Thermomechanical Behavior of Long Fiber Thermoplastic Composites”, Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, 2009.
- [18] F. Henning, H. Ernst, R. Brüssel, “LFTs for Automotive Applications”, *Reinforced Plastics*, vol. 49, no. 2, pp. 24-33, 2005.
- [19] J. K. Kocsis, Ed., *Polypropylene - An A-Z reference*. Londres: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [20] Myer Kutz, *Applied Plastics Engineering Handbook - Processing and Materials*. Waltham: Elsevier, 2011.
- [21] S. Joncas, “Thermoplastic Composite Wind Turbine Blades - An Integrated Design Approach”, Tese de doutoramento, Delft University, Delft, 2010.
- [22] E. Greene, *Marine Composites*, 2ª ed. Annapolis: Eric Greene Associates, 1999.
- [23] M. S. D. Santos, “Fabrico, Caracterização e Transformação por Compressão a quente de Pré-impregnados de Matriz Termoplástica”, Tese de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2013.

-
- [24] M. F. C. A. Pinheiro, “Compósitos Avançados Reforçados com Fibras Naturais para Construção”, Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.
- [25] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 3ª ed. Danvers: Taylor & Francis, 2008.
- [26] D. D. L. Chung, *Carbon Fiber Composites*. Newton: Butterworth Heinemann, 1994.
- [27] A. F. Ismail, “Post Spinning and Pyrolysis Processes of Polyacrylonitrile (PAN) - base Carbon Fiber and Activated Carbon Fiber: A review”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 93, pp. 1-13, 2012.
- [28] S. CHAND, “Review Carbon Fibers for Composites”, *Journal of Materials Science*, vol. 35, no. 6, pp. 1303-1313, 2000.
- [29] J. J. Rohwedder, *et al.*, “Fibras de Carbono: Aplicações em Eletroanalítica como Material Eletrodico”, *Química Nova*, vol. 22, no. 4, 1999.
- [30] X. Huang, “Fabrication and Properties of Carbon Fibers”, *Materials*, vol. 2, no. 4, 2009.
- [31] L.I. Medeiros “Obtenção de Nanocompositos, Nanodiamante sobre Fibra de Carbono e Nanotubo de Carbono sobre Fibra de carbono”, Tese de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- [32] M. T. P. Silva, “Estudo de Novas Aplicações da Fibra de Carbono nos Materiais de Construção”, Tese de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2007.
- [33] B. J. M. SILVA, “Estruturas Inteligentes Utilizando Betão e Polímero Reforçado com Fibras de Carbono”, Tese de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2005.
- [34] A. Kelly, C. Zweben, Ed., *Comprehensive Composite Materials, Volume 1 - Fiber Reinforcements and General Theory of Composites*. Pergamon, 2000.
- [35] T. Matsuo, “Fiber Materials for Advanced Technical Textiles”, *Textile Progress*, vol.40, no. 2, pp. 87-121, 2008.
-

- [36] D. Bhattacharyya, S. Fakirov Ed., *Synthetic Polymer-Polymer Composites*. Munique: Hanser Publishers, 2012.
- [37] S. T. Peters, *Handbook of Composites*, 2nd ed. Cambridge: Chapman & Hall, 1998.
- [38] D. V. Rosato, D. V. Rosato, *Reinforced Plastics Handbook*, 3ª ed. Oxford: Elsevier, 2004.
- [39] L. Amorim, “Optimização do Processamento de Pré-impregnados e Compósitos de Matriz Termoplástica reforçada com Fibras Contínuas”, Tese de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2010.
- [40] M. Xi, “Surface Modification of Aramid Fiber by air DBD Plasma at Atmospheric Pressure with Continuous on-line Processing”, *Surface & Coatings Technology*, vol. 202, no. 24, 2008.
- [41] S. K. Mazumdar, *Composites Manufacturing - Materials, Product, and Process Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [42] M. Conner, “Consolidation Mechanisms and Interfacial Phenomena in thermoplastics Powder Impregnated Composites”, Tese de doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 1995.
- [43] C. Zaniboni, “Oligomere Technologies for Cost-Effective Processing High-Performance Polyphthalamide Composites”, Tese de doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Zurich, Zurique, 2010.
- [44] S. Béland, *High Performance Thermoplastic Resin and Their Composites*. Park Ridge: Noyes Publications, 1990.
- [45] T. Weustink, “Development of a Rapid Thermoplastic Impregnation Device”, Tese de doutoramento, Delft University, Delft, 2008.
- [46] A. M. Vodermyer, J. C. Kaerger, G. Hinrichsen, “Manufacture of High Performance Fiber Reinforced Thermoplastics by Aqueous Powder Impregnation”, *Composites Manufacturing*, vol. 4, no. 3, pp.123-132, 1996.
- [47] J. Bradley, “Consolidation of Thermoplastic Powder-Coated Towpreg”, Tese de mestrado, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1997.

-
- [48] A.C. Long, Ed., *Design and Manufacture of Textile Composites*. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [49] D. W. Kim, “Thermoplastic Film Infusion Process for Long-fiber Reinforced Composites using Thermally Expandable Elastomer Tools”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, no. 7, pp. 673-680, 2003.
- [50] L. L. Lebel, “Manufacturing of Braided Thermoplastic Composites with Commingled Fibers”, Tese de mestrado, *Universidade de Concórdia*, Montreal, 2005.
- [51] A. Miller, A.G. Gibson, “Characterisation and Modelling of the High Speed Pultrusion of Commingled Gass fibre/polypropylene Composites”, in *11th International Conference on Composite Materials*, Gold Coast: Woodhead Publishing, 1997.
- [52] M. Kutz, Ed., *Handbook of Materials Selection*. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2002.
- [53] P. J. Novo, *et al.*, “Development of a New Pultrusion Equipment to Manufacture Thermoplastic Matrix Composite Profiles” in *15th European Conference on Composite Materials*, Veneza, 2012.
- [54] C. Long, Ed., *Composites Forming Technologies*. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [55] L. G. Meyers, “Preliminary Experiments on Filament Winding Nylon Impregnated Glass Fibers (FIT)”, Relatório LR-545, 1987.
- [56] S. G. Advani, K.T. Hsiao, Ed., *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites*. Padstow: Woodhead Publishing, 2012.
- [57] R. S. Davé, A.C. Loos, Ed., *Processing of Composites*. Munique: Hanser Publishers, 2000.
- [58] G. Akovali, Ed., *Handbook of Composite Fabrication*. Rockville: Rapra Technology, 2001.

- [59] A. Luisier, *et al.*, “Reaction Injection Pultrusion of PA12 Composites: Process and Modelling”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, no. 7, pp. 583-595, 2003.
- [60] Y. Kin, “Study on the Mechanical Properties and Performance of Selected Thermoplastic and Thermosetting”, Tese de doutoramento, University of Hong Kong, Hong Kong, 2011.

Capitulo 3

Método de Taguchi

(Página intencionalmente deixada em branco)

Este capítulo destina-se a rever e apresentar os principais conceitos teóricos em que se baseia o método de Taguchi, o qual foi usado neste trabalho para permitir otimizar as condições de produção dos *towpregs* na linha de deposição de polímero em pó.

3.1 Método de Taguchi

O desenho de experiências (*design of experiment* - DOE) consiste na análise dum sistema (processo ou produto), através da realização de um teste ou uma série de testes em que se alteram deliberadamente as variáveis de entrada do sistema de modo a que se possam observar e identificar as razões que provocaram as alterações obtidas nas variáveis de saída (respostas) [1,2]. Este conceito foi introduzido por Fisher na década de 1920 [3].

Anos mais tarde, o japonês Genichi Taguchi desenvolveu uma metodologia, baseada no desenho de experiências, com o objetivo de melhorar a qualidade dos telefones Japoneses, reduzindo os custos e número de experiências e de testes [1,4]. Este método ficou conhecido como “Método de Taguchi” ou “Projecto Robusto” [5].

Desde que foi usado na década de 40 do séc. XX [4], o método de Taguchi tem vindo a ser cada vez mais empregue como ferramenta de otimização de processos e produtos em vários setores, como por exemplo, o alimentar, desportivo, energético, automóvel, aeroespacial e o da saúde [6,7].

Dentro da medicina, Buruk A. Kondur *et al.* aplicou o método para otimizar do processo de hemodiálise. Na área de engenharia de materiais, Mason e Prevéy aplicaram-no de forma iterativa na melhoria das propriedades de um aço sujeito a tratamento térmico. Ibrahim Türkmen *et al.* na melhoria do comportamento mecânico de betão de alta resistência.

No entanto, é na área do processamento que ele é mais empregue. Muzammil *et al.* utilizou-o para otimizar a fundição de uma engrenagem. Hwan Lee e Heon Lee otimizaram os parâmetros de corte de forma a minimizar a rebarba numa operação de fresagem de topo. Gros e Kureková utilizaram-no para otimizar o posicionamento de uma máquina de corte por plasma com três tochas [1]. Silva *et al.* também utilizou este método para otimizar o processo de enrolamento filamentar de compósitos de matriz termoplástica [8].

O objetivo do método é reduzir a variação do sistema [5]. A redução da variação é atingida quando se selecionam os melhores níveis dos fatores de controlo, que afetam de forma significativa a resposta, permitindo que o sistema seja menos sensível à variação do ruído, ou seja, mais robusto [4,9].

Para Taguchi, existem dois tipos de variáveis/fatores no planeamento de experiências: fatores de controlo e fatores de ruído. Os fatores ou parâmetros de controlo são aqueles que se mantêm constantes durante o processo e cuja escolha depende do operador. Os fatores de ruído são fatores incontrolláveis que afetam as características dos produtos [10]. Os fatores de ruído podem ser divididos em:

- Ruído Externo - Fatores ambientais, tais como: temperatura ambiente, humidade. Condições de uso que possam prejudicar as funções do produto.
- Ruído Interno - Alterações que ocorrem quando um produto se deteriora durante o armazenamento, por fricção ou por desgaste das peças em uso.
- Ruído unidade a unidade - Diferenças entre produtos individuais devido a imperfeições no processo de fabrico, como por exemplo variações no *setup* da máquina.

A figura 3.1 representa o esquema genérico de um sistema.

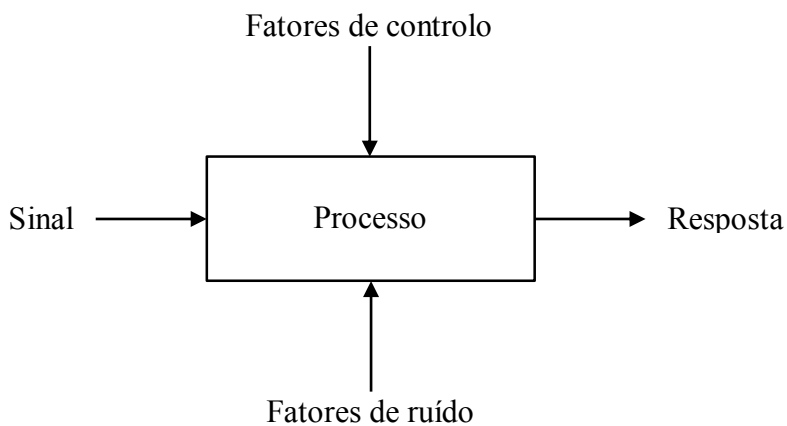


Figura 3.1: Esquema genérico de um sistema.

Contrariamente ao que acontece no desenho de experiências convencional proposto por Fisher, conhecido por plano fatorial, em que todas as combinações possíveis são experimentadas, o que implica um elevado número de ensaios e, conseqüentemente, um dispêndio de tempo e de dinheiro excessivo, Taguchi utiliza planos fatoriais fracionários,

compostos por experiências que correspondem a determinados pontos do plano fatorial, o que permite reduzir número de experiências necessárias para estimar o modelo do sistema [11].

3.2 Descrição do Método

Taguchi não define uma estratégia fixa a adotar quanto à aplicação do seu método, porém, existem etapas que, obrigatoriamente, têm de ser realizadas segundo determinada ordem [1]. Depois de consultar algumas referências [12-16], foi possível construir o diagrama de fluxo presente na figura 3.2

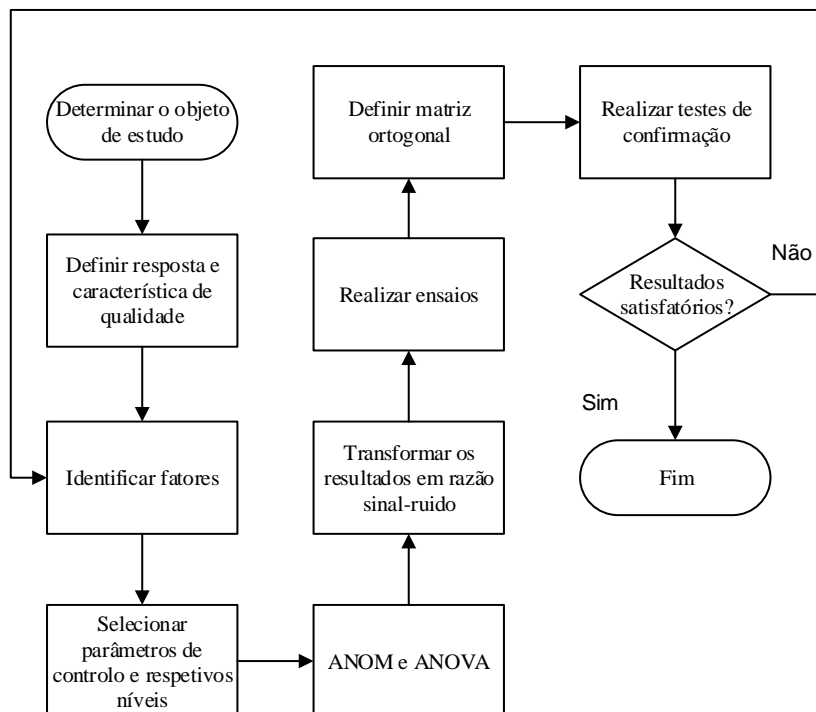


Figura 3.2: Esquema métodos de Taguchi.

O método Taguchi inicia-se com a determinação do objetivo de estudo. O próximo passo é determinar qual a resposta. A resposta é o parâmetro cuja variação tem um efeito significativo na qualidade final do produto. Escolhida a resposta a utilizar, é necessário decidir que característica de qualidade que melhor se adapta ao estudo.

Existem três tipos de característica de qualidade: Nominal-Melhor, Menor-Melhor e Maior-Melhor.

No caso da característica Nominal-Melhor, pretende-se atingir um valor previamente definido. Por sua vez, com a característica Menor-Melhor, pretende-se atingir o menor valor possível. Quando é selecionada a característica Maior-Melhor, pretende-se atingir o maior valor possível [17,18].

Selecionada a característica da qualidade, identificam-se os fatores que podem ter um efeito significativo na resposta. Os fatores devem ser, então, classificados em fatores de ruído e fatores de controlo. Depois de separados, define-se o número de níveis dos fatores de controlo.

O próximo passo é a escolha da matriz. A metodologia desenvolvida por Taguchi tem como base a utilização de matrizes ortogonais. As matrizes ortogonais possibilitam a recolha de uma amostra pequena de dados e obter informação significativa a partir desses dados. A utilização deste tipo de matrizes é mais eficiente em termos económicos, não sendo necessário testar todas as combinações dos fatores [9].

A nível exemplificativo, se forem identificados 7 fatores com 2 níveis cada, e se for utilizado o plano fatorial completo, o número total de experiências seria de $N_t=2^7=128$ testes. No entanto, para este caso específico, Taguchi apresenta uma matriz ortogonal L_8 , em que o índice 8 diz respeito ao número de experiências a realizar [4].

Quando se seleciona a matriz ortogonal, procura-se que esta seja a mais pequena possível, mas que consiga conter a informação necessária. A escolha da matriz está sempre dependente do número de fatores e de interações entre eles, assim como do número de níveis associado a cada fator [19].

Realizados os ensaios, procede-se à análise dos dados. Taguchi sugere a utilização de uma medida estatística chamada razão sinal-ruído (S/N), para avaliar os resultados experimentais [14]. A utilização da razão sinal-ruído permite identificar os fatores que afetam a variação. Foram desenvolvidas várias expressões que permitem transformar os dados numa razão sinal-ruído, dependendo do tipo de característica da qualidade, sendo as mais conhecidas as seguintes: Menor - Melhor, Nominal - Melhor e Maior - Melhor.

Conforme cada caso, são aplicadas as seguintes fórmulas matemáticas:

$$\text{Menor - Melhor} = -10 \log \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (3.1)$$

$$\text{Nominal} - \text{Melhor} = 10 \log \frac{\bar{y}^2}{\sigma^2} \quad (3.2)$$

$$\text{Maior} - \text{Melhor} = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (3.3)$$

onde,

y_i é o resultado obtido,

\bar{y} é a média e,

σ^2 a variância.

Transformados os dados em razão sinal-ruído, aplica-se a análise da média (*analysis of mean-ANOM*) para identificava-se os melhores níveis dos fatores [20]. O primeiro passo da ANOM consiste em calcular a média da razão sinal-ruído (S/N), para cada nível dos fatores e interações existentes. A média da razão S/N de um fator l no nível i é dada por:

$$(M)_{Fator=l}^{Nivel=i} = \frac{1}{n_{il}} \sum_{j=i}^n [(S/N)_{F=i}^{N=i}]_j \quad (3.4)$$

onde,

n_{il} representa o número de experiências realizadas com o fator l no nível i , e,

$\left(\frac{S}{N}\right)_{F=l}^{N=i}$ é a razão S/N da j experiência realizada com o fator l no nível i .

Em seguida, são identificados os melhores níveis dos parâmetros de controlo. Os melhores níveis são aquelas que apresentam maior valor de medio de S/N [21,22].

Como é indicado na figura 3.2, para além da ANOM, também é efetuada a análise da variância (*analysis of variance-ANOVA*) à razão sinal-ruído. A ANOVA permite identificar, com fiabilidade, os fatores que reduzem significativamente a variabilidade.

Para se realizar a análise da variância, é necessário calcular a soma dos quadrados dos fatores e do erro. A soma dos quadrados da variação total é dada pela equação seguinte:

$$SS_T = \sum_{i=1}^N (S/N_i - \overline{S/N})^2 \quad (3.5)$$

onde,

N é o número de experiências,

S/N_i é a razão sinal-ruído da experiência i , e,

$\overline{S/N}$ é a média das razões sinal-ruído das N experiências.

A variação total tem $N-1$ graus de liberdade.

A soma dos quadrados de um fator A é obtida utilizando a seguinte equação:

$$SS_A = \sum_{i=1}^a n_a \left(\overline{S/N_{A_{a_i}}} - \overline{S/N} \right)^2 \quad (3.6)$$

onde,

a representa o número de níveis do fator A,

n_a representa o número de experiências realizadas com o fator A no nível a_i , e,

$\overline{S/N}$ representa a média das razões sinal-ruído do fator A no nível a .

O fator A tem $a-1$ graus de liberdade.

A soma dos quadrados do erro calcula-se pela seguinte equação:

$$SS_{erro} = SS_T - \sum SS_{fatores} \quad (3.7)$$

Os graus de liberdade do erro são obtidos subtraindo os graus de liberdade de todos os fatores aos graus de liberdade totais.

Por vezes, todos os graus de liberdade são utilizados para os parâmetros de controlo, o que permite retirar o máximo de informação da matriz ortogonal. Neste caso, é necessário fazer o *pooling* dos fatores com menor contribuição para a razão sinal-ruído global. A soma dos quadrados desses fatores passa a pertencer ao erro [4,9].

Calcula-se também o quadrado médio dos fatores, neste caso para um fator A, MS_A , a partir da seguinte equação:

$$MS_A = \frac{SS_A}{g.l_A} \quad (3.8)$$

A significância de um fator é avaliada a partir da comparação entre o quadrado médio do fator e a variância residual (MS_{ERRO}), pela seguinte equação:

$$F_A = \frac{MS_A}{MS_{ERRO}} \quad (3.9)$$

O valor obtido é, então, comparado com o valor de $F_{\text{crítico}}$, para os graus de liberdade do fator e os graus de liberdade do erro. Caso o valor obtido seja maior que o valor tabelado, o fator tem um efeito significativo na resposta.

A percentagem de contribuição de um fator A, é definida por:

$$P_A = \frac{SS_A - g.L_A(MS_{ERRO})}{SS_T} * 100 \quad (3.10)$$

Depois de se identificarem os fatores significativos, e os melhores níveis dos fatores, calcula-se o valor esperado da resposta, partir da seguinte equação:

$$S/N_{op} = \overline{S/N} + \sum_{j=1}^p (S/N_j - \overline{S/N}) \quad (3.11)$$

onde,

S/N_j é a razão sinal ruído do melhor nível de cada fator.

Por fim, é realizado o ensaio de confirmação para comparar com o valor da resposta previsto pelo método.

3.3 Referências

- [1] N. F. V. C. Moita, “Implementação do Método Taguchi e Análise de Eperiências na Fase de Testes de Moldes para Injecção de Plásticos”, Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.
- [2] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 5ª ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2001.
- [3] M. Jamil, “Statistical Modeling of Electrode based Thermal Therapy with Taguchi based Multiple Regression”, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 71, pp. 283-291, 2013.
- [4] R. Roy, *A Primer on The Taguchi Method*. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [5] K. B. Misra, Ed., *Handbook of Performability Engineering*. Londres: Springer, 2008.
- [6] S. H. Sadeghi, *et al.*, “Soil Erosion Assessment and Prioritization of Affecting Factors at Plot Scale using the Taguchi Method”, *Journal of Hydrology*, vol. 448-449, pp. 174-180, 2012.
- [7] W. Chen, *et al.*, “Taguchi Approach for Co-gasification Optimization of Torrefied Biomass and Coal”, *Bioresource Technology*, vol. 144, pp. 615-622, 2013.
- [8] J. F. Silva, *et al.*, “Application of Taguchi Method in the Optimization of Filament Winding of Thermoplastic Composites”, *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 133-140, 2007.
- [9] F. S. Jorge, “Métodos de Taguchi Aplicados à Análise Cromatográfica na Identificação de Isocianatos”, Tese de mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.
- [10] S. H. Park, J. Antony, *Robust Design for Quality Engineering and Six Sigma*. Singapore: World Scientific, 2008.
- [11] N. F. S. Inácio, “Materiais Poliméricos Reforçados para Aplicações Biomédicas”, Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

-
- [12] N. Garg, *et al.*, “Parametric Sensitivity Analysis of factors affecting sound Insulation of Double Glazing using Taguchi Method”, *Applied Acoustics*, vol. 74, no. 12, pp. 1406-1413, 2013.
- [13] K. K. Prasad, *et al.*, “Laccase Production by *Pleurotus ostreatus* 1804: Optimization of Submerged Culture Conditions by Taguchi DOE Methodology”, *Biochemical Engineering Journal*, vol. 24, pp. 17-26, 2005.
- [14] A. Adnania, *et al.*, “Optimization of Lipase-catalyzed Synthesis of Xylitol Ester by Taguchi Robust Design Method”, *Industrial Crops and Products*, vol. 31, pp. 350-356, 2010.
- [15] W. T. Cheng, H. C. Li, C. N. Huang, “Simulation and Optimization of Silicon Thermal CVD Through CFD Integrating Taguchi Method”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 137, pp. 603-613, 2008.
- [16] J. S. Pang, “Taguchi Design Optimization of Machining Parameters on the CNC end Milling Process of Halloysite Nanotube with Aluminium Reinforced Epoxy Matrix (HNT/A₁/Ep) Hybrid Composite”, *HBRC Journal*, 2013.
- [17] R. Roy, *Design of Experiments Using the Taguchi Approach*. Singapore: John Wiley & Sons, 2001.
- [18] E. Ozbay *et al.*, “Investigating mix Proportions of High Strength Self Compacting Concrete by using Taguchi Method”, *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 694-702, 2009.
- [19] A. A. O. Castela, “Aplicação do Método de Taguchi no Desenvolvimento de Vidrados corados”, Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.
- [20] C. Chou, *et al.*, “The Optimum Conditions for Solid-state-prepared (Y_{3-x}Ce_x) Al₅O₁₂ Phosphor using the Taguchi Method”, *Advanced Powder Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 97-103, 2012.
- [21] E. Kilickap, “Optimization of Cutting Parameters on Delamination based on Taguchi Method during Drilling of GFRP Composite”, *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 8, pp. 6116-6122, 2010.
-

[22] W. Jankrajanga, 2011, “Design of Experiment Approach for Improving Rice Milling Quality”, Tese de mestrado, Kasetsart University, Bangkok, 2003.

Capitulo 4

Procedimento experimental

(Página intencionalmente deixada em branco)

Inicialmente, neste capítulo, apresentam-se as principais razões que levaram a escolher as matérias-primas utilizadas no fabricar os *towpregs* neste trabalho, bem como, as suas características mais importantes.

Seguidamente, são aqui apresentados, de forma resumida, os procedimentos de ensaio usados para fabricar e caracterizar os pré-impregnados e compósitos estudados durante o trabalho.

4.1 Seleção das matérias-primas

A seleção das matérias-primas utilizadas foi efetuada respeitando alguns critérios, dentro dos quais se destacam a forma física de apresentação, a excelente relação propriedades mecânicas/peso, a boa resistência térmica e a boa estabilidade dimensional dos materiais. O custo das matérias-primas foi outro critério a ter em consideração, de forma a produzir compósito inovadores que possam ser usados, a preços competitivos, em componentes estruturais de mercados avançados de engenharia, como sejam, o aeronáutico, de defesa e o espacial.

4.1.1 Matriz

Como matriz foi empregue um poli fenileno modificado em pó, produzido pela Solvay Advanced Polymers com a referência PrimoSpire PR 120[®]. Este material de cor creme é utilizado no fabrico de peças por compressão a quente e extrusão, destinadas a mercados avançados. Selecionou-se este polímero, tendo em conta as suas excelentes propriedades mecânicas, químicas e térmicas. A ficha técnica deste material pode ser consultada no Anexo 1. Além destas características, o PrimoSpire PR 120[®] apresenta custos de aquisição inferiores ao doutros polímeros de elevada performance, como por exemplo o PEEK. Tal como refere Friedrich *et al*, este material tem enorme potencial para ser empregue em várias aplicações de engenharia [1].

O PrimoSpire PR 120[®] usado neste trabalho foi anteriormente caracterizado no âmbito de um trabalho realizado por Nunes *et al*. [2]. A tabela 4.1 apresenta as principais características então determinadas experimentalmente e compara-as com os valores fornecidos pelo fabricante.

Tabela 4.1: Comparação as propriedades do PPP determinadas experimentalmente com os valores fornecidos pelo fabricante.

<i>Propriedades</i>	<i>Unidades</i>	<i>Valores experimentais</i>	<i>Valores fornecidos pelo fabricante</i>
Densidade	-	1,21	1,21
Tensão de rotura em tração	MPa	104,3	207
Módulo de elasticidade em tração	GPa	8	8,3
Tensão de rotura em flexão	MPa	-	310
Módulo de elasticidade em flexão	GPa	-	8,3
Tamanho médio dos grânulos	µm	139,4	-

Como se pode observar, foram obtidos valores experimentais de módulo de elasticidade e de tensão de rotura à tração inferiores aos declarados pelo fabricante. Estas diferenças podem dever-se ao facto de o fabricante poder ter usado nos testes provetes obtidos em condições ótimas de processamento.

4.1.2 Fibras

Dos tipos de reforços mais utilizados no fabrico de compósitos, as fibras de carbono são aquelas que apresentam a melhores propriedades mecânicas [3]. Por esse facto, utilizaram-se fibras de carbono do tipo PAN, de 760Tex produzidas pela Toray com a referência Torayca M30SC[®] para produzir os *towpregs* neste trabalho. Estas fibras de módulo intermédio são a melhor opção quando se deseja produzir compósitos de alto desempenho a baixo custo [4]. As propriedades da fibra de carbono também tinham já sido determinadas experimentalmente no trabalho anteriormente realizado por Nunes *et al* [2]. Os resultados então obtidos são apresentados e comparados com os valores declaradas pelo fabricante na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Comparação as propriedades das FC determinadas experimentalmente com os valores fornecidos pelo fabricante.

<i>Propriedades</i>	<i>Unidades</i>	<i>Valores experimentais</i>	<i>Valores fornecidos pelo fabricante</i>
Densidade	-	1,73	1,73
Tensão de rotura em tração	MPa	2833	5490
Módulo de elasticidade em tração	GPa	200	294
Peso linear	Tex	760	760

Como se pode ver, uma vez mais, verificou-se que algumas das propriedades mecânicas

declaradas na ficha técnica do fabricante são superiores às obtidas nos ensaios realizados.

4.2 Produção e caracterização dos *towpregs*

Para produzir *towpregs* de fibras de carbono com PrimoSpire® PR 120 (FC/PR120), foi utilizado o equipamento descrito no ponto 2.1.2.4. Procedeu-se à variação dos parâmetros de processamento mais revelantes, de forma a encontrar as condições ótimas de processamento para os pré-impregnados FC/ PR 12, a saber: velocidade linear de puxo, temperatura do forno de convecção e temperatura do forno consolidação. Estudou-se, ainda, a influência que cada um desses parâmetros de processamento tem na qualidade dos *towpregs* produzidos.

A otimização do processo foi efetuada com base no método robusto de Taguchi, considerando o teor ponderal em polímero como resposta.

4.2.1 Determinação do teor mássico de polímero nos *towpregs*

O teor mássico de polímero nos pré-impregnados tem uma grande influência nas propriedades dos compósitos finais. Esta característica condiciona não só as propriedades mecânicas das peças em compósito obtidas a partir dos *towpregs*, mas também a sua processabilidade, acabamento superficial e, inclusivamente, o seu custo final. Tendo em conta estes fatores, o teor mássico de polímero nos *towpregs* deve ser controlado continuamente durante o processo de produção.

Para determinar a fração mássica de polímero nos pré-impregnado fabricados, foram cortadas 3 amostras, de 1 metro cada, das fibras utilizadas e recolheram-se também 13 amostras de *towpregs*, cada amostra com 1 metro de comprimento, produzidas nas diferentes condições de processamento. Posteriormente, as amostras foram pesadas numa balança com uma precisão de 0,1 mg. Por último, a percentagem mássica de polímero, w_p , foi determinada através da expressão seguinte:

$$w_p = \frac{\text{peso do towpreg} - \text{peso da fibra}}{\text{peso do towpreg}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

A fração mássica das fibras, w_f , pôde então calcular-se recorrendo à seguinte equação:

$$w_f = 1 - w_p \quad (4.2)$$

4.3 Produção e caracterização dos compósitos transformados por pultrusão

4.3.1 Produção de compósitos por pultrusão

A produção de perfis a partir dos *towpregs* FC/PR120 fabricados foi realizada numa máquina de pultrusão protótipo existente nas instalações do ISEP. Durante o processamento, procedeu-se à variação de alguns parâmetros operacionais, nomeadamente, a temperatura do forno de pré-aquecimento e a temperatura da feira consolidação, com o intuito de perceber quais são as influências que eles exercem na possibilidade dos pré-impregnados.

4.3.2 Caracterização dos compósitos

Os perfis em compósito produzidos pelo processo descrito no parágrafo anterior foram sujeitos a ensaios de tração e flexão em três pontos, corte interlaminar e densidade.

4.3.2.1 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão foi realizado segundo a norma ISO 14125 - método A, à temperatura ambiente, numa máquina de ensaios Shimadzu e utilizando uma célula de carga de 100KN, com uma distância entre apoios de 80 mm e velocidade de deflexão de 1 mm/min.

Os ensaios de flexão foram realizados sobre cinco provetes cortados dos perfis pultrudidos, com dimensões de aproximadamente 100×20×2 mm. Após a obtenção dos provetes, mediu-se a largura e a espessura destes em três pontos distintos com recurso a um paquímetro com precisão de $\pm 0,1$ mm, sendo posteriormente consideradas como dimensões do provete ensaiado as médias dos valores medidos. Os valores registados podem ser consultados no Anexo 3.

Num ensaio de flexão em três pontos, o provete está sujeito a tensões normais de tração/compressão e também de corte. Em regra, considera-se que as tensões normais devidas aos esforços de flexão são largamente predominantes na secção transversal dos provetes relativamente às tensões de corte desenvolvidas quando no ensaio se usam cocientes L/h superiores a 16, sendo L a distância ente apoios e h a espessura do provete.

Considerando-se que as tensões normais devidas aos esforços de flexão são predominantes na secção transversal dos provetes, a tensão de flexão, σ_f , foi calculada através da seguinte equação:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2lh^2} \quad (4.3)$$

onde,

F é a força transversal aplicada (N),

L é a distância entre apoios (mm),

l é a largura do provete (mm) e,

h é a espessura do provete (mm).

As deformações correspondentes, obtiveram-se através de:

$$\varepsilon = \frac{6D_m h}{L^2} \quad (4.4)$$

onde, D_m , é a flecha medida a meio vão no provete.

O módulo de elasticidade em flexão foi calculado pela equação 4.5.

$$E = \frac{L^3 m_d}{4lh^3} \quad (4.5)$$

onde, m_d , é o declive da curva linear carga-deflexão obtida do ensaio.

4.3.2.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado de acordo com a norma ISO 527- 4/2, à temperatura ambiente, numa máquina universal de ensaios Shimadzu, utilizando uma célula de carga de 100KN e uma velocidade de tração de 2 mm/min. Para medição do alongamento, foi utilizado um extensómetro com comprimento inicial de 50 mm.

Os cinco provetes utilizados nos ensaios de tração, com dimensões aproximadamente de 250×20×2 mm, foram obtidos através do corte dos perfis pultrudidos. Antes dos ensaios, mediu-se a espessura e a largura em três zonas distintas dos corpos de prova com o auxílio a um paquímetro digital, sendo posteriormente calculadas as médias. Os valores obtidos podem ser consultados no Anexo 3.

A tensão em tração foi determinada por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.6)$$

onde,

F é a força externa aplicada (N) e,

A é a área da secção transversal inicial do provete (mm^2).

A deformação resultante da carga aplicada relativamente ao comprimento inicial, L_0 , obteve-se através da expressão seguinte:

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (4.7)$$

onde, L , é o deslocamento registado pela maquina de ensaios em cada momento.

O módulo de elasticidade em tração, E , foi calculado pela relação aproximadamente linear entre tensão e deformação, existente na parte inicial do ensaio. O módulo pode ser escrito pela equação 4.8.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.8)$$

4.3.2.3 Ensaio de corte interlaminar

Este ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D2344. Trata-se de um ensaio de flexão em 3 pontos, no qual a distância entre apoios é deliberadamente reduzida, de modo a que as deformações ao corte sejam o maior possível.

Para a realização deste ensaio foram cortados cinco provetes a partir dos perfis pultrudidos com as dimensões $20 \times 20 \times 2$ mm, estes foram posteriormente ensaiados numa máquina Zwick Z100 com uma pré-carga de 2N, uma velocidade de 1 mm/min e uma distância entre apoios de 10mm.

O valor da resistência ao corte interlaminar, τ , foi obtido pela teoria da elasticidade através da expressão seguinte:

$$\tau = 0,75 \frac{F_u}{b * h} \quad (4.9)$$

onde,

F_u é a carga de rotura(N),

b é a largura do provete (mm) e,

h é a altura do provete (mm).

Este ensaio é muito usado para controlo de qualidade devido ao baixo custo e à facilidade de execução.

4.3.2.4 Determinação da densidade no compósito

A densidade dos compósitos foi determinada pelo método de imersão em solvente, usando uma balança analítica com um *kit* de determinação de densidade. Seleccionaram-se três amostras que pudessem ser representativas da população em análise para ensaio. Como líquido de imersão, utilizou-se a água destilada. A densidade foi determinada através de:

$$\rho_c = \left[\frac{A}{A-B} (\rho_{liq}) \right] \quad (4.11)$$

onde,

A é o peso da amostra (g),

B é o peso da amostra imersa no líquido de imersão (g), e,

ρ_{liq} é a densidade do líquido de imersão à temperatura de ensaio.

4.4 Referências

- [1] K. Friedrich, *et al.*, “Poly-para-Phenylene-Copolymer (PPP): A High-Strength Polymer with Interesting Mechanical and Tribological Properties”, *International Journal of Polymeric Materials*, vol. 59, no. 9 pp. 680-692, 2010.
- [2] P. Nunes, *et al.*, “New Thermoplastic Matrix Composites for Demanding Applications” in *13th European Conference on Composite Materials*, Estocolmo, 2008.
- [3] F. C. Campbell, *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. Oxford: Elsevier, 2004.
- [4] S. T. Peters, Ed., *Composite Filament Winding*. Ohio: ASM Internacional, 2011.

Capitulo 5

Apresentação e discussão dos resultados

(Página intencionalmente deixada em branco)

Neste capítulo apresentam-se, analisam-se e discutem-se os principais resultados obtidos no trabalho. Inicialmente, descrevem-se as condições de produção dos towpregs FC/PR120. Posteriormente aborda-se a transformação dos pré-impregnados por pultrusão. Finalmente, também se efetua uma comparação entre as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos com as esperadas do ponto de vista teórico e com as características conhecidas doutros compósitos semelhantes já existentes no mercado.

5.1 Produção e caracterização dos *towpregs*

Os pré-impregnados FC/PR120 estudados foram produzidos no equipamento protótipo existente no PIEP. Como se referiu no Capítulo II, o *towpreg* é um pré-impregnado parcialmente impregnado constituído por uma mecha de fibras contínuas com partículas de polímero em pó depositadas.

5.1.1 Produção dos *towpregs*

Os *towpregs* foram fabricados em contínuo na linha de produção descrita no parágrafo 2.1.2.4 e em várias publicações de carácter científico. Este equipamento protótipo encontra-se representado na figura 5.1



Figura 5.1: Equipamento de produção de *towpregs* utilizado.

Os principais parâmetros desta linha de produção são: a velocidade de puxo e as temperaturas do forno de convecção e de consolidação. Neste trabalho, procedeu-se à variação destes parâmetros de forma a encontrar as condições ótimas de processamento para os *towpregs* FC/ PR 120. Durante este estudo foi ainda possível, averiguar qual é a

influência de cada parâmetro de processamento na qualidade os pré-impregnados produzidos.

Fez-se variar a velocidade de puxo entre 2 e 8 m/min, a temperatura do forno de convecção entre 700-750 ° C e a temperatura do forno de consolidação entre os 400 e 600 ° C.

Durante os ensaios preliminares efetuados, verificou-se que para velocidades de puxo superiores a 6 m/min existia uma forte vibração da mecha de fibra, provocando significativas perdas de polímero entre a câmara de deposição e o forno de consolidação. Esta “vibração” está relacionada, em parte, com o baixo Tex que esta fibra de carbono apresenta.

Observou-se também que para velocidades de puxo inferiores a 4 m/min e para uma temperatura do forno de consolidação acima dos 535 ° C o polímero apresentava sinais evidentes de degradação.

No decorrer dos ensaios verificou-se que a temperatura do forno de consolidação exerce uma influência direta na qualidade do *towpreg* ao nível da adesão do polímero às fibras, constatando-se ainda que, quanto mais elevada for essa temperatura, mais rígido é o *towpreg* fabricado. No que diz respeito ainda a este parâmetro, constatou-se que operando a temperaturas abaixo dos 500°C, não se conseguiu obter um *towpregs* devidamente consolidados.

Combinando os vários parâmetros estabeleceu-se uma janela de processamento com velocidades de puxo das fibras entre os 4 e 6 m/min, temperaturas do forno de convecção entre 700-750 ° C, e temperaturas do forno de consolidação entre os 500 e 550 ° C.

Ao longo do fabrico dos *towpregs* constatou-se que a adesão do pó de à fibra é um fenómeno bastante heterogéneo, visto que o pó depositado na face inferior da fibra à saída da câmara de deposição era bastante reduzido. Esta situação pode estar relacionada com o facto dos *sizings* á base de epóxi normalmente utilizados na fibras de carbono não reagirem quimicamente com termoplásticos de elevado desempenho [1].

Convêm salientar, que durante todo o processamento tentou-se evitar que a pressão de ar no espalhador existente no início da linha sofresse grandes oscilações e que nunca houvesse variações superiores a 10°C na temperatura do forno de convecção.

Durante a fase inicial de ensaios, efetuou-se algumas alterações no equipamento, reduzindo-se a inclinação com que os *towpregs* saíam da câmara de deposição. Do ponto de vista teórico, esta modificação destinava-se a minimizar o escorregamento das partículas de polímero, aumentando como consequência direta o teor ponderal dos *towpregs*. Na prática, verificou-se que a modificação não produziu efeitos significativos na melhoria da qualidade os *towpregs*.

5.1.1.1 Otimização da produção de *towpregs*

A otimização da produção de *towpregs* foi efetuada com base no método de Taguchi. O parâmetro utilizado como resposta foi o teor de polímero existente nos pré-impregnados. O objetivo durante a produção era obter a maior quantidade de polímero possível, como tal optou-se pela qualidade de característica Maior-Melhor.

Como fatores de controlo, foram selecionados os principais parâmetros de processamento no fabrico dos *towpregs*. São eles: velocidade de puxo, temperatura do forno de convecção e temperatura de consolidação. A cada fator foi atribuído dois níveis. Na tabela 5.1 encontram-se os níveis selecionados para cada fator.

Tabela 5.1: Níveis dos fatores de controlo.

<i>Nível</i>	<i>Fator</i>		
	<i>Velocidade</i>	<i>F. Convecção</i>	<i>F. Consolidação</i>
1	4m/min.	700°C	525°C
2	6m/min.	750°C	535°C

Na seleção dos níveis teve-se em consideração o comportamento térmico do polímero utilizado.

Associados aos fatores de controlo existem os denominados “fatores de ruído” que, indiretamente, podem influenciar os resultados finais. Foram identificados os seguintes fatores de ruído:

- Humidade relativa;
- Temperatura ambiente;
- Diâmetro das partículas de pó;
- Desalinhamento da máquina;
- Qualidade da fibra.

Com base no número de fatores e níveis selecionados, selecionou-se uma matriz ortogonal, L_4 , de acordo com o método de Taguchi.

Adaptando a matriz ortogonal, L_4 , aos fatores e níveis identificados, obtém-se as condições de processamento, representadas na tabela 5.2

Tabela 5.2: Matriz ortogonal L_4 -condições de teste.

<i>Condição</i>	<i>Velocidade</i>	<i>F. Convecção</i>	<i>F. Consolidação</i>
1	4m/min.	700°C	525°C
2	4m/min.	750°C	535°C
3	6m/min.	700°C	535°C
4	6m/min.	750°C	525°C

Após a realização dos quatro testes experimentais determinou-se o peso linear dos *towpregs* (ver Anexo2) e calculou-se de seguida o teor mássico de polímero presente nos mesmos de acordo com o procedimento descrito no ponto 4.2.1. Posteriormente a resposta foi convertida em S/N, utilizando-se a categoria Maior-Melhor para que se maximizassem os resultados. Para facilitar a leituras das tabelas foi atribuído a cada parâmetro de controlo uma letra do alfabeto, assim: à velocidade de puxo atribui-se a letra A, à temperatura do forno de convecção a letra B e, por último, selecionou-se a letra C para representar a temperatura do forno de consolidação.

Tabela 5.3: Valores do teor mássico em polímero e de S/N calculados para os quatro ensaios efetuados.

<i>Condição</i>	<i>Fator</i>			<i>Teor mássico médio</i>	<i>S/N</i>
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>		
1	4m/min.	700°C	525°C	39,67%	31,04
2	4m/min.	750°C	535°C	32,71%	29,05
3	6m/min.	700°C	535°C	33,74%	30,08
4	6m/min.	750°C	525°C	40,38%	31,33

Como é possível verificar a através da tabela 5.3 as condições 1 e 4 apresentam maior fração ponderal em polímero.

Após o cálculo das razões individuais S/N, efetuou-se a ANOM, para cada nível dos fatores de controlo. Efetuado o cálculo das médias, determina-se a diferença entre o maior e o menor valor de cada parâmetro, para os 3 fatores. Os resultados da ANOM estão expostos na tabela 5.4. A linha *Rank* permite identificar os fatores mais significativos para o sistema em análise.

Tabela 5.4: Ordenação das médias dos valores de S/N calculadas com base nos valores da tabela 5.3.

<i>Níveis</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
1	30,05	30,57	31,19
2	30,71	30,20	29,57
<i>Delta</i>	0,66	0,37	1,62
<i>Rank</i>	2	3	1

Como é possível verificar através da tabela 5.4, a melhor combinação dos níveis dos parâmetros de controlo é $A_2B_1C_1$. A temperatura forno de consolidação é o parâmetro de controlo que mais contribui para a resposta sendo, por outro lado, a temperatura do forno de convecção o parâmetro de controlo menos importante.

Os valores da tabela 5.4 permitem proceder à representação gráfica dos resultados experimentais S/N para cada parâmetro de saída, em função dos diferentes níveis, e para cada fator.

Para verificar se a variação dos níveis cada fator tem um efeito significativo no resultado final, realizou-se a análise de variância (ANOVA). Deste modo, obtiveram-se as variâncias de cada fator e do erro e calculou-se o valor de F para cada parâmetro. Os valores de F calculados foram comparados com os valores de $F_{crítico}$ para um nível de confiança de 95 %, tendo em conta os graus de liberdade de cada fator e do erro.

Na tabela 5.5 estão apresentados os resultados da ANOVA. Como todos os graus de liberdade foram utilizados para os parâmetros de controlo, retirando o máximo de informação da matriz ortogonal, foi necessário fazer o *pooling* do fator que menos contribuiria para a razão sinal/ruído global. A soma dos quadrados desse fator passou a pertencer ao erro. Analisando os resultados, verifica-se que nenhum dos fatores tem um valor de F superior ao $F_{crítico}$, no entanto, a temperatura do forno de consolidação e a velocidade de puxo têm uma contribuição de cerca de 77,7% e 9,34%, respetivamente, para a resposta.

Tabela 5.5: Resultados da ANOVA com base nos valores de S/N apresentados na tabela 5.3.

<i>Fatores</i>	<i>G.L</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F_{prático}</i>	<i>F_{crítico}</i>	<i>P_{percentil}</i>
A	1	0,43871	0,30044	2,17	161,4	9,34
C	1	2,63630	2,49803	18,06	161,4	77,7
Erro + B	1	0,13827	0,13827	-	-	12,96
<i>Total</i>	3	3,21327				100%

Deste modo, o teste de confirmação deve ser do tipo $A_2B_1C_1$, pois deve-se optar pela combinação que implique menos custos ou seja, menor temperatura nos fornos e maior velocidade de puxo. A tabela 5.6 expõe os resultados obtidos no teste de confirmação.

Tabela 5.6: Comparação entre os valores S/N experimentais e os teóricos.

<i>Teste de confirmação</i>	<i>Valor S/N teórico</i>	<i>Valor S/N experimental</i>	<i>Erro relativo%</i>
1	31,7	31,79	0,28
2	31,7	31,17	1,67

Como é possível observar na tabela 5.6, sendo o erro relativo alcançados nos testes de confirmação inferior a 20% os dados obtidos foram considerados estatisticamente fiáveis [2].

Por último, comparou-se a condição ideal com as condições de teste. Como é possível verificar na tabela 5.7, a condição otimizada corresponde à combinação de fatores de controlo que permitiram obter maior teor mássico de polímero nos *towpregs*.

Tabela 5.7: Comparação entre os resultados obtidos para a condição otimizada e os das condições de teste.

<i>Condição</i>	<i>Amostras</i>	<i>Teor mássico de polímero (%)</i>	
		<i>Média</i>	<i>Desvio padrão</i>
1	13	39,67	10,15
2	13	32,71	12,10
3	13	33,74	6,41
4	13	40,38	11,59
<i>Condição otimizada</i>	13	42,12	7,2

Como é visível na tabela anterior, a *condição otimizada* apresenta menor dispersão dos resultados, quando comparada com a maioria das condições de teste. De uma forma geral a combinação $A_2B_1C_1$ permite reduzir os custos, maximizar os resultados, aumentar a reprodutibilidade e robustez da produção de *towpregs* FC/PR120.

5.2 Produção e caracterização dos compósitos transformados por pultrusão

Os *towpregs* fabricados foram transformados no equipamento protótipo de pultrusão instalado no ISEP. Este equipamento, já descrito em várias publicações científica [3-5], permite produzir perfis de forma contínua, utilizando pré-impregnados de matriz termoplástica.

5.2.1 Procedimento pré-operatório

Começou-se por ter definir algumas das condições necessárias para pultrudir um perfil pultrudido retangular seção transversal de 20×2 mm (área total 40mm^2) e um teor ponderal de 52 % em fibra.

Assim, foi necessário calcular o número de *towpregs* a utilizar durante a pultrusão pela seguinte expressão:

$$n^{\circ} \text{ de towpregs} = \frac{\rho_t * w_{fp}}{d_{lin(f)}} * \text{Secção transversal} \quad (5.1)$$

onde,

ρ_t é a massa volúmica do *towpreg*,

w_{fp} é a fração mássica de fibra pretendida no perfil, e,

$d_{lin(f)}$ é o peso linear da fibra.

Tendo em conta os parâmetros de entrada apresentados na tabela 5.8, o número de bobinas verificou-se ser teoricamente necessário utilizar 40 bobinas de *towpreg* para pultrudir o perfil desejado.

Tabela 5.8: Variáveis tidas em consideração no cálculo do número de *rovings*.

<i>Propriedade</i>	<i>Unidades</i>	<i>Valores</i>
Peso linear da mecha de fibra	g/m	0,760
Massa volúmica do <i>towpreg</i>	g/cm ³	1,465

5.2.2 Produção de compósitos por pultrusão

Os principais parâmetros de processamento do equipamento protótipo de 10kN usado (ver figura 5.2) são: a velocidade de puxo, o forno de pré-aquecimento e as fieiras de consolidação e de arrefecimento.

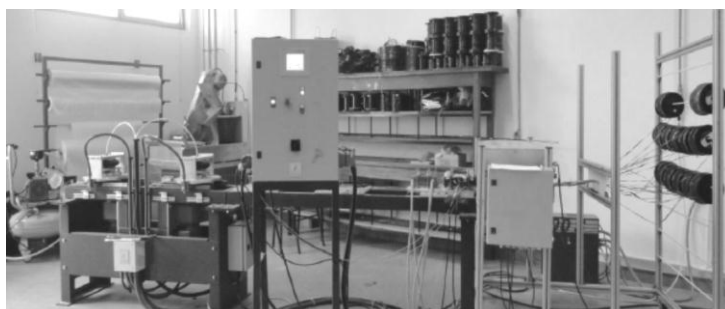


Figura 5.2: Equipamento de pultrusão.

No trabalho, variaram-se estes parâmetros com o objetivo de determinar as melhores condições de processamento dos *towpregs* FC/PR120 em perfis pultrudidos. A tabela 5.9 apresenta as diversas condições de processamento testadas.

Tabela 5.9: Condições de processamento testadas.

<i>Condição</i>	<i>Velocidade (m/min)</i>	<i>Forno de pré-aquecimento (°C)</i>	<i>Fieira de consolidação(°C)</i>	<i>Temperatura do termo regulador(°C)</i>	<i>Processabilidade</i>
1	0.2	240	320	25	χ
2	0.2	260	340	25	χ
3	0.2	270	350	25	χ
4	0.2	280	360	25	χ
5	0.2	320	380	25	χ
6	0.2	350	375	25	P
7	0.2	350	400	25	P
8	0.2	350	450	25	P
9	0.2	380	425	25	P
10	0.2	400	470	25	χ
11	0.2	400	475	25	χ
12	0.2	400	480	25	χ

Legenda5.1: Não processável - X; Processável - P.

Como se pode observar na tabela 5.9, fez-se variar as temperaturas do forno de pré-aquecimento e da fieira de consolidação, respetivamente, entre 240 e 400°C e os 320 e 500°C, mantendo-se a velocidade puxo no valor constante de 0.2 m/min.

Verificou-se que para temperaturas do forno de pré-aquecimento e da fieira de consolidação entre, respetivamente, os 240 e 320°C e os 320 e 380°C, o polímero não fundia. Também se constatou que para uma temperatura da fieira de consolidação superior a 450°C o polímero ficava completamente negro, sinal claro de degradação.

Durante o processo observou-se que o Primospire® apresentava um comportamento semelhante a um sólido viscoelástico, o que dificultava a impregnação das fibras. Este comportamento térmico tinha já sido evidenciado num trabalho efetuado por Almajid *et al* [6].

O alinhamento das fieiras foi identificado como um ponto crítico do equipamento. Deslocações das fieiras em relação á posição de montagem, provocava obstrução no

interior da feira de consolidação, devido ao aumentando a interação *towpreg-towpreg* e *towpreg-feira*.

Ao longo da produção dos perfis observou-se ainda existência de trocas de calor por condução entre a feira de consolidação e o seu suporte, provocando alterações no perfil de temperatura. Para minimizar esta situação, revestiu-se este componente com material isolante à base de fibras de vidro.

Os perfis produzidos apresentam um acabamento superficial bastante heterogéneo, situação que se justifica tendo em conta que os *towpregs* não estavam uniformemente cobertos com polímero.

5.2.3 Caracterização dos compósitos

Neste parágrafo apresentam-se os resultados dos ensaios a que os perfis em compósitos produzidos foram submetidos.

5.2.3.1 Ensaio de flexão

Os compósitos produzidos, foram ensaiados à flexão de acordo com o procedimento descrito no parágrafo 4.3.2.1. O módulo de elasticidade em flexão foi calculado a partir da relação aproximadamente linear entre a força e a deflexão provocada no provete usando a equação (4.5) e a tensão de rotura determinada a partir do valor máximo de carga registada no ensaio aplicando a equação (4.3). A figura 5.3 apresenta o aspeto típico das curvas tensão-deformação, obtidas nos ensaios de flexão realizados aos compósitos produzidos na condição 9.

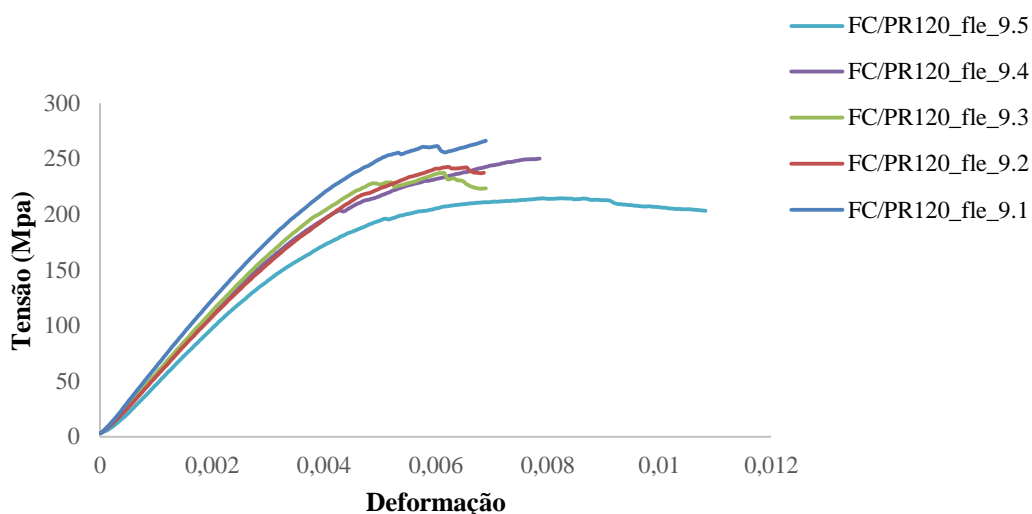


Figura 5.3: Curvas dos ensaios de flexão em três pontos para a condição 9.

A tabela 5.10 mostra, em resumo, os resultados obtidos das propriedades mecânicas em flexão.

Tabela 5.10: Propriedades à flexão dos perfis pultrudidos.

<i>Condição</i>	<i>Tensão em flexão (MPa)</i>		<i>Módulo em flexão (GPa)</i>	
	<i>Média</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio padrão</i>
6	89,72	12	28,1	3,4
7	93,2	9,2	29,5	3,6
8	110,5	8,1	36,3	1,3
9	276,6	22,6	60,2	3,7

Numa perspetiva geral, verifica-se que os compósitos com maior resistência e módulo de elasticidade à flexão, são os perfis produzidos na condição 9. O aumento da temperatura do forno de pré-aquecimento em 30° C e da fieira de consolidação em 50°C, promoveu um aumento da tensão de rotura e do módulo, respetivamente, de 208% e de 114%.

Embora os provetes de FC/PR120 tenham apresentado decréscimo da resistência à flexão comparativamente com os valores da resina não reforçada, o seu módulo de elasticidade à flexão aumentou cerca de 575,9%.

Selecionada a condição 9 como a de processamento ideal, os restantes ensaios (tração, interlaminar e densidade) apenas foram efetuados aos perfiz produzidos nessas condições de produção.

5.2.3.2 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com o procedimento descrito no parágrafo 4.3.2.3. O módulo de elasticidade à tração foi determinado pelo declive da curva tensão-deformação na sua zona inicial linear de proporcionalidade, também designada por zona elástica. Recorreu-se ao método dos mínimos quadrados para aproximar todos os pontos do domínio elástico por uma reta de regressão linear, cujo declive foi considerado como o declive da reta inicial de ensaio. Verificou-se que a partir de um dado ponto do ensaio todos os provetes escorregaram nas amarras impedindo que se atingisse a rotura final.

Assim, para determinar a tensão de rotura à tração foi necessário efetuar uma serie de cinco novos ensaios. Os perfis pultrudidos foram maquinados numa fresadora CNC, obtendo-se provetes em alter com uma zona útil de 60x10x2 mm e um comprimento total

de 300mm. Neste caso os provetes foram solicitados numa máquina servo-hidráulica Instron 8800. Os ensaios decorreram à temperatura ambiente, usando uma pressão de 140 bar nas amarras, uma velocidade de 2 mm/min e uma distância entre amarradas de 190mm. A figura 5.4 mostra o aspeto típico das curvas tensão-deformação, obtidas nos ensaios de tração realizados aos compósitos produzidos.

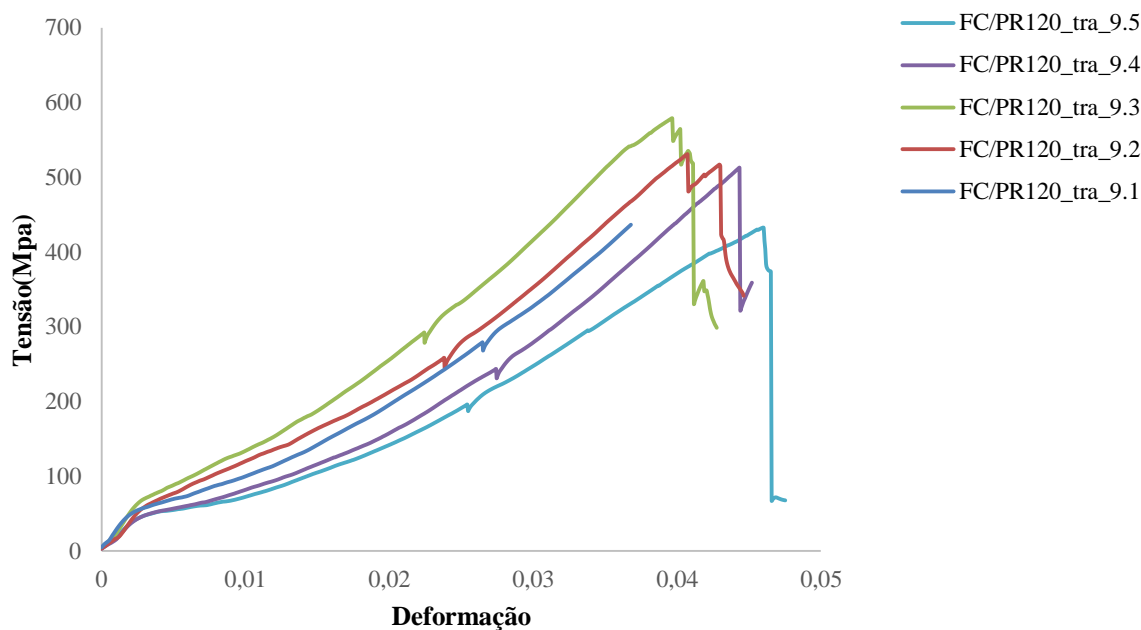


Figura 5.4: Curvas típica dos ensaios de tração realizados aos compósitos produzidos.

Na tabela 5.11 são apresentados, em resumo, os resultados obtidos nos ensaios de tração efetuados aos perfis de *towpregs*.

Tabela 5.11: Propriedades mecânicas à tração dos perfis putrudidos na condição 9.

<i>Condição</i>	<i>Tensão em tração (Mpa)</i>		<i>Módulo em tração (GPa)</i>	
	<i>Média</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio padrão</i>
9	742,8	68,2	84,2	17,7

Verifica-se que os estes compósitos apresentaram um módulo de elasticidade aproximadamente 950% superior ao da resina não reforçada. A resistência mecânica também aumento em cerca de 612% em relação do Primospire® não reforçado.

Como se pode constatar, o módulo de elasticidade em tração é superior ao módulo obtido em flexão. Esta diferença de valores deverá estar relacionada com o facto das propriedades não serem constantes ao longo da espessura dos perfis.

5.2.3.3 Ensaio de corte interlaminar

Os ensaios ao corte interlaminar foram efetuados segundo o procedimento descrito no ponto 4.3.2.3 do capítulo IV. A figura 5.5 apresenta as curvas de carga-deslocamento obtidas nos ensaios de corte interlaminar. Como se pode observar as curvas apresentam um patamar horizontal inicial, que corresponde à folga existente entre o provete e o dispositivo de ensaio.

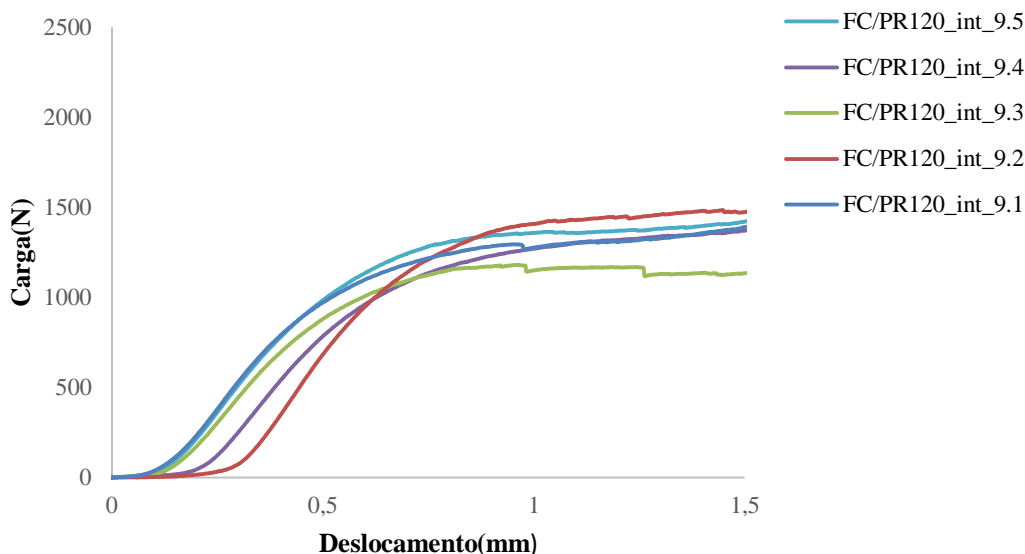


Figura 5.5: Curvas de carga-deslocamento obtidas nos ensaios de corte interlaminar.

Dos ensaios obtiveram-se valores de carga de rotura, que, através da equação (4.9) do capítulo IV, permitiram calcular a tensão de rotura ao corte interlaminar. Os valores médios obtidos apresentam-se resumidamente na tabela 5.12.

Tabela 5.12: Resultados obtidos no ensaio de corte interlaminar da condição 9.

Condição	Carga de rotura (N)		Resistência ao corte interlaminar (Mpa)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
9	1335,31	101	25.36	2.05

5.2.3.4 Determinação da densidade do compósito

A densidade dos perfis pultrudidos foi determinada de acordo com o procedimento descrito no parágrafo 4.3.2.4.do Capítulo IV. As amostras ensaiadas forma extraídas de um perfil pultrudido na condição 9 Na tabela 5.13 são apresentados os valores médios obtidos.

Tabela 5.13: Resultados obtidos no ensaio de densidade.

<i>Condição</i>	<i>Densidade</i>	
	<i>Média</i>	<i>Desvio padrão</i>
9	1,308	0,044

Durante os testes verificou-se a libertação de bastantes bolhas de ar. Este fenómeno está relacionado com a existência de vazios nos provetes, resultado de uma impregnação parcial das fibras com o polímero.

5.2.3.5 Comparação entre as propriedades mecânicas obtidas nos perfis com as teoricamente esperadas

Os valores das propriedades mecânicas esperadas do ponto de vista teórico, para uma única lâmina podem ser obtidos a partir dos modelos da micromecânica. Esta área tem sido um objeto de grande atividade científica ao longo de várias décadas, sendo normalmente o primeiro ponto de partida para a análise dos materiais compósitos [6]. Uma excelente revisão das teorias básicas da micromecânica da lâmina poderá ser efetuada na bibliografia disponível [7-15].

Para uma lâmina solicitada na direção das fibras, o tratamento teórico mais simples é o que se obtém por aplicação da lei das misturas. O módulo pode ser dado pela seguinte expressão:

$$E = v_f * E_f + (1 - v_f) * E_m \quad (5.4)$$

onde,

E_f é o módulo de elasticidade das fibras,

v_f é a fração volúmica de fibras e,

E_m é o módulo de elasticidade da matriz .

Analogamente, para a resistência mecânica

$$\sigma = v_f * \sigma_f + (1 - v_f) * \sigma_m \quad (5.5)$$

onde,

σ_f é a resistência das fibras e,

σ_m é a resistência da matriz .

A tabela 5.14 compara os resultados experimentais obtidos com os valores calculados teoricamente.

Tabela 5.14: Comparação entre os resultados teóricos e os obtidos experimentalmente.

<i>Propriedade</i>	<i>Teórico</i>	<i>Experimental</i>
Módulo em flexão (Gpa)	90.7	60,2
Módulo em tração (Gpa)	90.7	84,2
Tensão em tração (Mpa)	1280.6	742,8

Como se pode observar, existe um desfasamento entre as propriedades mecânicas determinadas experimentalmente e os valores previstos teoricamente. As diferenças entre os valores previstos e os obtidos devem-se, nomeadamente, a variações da espessura dos provetes, má distribuição das fibras, existência de vazios ou a uma fraca interface fibra/polímero.

Sendo a resistência à tração mais significativamente afetada pelos defeitos dos provetes, verificou-se que os valores determinados experimentalmente eram 41,9% inferiores aos esperados do ponto de vista teórico.

No caso do módulo, a diferença entre os valores experimentais e os teóricos não é tão acentuada. Para o módulo em tração verificou-se um desfasamento entre os valores experimentais e os teóricos de 7,16% e em flexão uma diferença de 33,6%.

5.2.3.6 Comparação das propriedades mecânicas obtidas nos perfis FC/PR120 com outros compósitos FC/PR120.

Na tabela 5.15, comparam-se as propriedades mecânicas dos perfis FC/PR120 produzidos com as doutros compósitos FC/PR120. Os resultados apresentados para as placas e para os tecidos em compósito foram extraídos de um artigo publicado anteriormente por Nunes *et al* [16].

Os compósitos presentes na tabela seguinte foram todos obtidos através da transformação de *towpregs*. Nos três casos foram empregues fibras de carbono da Toray com a referência Torayca M30SC®.

Como se pode observar, os Perfil FC/PR120 apresentam valores de tensão e módulo em flexão superiores aos das placas e dos tecidos.

Tabela 5.15: Comparação das propriedades dos perfis de FC/PR120 com outros compósitos de FC/PR120

<i>Propriedade</i>	<i>Compósitos de FC/PR120</i>		
	<i>Perfil</i>	<i>Placa</i>	<i>Tecido</i>
Módulo em flexão (Gpa)	60,2±3,7	30±0,5	26,8±2,2
Módulo em tração (Gpa)	84,2±17,7	-	-
Tensão em flexão (Mpa)	276,6±22	124,3±15	160±56
Tensão em tração (Mpa)	742,8±68	-	-
Volume de fibra (%)	43,1	51	51

Em termos percentuais, os compósitos pultrudidos excedem em 100% as propriedades mecânicas apresentadas pelos outros materiais presentes na tabela. Os valores obtidos para os perfis produzidos, poderão ser consequência de uma melhor impregnação das fibras com polímero.

5.2.3.7 Comparação das propriedades mecânicas dos perfis FC/PR120 com as de outros perfis termoplásticos reforçados com fibras

As propriedades mecânicas dos perfis produzidos foram também comparadas com outros perfis em compósito. A tabela 5.16 resume as propriedades dos materiais em análise. Nos perfis em *towpreg* de fibras de carbono e polipropileno (FC/PP) têm como matriz um polímero da ICO Polymers com a referência ICORENE 9184B P[®], no caso das *tapes* utilizou-se um polipropileno da Basell comercializado com Moplen RP348U[®]. Ambos materiais são reforçados com fibras de carbono da Toray com a referência Torayca M30SC[®] [4]. Os resultados apresentados para os perfis *Kevlar 46/ABS* foram transcritos de um trabalho realizado por Yeung Kai Kin [17]. De um artigo publicado por L. Lebel e A. Nakai foram extraídos os valores dos perfis obtidos através de entrelaçados (*braiding*) [18]. Os perfis híbridos foram pultrudidos na fase final deste trabalho no ISEP, através da transformação de *tapes* FC/PP e FV/PP. Selecionou-se como parâmetros de processamento destes perfis, uma temperatura de pré-aquecimento de 160°C, uma temperatura da fiação de consolidação de 250°C e uma velocidade de puxo de 0.2m/min. Os materiais híbridos obtidos foram posteriormente sujeitos a ensaios de tração (ISO 527-4/2), flexão (ISO 14125 - método A), corte interlaminar (ASTM D2344) e calcinação (ISO 1172). Os valores individuais de cada ensaio podem ser consultados no Anexo 4 da presente dissertação.

Em termos nominais os perfis em compósitos que apresentam melhores propriedades mecânicas são os que foram obtidos através de *towpregs* de FC/PP e de FC/PR120.

Tabela 5.16: Comparação das propriedades dos perfis de FC/PR120 com outros perfis pultrudidos.

<i>Propriedade</i>	<i>Perfis pultrudidos</i>					
	<i>Towpreg FC/PR120</i>	<i>Towpreg FC/PP</i>	<i>Tape FC/PP</i>	<i>Híbrido</i>	<i>Kevlar/ABS</i>	<i>Braiding FC/PA66</i>
Módulo em flexão (Gpa)	60,2±3,7	90,1±0,4	37,7±2,2	30±3	3,26	-
Módulo em tração (Gpa)	84,2±17,7	110,6±5,9	63,5±4,3	49,2±2	9,30	36±2
Tensão em flexão (Mpa)	276,6±22	241,2±1,6	158±4,2	217±19	116,7	-
Tensão em tração (Mpa)	742,8±68	-	-	535±26	169,6	469±40
Corte interlaminar (Mpa)	25,4±2,1	12,3±0,3	14±0,2	18±0,2	-	-
Volume de fibra (%)	43,1	50,6	31,9	35	6130	37

De forma a avaliar mais equitativamente os dados presentes na tabela 5.16, dividiu-se a propriedade em análise pelo teor volúmico de fibra. Estes resultados encontram-se devidamente tratados na tabela 5.17.

Tabela 5.17: Comparação das propriedades/volume fibras dos vários perfis.

<i>Propriedade</i>	<i>Perfis pultrudidos</i>					
	<i>Towpreg FC/PR120</i>	<i>Towpreg FC/PP</i>	<i>Tape FC/PP</i>	<i>Híbrido</i>	<i>Kevlar/ABS</i>	<i>Braiding FC/PA66</i>
Módulo em flexão/ v_f (Gpa)	139,67±8,5	178,1±0,4	118,2±6,9	85,7±8,5	5.34	-
Módulo em tração/ v_f (Gpa)	195,35±41,1	218,6±11,7	199,1±13,5	140,5±5	15,24	97±5,7
Tensão em flexão/ v_f (Mpa)	641,8±51	476,7±3,2	497,5±13,2	620±54	191.3	-
Tensão em tração/ v_f (Mpa)	17238±157	-	-	1528±74	278	1267±108
Corte interlaminar/ v_f (Mpa)	59.8±4,9	24,3±0,6	43,9±0,7	51±0,6	-	-

Como é possível verificar através da tabela anterior, os perfis *towpreg FC/PR120* são, de forma geral, os que apresentam a melhor combinação de propriedades. No entanto, os valores obtidos para os perfis *towpreg FC/PP* e para os *tapes FC/PP* já se encontram bastante próximos. Estas pequenas oscilações das propriedades, podem estar relacionadas com a qualidade da impregnação ou com as propriedades dos polipropilenos utilizados.

5.2.3.8 Comparação das propriedades mecânicas nos perfis FC/PR120 com outros materiais utilizados em engenharia

Na tabela 5.18 comparam-se as propriedades mecânicas dos compósitos de matriz termoplástica transformados a partir dos *towpregs* com as de outros materiais de uso em

engenharia. As propriedades específicas obtiveram-se dividindo o valor da propriedade pela densidade do material.

Tabela 5.18: Comparação das propriedades dos perfis de FC/PR120 com materiais de uso tradicional em engenharia [18-24].

<i>Material</i>	<i>Densidade</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de elasticidade à tração (GPa)</i>	<i>Resistência à tração específica (MPa)</i>	<i>Módulo de elasticidade específico (GPa)</i>
Perfis FC/PR120	1,30	742,8	84,2	571,4	64,7
Tape Cytec (PEEK/AS4)	1,61	2070	138	1285,7	85,7
TenCate (PPS/HexForce 5H)	1,55	660	54	429,6	34,83
Laminado fibra de carbono/epóxi	1,59	1730	142	1088,1	88,1
LFT PP/FV	1,07	100	3,4	93,4	3,2
Nylon 66 (PA)	1,15	83	2,9	72,2	2,5
PA/FV	1,39	172	9	123,7	6,4
Alumínio (puro)	2,70	50	70	18,5	25,9
Ligas de alumínio	2,81	300	71	106,8	25,3
Aço (AISI 1045)	7,80	570	205	73,1	26,3

Como é observável na tabela 5.18, os perfis FC/PR120 apresentam valores específicos de resistência e módulo à tração superiores aos do polímero indicado, bem como, aos do aço e do alumínio.

Quando os perfis produzidos são comparados com as tapes PEEK/AS4 e com o laminado, verificamos que estes possuem um módulo e uma resistência específica inferior.

Embora as propriedades dos compósitos produzidos sejam razoáveis, apresentando estes materiais, em termos específicos, valores superiores que alguns dos materiais tradicionalmente utilizados em engenharia, parecem existir ainda muitos aspetos que devem ser estudados tendo em vista a melhoria das suas propriedades mecânicas.

5.3 Referências

- [1] I. Giraud, "Preparation of Aqueous Dispersion of Thermoplastic Sizing Agent for Carbon Fiber by Emulsion/solvent Evaporation", *Applied Surface Science*, vol. 266, pp. 94-99, 2013.
- [2] M. H. Cetin, "Evaluation of Vegetable Based Cutting Fluids with Extreme Pressure and Cutting Parameters in turning of AISI 304L by Taguchi Method", *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 17-18, pp. 2049-2056, 2011.
- [3] J. P. Nunes, *et al.*, "Processing Conditions and Properties of Continuous Fiber Reinforced GF/PP Thermoplastic Matrix Composites Manufactured from Different Pre-impregnated Materials", in *19th International Conference on Composite Materials, Montreal*, 2013.
- [4] P. Novo, *et al.*, "Production of Thermoplastics Matrix Pre-impregnated Materials to Manufacture Composite Pultruded Profiles", *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 25, pp. 85-91, 2013.
- [5] P.J. Novo, *et al.*, "Development of a New Pultrusion Equipment to Manufacture Thermoplastic Matrix Composite Profiles", in *15th European Conference on Composite Materials, Veneza*, 2012.
- [6] A. Almajid, *et al.*, "PPP for Extrusion and Injection Moulding: Part 1", *Rubber and Composites*, vol. 42, no. 3, pp. 123-128, 2013.
- [7] T. Tang, "Variational Asymptotic Micromechanics Modeling of Composite Materials", Tese de doutoramento, Utah State University, Logan, 2008.
- [8] Z. Hashin, "Analysis of Composite Materials - A Survey", *Journal of Applied Mechanics*, vol. 50, pp. 481-505, 1983.
- [9] P.K. Mallick, *Fiber-reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 3^a ed. Danvers: Taylor & Francis, 2008.
- [10] M. Hori, *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*, 2^a ed. Amsterdão: North-Holland, 1993.

- [11] G.W. Milton, *Theory of Composites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [12] R.M. Christensen, *Mechanics of Composite Materials*. Nova Iorque: Dover Publication, 1979.
- [13] T. Mura, *Micromechanics of Defects in Solids*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1987.
- [14] G. H. Staab, *Laminar Composites*. Wobum: Butterworth Heinemann, 1999.
- [15] R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, 2^a ed. Ann Arbor: Taylor & Francis, 1999.
- [16] J. P. Nunes, *et al.*, “New Thermoplastic Matrix Composites for Demanding Applications”, in *13th European Conference on Composite Materials*, Estocolmo, 2008.
- [17] Y. Kin, “Study on the Mechanical Properties and Performance of Selected Thermoplastic and Thermosetting”, Tese de doutoramento, University of Hong Kong, Hong Kong, 2011.
- [18] L. L. Lebel, A. Nakai, “Design and Manufacturing of an L-shaped Thermoplastic Composite Beam by Braid-trusion”, *Composites: Part A*, vol 43, no^o 10, pp 1717–1729, 2011.
- [19] M.F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 3^a ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [20] D.V. Rosato, D.V. Rosato, *Reinforced Plastics Handbook*, 3^a ed. Oxford: Elsevier, 2004.
- [21] S.K. Mazumdar, *Composites Manufacturing - Materials, Product, and Process Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [22] A. Mortensen, Ed., *Concise Encyclopedia of Composite Materials*, 2^a ed. Amesterdão: Elsevier, 2007.
- [23] A. C. Long, Ed, *Design and Manufacture of Textile Composites*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2005.

[24] B. Miracle, S.L. Donaldson, Ed., *Composites*. ASM Handbook, 2001.

Capitulo 6

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

(Página intencionalmente deixada em branco)

6.1 Conclusões

Com este trabalho pretendeu-se desenvolver e verificar a possibilidade de utilizar perfis em compósito inovadores, leves e com desempenho mecânico e térmico acrescido, em componentes estruturais de mercados avançados de engenharia, como sejam, o aeronáutico, de defesa e o espacial. Os perfis foram produzidos por pultrusão a partir de *towpregs* FC/PR120, fabricados num equipamento protótipo totalmente desenvolvido em Portugal e instalado nos laboratórios do PIEP.

As principais conclusões resultantes do estudo efetuado são as seguintes:

- i. A deposição a seco de termoplásticos em pó sobre as fibras é uma tecnologia que permite fabricar, em contínuo e eficazmente pré-impregnados de matriz termoplástica reforçada com fibras longas com características adequadas a serem transformados em componentes estruturais.
- ii. Através do método de Taguchi foi possível otimizar a produção de pré-impregnados termoplásticos. A condição que permite obter *towpregs* com maior fração mássica em polímero, é uma combinação com uma velocidade linear de 6m/min., uma temperatura do forno de convecção de 700 °C, e temperatura do forno de consolidação de 525 °C.
- iii. Através do equipamento existente nos laboratórios de ISEP foi possível obter perfis de FC/PR120 a partir de *towpregs*, variando a temperatura do forno de pré-aquecimento entre 350 e 380°C, a temperatura da fieira de consolidação entre 375 e 450°C.
- iv. Observou-se que as propriedades mecânicas dos perfis produzidos eram inferiores aos valores obtidos teoricamente, possivelmente, devido aos defeitos existentes e insuficiente adesão fibra/polímero.
- v. Comparando as características mecânicas dos compósitos produzidos com outros perfis termoplásticos reforçados com fibras, verificou-se que os compósitos termoplásticos de fibras contínuas obtidos apresentam a melhor combinação de propriedades.

- vi. Embora as propriedades dos compósitos produzidos sejam razoáveis, apresentando estes materiais, em termos específicos, valores superiores que alguns dos materiais tradicionalmente utilizados em engenharia, existem ainda muitos aspectos que podem ser estudados, tendo em vista a melhoria das suas propriedades mecânicas.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

O estudo levado a cabo na presente dissertação constitui apenas um contributo no desenvolvimento de perfis compósitos de matriz termoplástica reforçada com fibras contínuas/longas. Para um eventual trabalho futuro, sugere-se a realização dos seguintes estudos:

- i. Fabricar *towpregs* utilizando o PrimoSpire PR 120[®] e fibras de carbono com tratamento superficial destinado a polímeros termoplásticos.
- ii. Produzir *towpregs* com matrizes termoplásticas de elevado desempenho mais flexíveis a nível molecular, como por exemplo o PrimoSpire PR 250[®].
- iii. Estudar a influência que a quantidade de polímero presente na câmara de deposição do equipamento tem na fração mássica de polímero dos *towpregs* produzidos.
- iv. Determinar a orientação e fração volúmica das fibras nos compósitos produzidos através de equipamentos tais como, a tomografia computacional.
- v. Estudar a influência da distância entre a fieira de consolidação e a fieira de arrefecimento na consolidação do compósito.
- vi. Determinar as propriedades mecânicas de impacto, fluência, fadiga e dureza dos compósitos reforçados com fibras de carbono.
- vii. Determinar algumas propriedades físicas (DMA, DSC e absorção de água) e estéticas (cor brilho) dos perfis termoplásticos produzidos.
- viii. Expor os perfis a diversos ambientes de envelhecimento acelerado e avaliados os impactes da humidade, da água salgada, da temperatura, da radiação ultravioleta (UV).
- ix. Transformação por pultrusão outros tipos de pré-impregnados, como por exemplo pré-impregnados interlaçados.

- x. Averiguar a possibilidade de produzir perfis pultrudidos termoplásticos através de vias reativas.

Anexo 1

Ficha técnica das matérias-primas

(Página intencionalmente deixada em branco)

Product Data

PrimoSpire™
self-reinforced polyphenylene

PR-120

PrimoSpire PR-120 self-reinforced polyphenylene (SRP) is an ultra-high performance amorphous, melt-processable engineering thermoplastic. The unique properties of this material are due primarily to the inherent rigid-rod structure. PrimoSpire SRP is differentiated from other thermoplastics by outstanding mechanical properties without fiber reinforcement, scratch resistance, excellent solvent resistance, and exceptional low temperature performance.

In addition, PrimoSpire PR-120 SRP has great thermal and thermal-oxidative stability and it is noncombustible. The specific strength of PrimoSpire PR-120 SRP exceeds many of the materials commonly encountered in structural

applications. The resin also possesses excellent machinability permitting fabrication of parts such as fasteners to tolerances of less than one mil (0.025 mm).

The excellent mechanical, chemical, thermal, and physical properties of PrimoSpire PR-120 SRP make it the material of choice for a variety of applications including aircraft substructures, semiconductor components, gears, light-weight vehicle suspensions systems, medical tubing and other medical devices.

PrimoSpire PR-120 resin is commercially available in natural or black pellets or as a powder.

Typical Properties of PrimoSpire PR-120 Resin - ASTM Test Methods

Property	ASTM Test Method	Typical Values ⁽¹⁾			
		U.S. Customary Units		SI Units	
		Value	Units	Value	Units
Mechanical					
Tensile Strength	D 638	30.0	kpsi	207	MPa
Tensile Modulus	D 638	1.20	Mpsi	8.3	GPa
Flexural Strength	D 790	45.0	kpsi	310	MPa
Flexural Modulus	D 790	1.20	Mpsi	8.3	GPa
Compressive Strength at Yield	D 695	35.0	kpsi	241	MPa
Izod Impact, Notched	D 256	0.8	ft-lb/in	43	J/m
Izod Impact, Unnotched	D 4812	20	ft-lb/in	1.1	kJ/m
Hardness, Pencil	D 3363	7H		7H	
Rockwell Hardness	D 785	64	B scale	64	B scale
Thermal					
Heat Deflection Temperature at 264 psi (1.8 MPa)	D 648	309	°F	154	°C
Glass Transition Temperature	E 1356	316	°F	158	°C
Coefficient of Thermal Expansion	E 831	17	µin/in°F	30	µm/m°C
Flammability⁽²⁾					
Limiting Oxygen Index	D 2863	49	%	49	%
Smoke Emission, D _s at 1.5 min	E 662	<1		<1	
Smoke Emission, D _s at 4 min	E 662	<1		<1	
UL Flammability at 0.010" (0.25 mm)	UL 94	V-0		V-0	
Electrical					
Dielectric Constant at 10 ⁶ Hz	D 150	3.1		3.1	
General					
Specific Gravity	D 792	1.21		1.21	
Moisture Absorption, 24 hours	D 570	0.2	%	0.2	%
Moisture Absorption, Equilibrium		0.7	%	0.7	%

⁽¹⁾ Properties measured using test specimens machined from compression molded plates. Actual properties of individual batches will vary within specification limits.

⁽²⁾ These flammability ratings are not intended to reflect hazards presented by these or any other materials under actual fire conditions.

Solvay
Advanced Polymers



Solvay Advanced Polymers, L.L.C.
4500 McGinnis Ferry Road
Alpharetta, Georgia 30005-3914
www.solvayadvancedpolymers.com

Ficha técnica da fibra de carbono Torayca M30SC

**TECHNICAL
DATA SHEET**
No. CFA-010

TORAYCA[®] **M30S** DATA SHEET

Cost effective alternative to T800H. Suitable for applications which are not critical to composite transverse properties. This never twisted fiber is mainly used in lightweight tensile strength driven applications such as pressure vessels.

FIBER PROPERTIES

	English	Metric	Test Method
Tensile Strength	796 ksi	5,490 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus	42.7 Msi	294 GPa	TY-030B-01
Strain	1.9 %	1.9 %	TY-030B-01
Density	0.062 lbs/in ³	1.73 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter	2.0E-04 in.	5 µm	
Yield 18K	1,960 ft/lbs	760 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type & Amount	50C	1.0 %	TY-030B-05
Twist	Never twisted		

COMPOSITE PROPERTIES *

Tensile Strength	435 ksi	2,990 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	25.5 Msi	175 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.6 %	1.6 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	200 ksi	1,370 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	190 ksi	1,320 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	21.0 Msi	145 GPa	ASTM D-790
ILSS	13 ksi	9 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	7.5 ksi	51 MPa	ASTM D-3039

* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

See Section 4 for Safety & Handling information. The above properties do not constitute any warranty or guarantee of values. These values are for material selection purposes only. For applications requiring guaranteed values, contact our sales and technical team to establish a material specification document.

TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

Anexo 2

Propriedades dos *towpregs*

(Página intencionalmente deixada em branco)

Peso médio das amostras de *towpreg*

Tabela A1.1: Peso linear dos towpregs produzidos, condição 1.

Amostra	Peso linear (g/m)
1.1	1,3
1.2	1,5
1.3	1,0
1.4	1,0
1.5	1,1
1.6	1,4
1.7	1,8
1.8	1,2
1.9	1,3
1.10	1,0
1.11	1,2
1.12	1,3
1.13	1,6

Tabela A1.2: Teor Peso linear dos towpregs produzidos, condição 2

Amostra	Peso linear (g/m)
2.1	1,5
2.2	1,2
2.3	1,0
2.4	1,0
2.5	1,0
2.6	1,8
2.7	1,0
2.8	1,0
2.9	1,5
2.10	1,0
2.11	1,5
2.12	1,2
2.13	1,0

Tabela A1.3: Peso linear dos towpregs produzidos, condição 3.

<i>Amostra</i>	<i>Peso linear (g/m)</i>
3.1	1,3
3.2	1,1
3.3	1,2
3.4	1,1
3.5	1,3
3.6	1,0
3.7	1,3
3.8	1,2
3.9	1,1
3.10	1,1
3.11	1,3
3.12	1,1
3.13	1,1

Tabela A1.4: Peso linear dos towpregs produzidos, condição 4.

<i>Amostra</i>	<i>Peso linear (g/m)</i>
4.1	1,6
4.2	1,1
4.3	1,2
4.4	1,2
4.5	1,1
4.6	1,2
4.7	1,1
4.8	1,3
4.9	1,3
4.10	2,1
4.11	1,9
4.12	1,1
4.13	1,4

Tabela A1.5: Peso linear dos towpregs produzidos, condição ótima, 1 série de confirmação.

<i>Amostra</i>	<i>Peso linear (g/m)</i>
Conf_1.1	1,06
Conf_1.2	1,31
Conf_1.3	1,23
Conf_1.4	1,67
Conf_1.5	1,41
Conf_1.6	1,35
Conf_1.7	1,11
Conf_1.8	1,42
Conf_1.9	1,28
Conf_1.10	1,21
Conf_1.11	1,33

Tabela A1.6: Peso linear dos towpregs produzidos, condição ótima, 2 série de confirmação.

<i>Amostra</i>	<i>Peso linear (g/m)</i>
Conf_2.1	1,18
Conf_2.2	1,23
Conf_2.3	1,17
Conf_2.4	1,17
Conf_2.5	1,32
Conf_2.6	1,56
Conf_2.7	1,38
Conf_2.8	1,25
Conf_2.9	1,22
Conf_2.10	1,16
Conf_2.11	1,34

Anexo 3

Propriedades dos perfis FC/PR120

(Página intencionalmente deixada em branco)

Ensaio de flexão

Tabela A2.1: Dados e resultados experimentais dos provetes de flexão da condição 6.

<i>Ensaio</i>	<i>Largura média (mm)</i>	<i>Espessura média (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Modulo (Gpa)</i>
6.1	19,53	2,01	76,24	25,72
6.2	19,35	2,03	96,06	31,12
6.3	19,36	2,11	105,13	31,67
6.4	19,46	2,04	79,04	23,59
6.5	19,32	2,12	92,16	28,39
<i>Media</i>			89,73	28,09
<i>D. Padrão</i>			12,03	3,46

Tabela A2.2: Dados e resultados experimentais dos provetes de flexão da condição 7.

<i>Ensaio</i>	<i>Largura média (mm)</i>	<i>Espessura média (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Modulo (Gpa)</i>
7.1	19,37	2,03	88,88	24,72
7.2	19,29	2,09	85,20	28,03
7.3	19,22	2,06	94,85	32,85
7.4	19,22	2,06	88,84	28,67
7.5	19,54	2,07	108,54	33,40
<i>Media</i>			93,26	29,53
<i>D. Padrão</i>			9,21	3,60

Tabela A2.3: Dados e resultados experimentais dos provetes de flexão da condição 8.

<i>Ensaio</i>	<i>Largura média (mm)</i>	<i>Espessura média (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Modulo (Gpa)</i>
8.1	19,27	2,05	108,01	35,19
8.2	19,39	2,04	124,82	37,73
8.3	19,54	2,00	108,66	37,72
8.4	19,52	1,98	105,82	35,18
8.5	19,52	1,98	105,57	35,60
<i>Media</i>			110,58	36,3
<i>D. Padrão</i>			8,074864	1,326795

Tabela A2.3: Dados e resultados experimentais dos provetes de flexão da condição 9.

<i>Ensaio</i>	<i>Largura média (mm)</i>	<i>Espessura média (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Modulo (Gpa)</i>
9.1	18,80	2,01	276,6	60,26
9.2	18,77	2,03	242,84	53,47
9.3	18,46	2,02	237,45	55,60
9.4	18,87	2,03	252,41	54,92
9.5	18,35	2,05	214,5	50,01
<i>Media</i>			276,6	60,2
<i>D. Padrão</i>			22,6	3,7

Ensaio de tração

Tabela A2.4: Dados e resultados experimentais dos provetes de tração da condição 9-serie 1.

<i>Ensaio</i>	<i>Largura média (mm)</i>	<i>Espessura média (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Modulo (Gpa)</i>
9.1.1	18,03	2,41	-	92,227
9.1.2	18,54	2,07	-	86,676
9.1.3	18,38	2,14	-	97,834
9.1.4	18,03	2,14	-	79,481
9.1.5	18,35	2,04	-	64,958
<i>Media</i>			-	
<i>D. Padrão</i>			-	

Tabela A2.5: Dados e resultados experimentais dos provetes de tração da condição 9-serie 2.

<i>Ensaio</i>	<i>Largura média (mm)</i>	<i>Espessura média (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Modulo (Gpa)</i>
9.2.1	10,14	2,29	800,651	-
9.2.2	10,07	2,45	715,1063	-
9.2.3	9,98	2,29	684,7841	-
9.2.4	10,08	2,38	683,4531	-
9.2.5	10,02	2,23	829,8993	-
<i>Media</i>			742,778	-
<i>D. Padrão</i>			68,16866	-

Corte interlaminar

Tabela A2.6: Resultados do ensaio de corte interlaminar realizados na condição 9.

<i>Ensaio</i>	<i>Largura média (mm)</i>	<i>Espessura média (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>
9.1	18,55	2,12	24,7
9.2	18,61	2,15	27,1
9.3	18,74	2,14	22,1
9.4	18,2	2,13	26,7
9.5	18,34	2,13	26,2
<i>Media</i>			25,36
<i>D. Padrão</i>			2,05

Densidade experimental

Tabela A2.7: Resultados do ensaio de densidade efetuado na condição 9.

<i>Condição</i>	<i>Peso da amostra (g)</i>	<i>Peso da amostra no líquido (g)</i>
1	1,4465	0,3599
2	1,441	0,288
3	1,333	0,3407
<i>Media</i>	1,308	0,044

Anexo 4

Propriedades dos perfis híbridos

(Página intencionalmente deixada em branco)

Ensaio de flexão

Tabela A3.1: Dados e resultados experimentais dos provetes de flexão.

<i>Ensaio</i>	<i>Largura média (mm)</i>	<i>Espessura média (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Modulo (Gpa)</i>
H1	19,84	1,97	192,57	24,315
H2	18,70	1,93	243,869	30,556
H3	18,98	2,00	227,113	31,723
H4	18,61	1,99	215,975	31,439
H5	18,87	1,96	205,888	35,276
<i>Media</i>			217,083	30,6618
<i>D. Padrão</i>			19,65664	3,978508

Ensaio de tração

Tabela A3.2: Dados e resultados experimentais dos provetes de tração-serie 1.

<i>Ensaio</i>	<i>Largura média (mm)</i>	<i>Espessura média (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Modulo (Gpa)</i>
H.1.1	19.21	1,88	-	51,025
H.1.2	19,3	1,93	-	46,687
H.1.3	19,58	1,92	-	51,588
H.1.4	19,01	1,94	-	47,786
H.1.5	18,93	2	-	49,247
<i>Media</i>			-	49,2666
<i>D. Padrão</i>			-	2,081332

Tabela A3.3: Dados e resultados experimentais dos provetes de tração-serie 2.

<i>Ensaio</i>	<i>Largura média (mm)</i>	<i>Espessura média (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Modulo (Gpa)</i>
H.2.1	10,06	1,97	483,8532	-
H.2.2	10,06	2,01	487,867	-
H.2.3	9,97	1,9733	533,63	-
H.2.4	10,42	2,02	530,73	-
H.2.5	9,2	2,03	535,61	-
<i>Media</i>			514,338	-
<i>D. Padrão</i>			26,09317	-

Corte interlaminar

Tabela A3.4: Resultados do ensaio de corte interlaminar realizados.

<i>Ensaio</i>	<i>Largura média (mm)</i>	<i>Espessura média (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>
1	18,96	1,95	18,67165
2	19,03	1,94	18,60505
4	19,12	1,94	18,4588
5	19,03	1,94	18,8561
<i>Media</i>			18,6479
<i>D. Padrão</i>			0,164829

Calcinação

Tabela A3.5: Resultados do ensaio de calcinação.

<i>Condição</i>	<i>Peso do cadinho (g)</i>	<i>Peso do cadinho+ amostra (g)</i>	<i>Peso do cadinho+ resíduo (g)</i>	<i>Fração mássica de fibra (%)</i>
1	24,978	26,751	26,031	40,60
2	24,462	26,261	25,52	41,18