Luís Norberto Miranda Torres

FABRICO E APLICAÇÃO DE TOWPREGS DE FV/PVC EM TUBAGENS

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Manutenção Industrial pela Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia do Porto
Universidade do Porto
2008

a todos aqueles que me estimam,

em particular:

aos meus queridos, pais e irmão

às minhas queridas e sempre amigas Sónia Correia e Maria Fernanda

aos meus queridos avós, paternos e maternos

aos meus queridos padrinhos

aos meus amigos

RESUMO

As tubagens têm vindo a evoluir de acordo com as cada vez maiores exigências, desde as funcionais até às ambientais. Têm surgido no mercado, recentemente, vários tipos de tubagens em compósito com matrizes plásticas reforçadas com metal e com matrizes plásticas reforçadas com fibras leves. No entanto, a utilização de matrizes termoplásticas nos compósitos de fibras longas é relativamente recente. A sua utilização coloca desafios tecnológicos e científicos uma vez que os termoplásticos apresentam uma viscosidade muito mais elevada que os termoendurecíveis, o que dificulta a impregnação dos reforços, bem como a sua consolidação.

Com este trabalho, procura-se desenvolver compósitos de policloreto de vinilo (PVC) reforçado com fibra de vidro (FV) para aplicação no fabrico, reparação e manutenção de tubagens.

Foram produzidos pré-impregnados de fibras contínuas e matriz termoplástica, por deposição a seco de partículas de polímero sobre mechas de fibras contínuas de reforço (denominados *towpreg*), bem como, por impregnação de fibras de reforço por um plastisol de policloreto de vinilo (PVC em pasta de baixa viscosidade).

Procurou-se optimizar os parâmetros mais relevantes para a produção de *towpregs* para se estabelecer uma gama operatória que permita obter pré-impregnados com boa qualidade.

Os pré-impregnados produzidos foram, posteriormente, transformados em compósitos, usando duas tecnologias normalmente aplicadas a matrizes termoendurecíveis: compressão a quente e enrolamento filamentar. Os pré-impregnados foram também utilizados na reparação de tubagens.

Caracterizaram-se as propriedades relevantes do PVC usado nos pré-impregnados fabricados, nomeadamente, a granulometria média das partículas do polímero (utilizando uma distribuição de Weibull), as características térmicas e as propriedades mecânicas. Para isso, foram realizados vários ensaios de acordo com procedimentos estabelecidos, nomeadamente, ensaios com peneiros, observação por microscopia electrónica de varrimento, ensaios de termogravimetria, ensaios de tracção, flexão, “split-disk” (para simulação de pressão interior em tubagens), corte interlaminar e determinação da pressão de rebentamento de tubagens (pressão interior).

Os resultados obtidos foram comparados com as previsões de valores teóricos, bem como, com outros materiais utilizados correntemente em aplicações de Engenharia.

Palavras-chave: PVC, compósitos de matriz termoplástica, tubos em PRFV, enrolamento filamentar, moldação por compressão, reparação de tubagens

ABSTRACT

Piping systems are continuously progressing due to increasing demands from functional aspects to environment related issues. Nowadays, several different piping types are emerging in the market, from metal to light fibres reinforced thermoplastics. However, the use of thermoplastic matrix composites in long/continuous fibre applications is still relatively recent. Its use involves scientific and technological challenges as they present a much higher viscosity than thermosetting resins and, therefore, a much difficult fibre impregnation.

This work seeks to study polyvinylchloride (PVC) reinforced with glass fibres (GF) composites for applications in the manufacture, repairing and pipes maintenance.

Initially, thermoplastic matrix pre-pregs were produced by dry deposition of particles on continuous reinforcement fibers (towpreg) using a recently developed powder coating equipment. The most relevant towpreg production parameters were found and a processing window was established allowing the production of good quality pre-pregs.

Also, composite structures were made from a low viscosity PVC paste ("plastisol") reinforced with glass fibres by wet lay-up.

The produced towpregs were then processed into composites, using two technologies usually applied to thermosetting matrices: compression molding and filament winding. The low viscosity PVC paste was used on piping repairing.

The PVC properties were determined, in particular, the average polymer particle size (using sieving tests), thermal characteristics (using thermo-gravimetric tests) and relevant mechanical properties. More tests were conducted in accordance with established procedures, particularly, scanning electron microscopy, split-disk tests (for simulation of internal pressure tests), interlaminar shear stress tests and burst pressure tests on pipes.

The obtained results was compared with the predictions of theoretical values and with other materials commonly used in engineering applications.

Keywords: PVC, thermoplastic composites, GFRP pipes; filament winding; compression moulding, pipes repair

RESUMÉ

La tuyauterie a tendance à évoluer de plus en plus selon de grandes exigences, depuis les fonctionnalités aux critères d'environnement. De nombreux types de tuyaux en composite ont surgit dans le marché récemment avec de nouvelles matrices plastiques renforcées avec du métal et des matrices renforcées en fibres légères. Néanmoins, l'utilisation de matrices thermoplastiques dans les composites de fibres longues est relativement récente. Son utilisation comporte des défis technologiques et scientifiques une fois qu'ils présentent une viscosité plus élevée que les thermodurcissables ce qui rend difficile l'imprégnation des renforts, bien comme sa consolidation.

Ce travail a pour but de développer des composites de polychlorure de vinyle (PVC) renforcé avec de la fibre de verre (FV) pour l'application dans le fabrique, réparation et maintenance des tubes.

Des fibres pré-imprégnées continues et de matrice thermoplastique sont produites par déposition à sec de particules de polymères sur des mèches de fibres continues de renforcement (towpreg), bien comme, par imprégnation de fibres de renforcement par un plastisol de polychlorure de vinyle (PVC en pulpe de basse viscosité).

Ce travail cherche à optimiser les paramètres les plus relevant pour la production de towpregs pour s'établir une gamme opératoire qui permette obtenir des pré-imprégnées de bonne qualité.

Les pré-imprégnées produits sont, par la suite, transformés en composites, en utilisant des technologies normalement appliquées à des matrices thermodurcissables; compression à chaud et enroulement filamentaire. Par contre, le plastisol de polychlorure de vinyle a été utilisé dans la réparation des tuyaux.

Les propriétés principales utilisées dans les pré-imprégnées fabriqués se caractérisent, notamment, para la granulométrie moyenne des particules du polymère, les caractéristiques thermiques et les propriétés mécaniques. Pour cela furent réalisés de nombreux essais conformément aux procédures établis, notamment, l'observation au microscope électronique, les essais de thermogravimétrie, les essais de traction, de flexion, "split-disk" (pour la simulation de la pression à l'intérieur des tuyaux), découpage inter-laminaire et la détermination de résistance a la pression intérieure des tuyaux.

Les résultats obtenus ont été compares avec la prévision des valeurs théoriques et avec les propriétés d'autres matériaux utilisés habituellement en application d'ingénierie.

Mots-clés: PVC, composites à matrice thermoplastique, tuyaux au PRFV, enroulement filamentaire, compression à chaud, réparation des tuyaux

AGRADECIMENTOS

Quero prestar o meu agradecimento a todos aqueles que directa ou indirectamente me apoiaram na realização desta trabalho, nomeadamente:

- ao Prof. Doutor António Torres Marques pela orientação, apoio e disponibilidade prestados.
- ao Doutor João Francisco Silva pela motivação, orientação, disponibilidade e pelo incansável apoio demonstrado.
- ao Prof. Doutor Pedro Nunes pela disponibilidade e apoio demonstrado.
- ao Eng.º Rogério Marques pela disponibilidade e apoio no estudo de soluções de impregnação de fibras de reforço com PVC.
- à Armanda do CETECOF pela colaboração prestada na realização dos ensaios com peneiros.
- à Eng.ª Teresa Pimenta pela colaboração prestada na realização de ensaios de densidade e termogravimetria.
- à Eng.ª Magda Marques do ISEP pelo apoio prestado.
- ao Mestre João Velosa da Universidade do Minho pela importante colaboração prestada.
- ao Técnico Carlos da Universidade do Minho pela colaboração prestada no fabrico de perfis de PVC.
- à Eng.ª Susana Cabral da Fonseca pela importante colaboração prestada na realização dos ensaios de pressão interior.
- à direcção da Unidade de Materiais Compósitos do INEGI, CEMACOM, pela disponibilidade dos meios utilizados neste trabalho.
- à Companhia Industrial de Resinas Sintéticas, CIRES, S.A. pelo apoio e pelo PVC disponibilizado para a realização deste trabalho.
- ao LNEC pela disponibilidade no apoio à realização dos ensaios de pressão interior.
- ao ISEP e à FEUP pelo acolhimento.

Quero ainda agradecer de forma especial à minha mãe, ao meu pai, ao meu irmão, à Sónia e aos meus amigos, por todo o apoio, motivação, carinho e confiança que me dispensaram ao longo deste trabalho.

ÍNDICE

Resumo ..... **v**
Abstract ..... **vii**
Resumé ..... **ix**
Agradecimentos ..... **xi**
Índice ..... **xiii**
1 Introdução **1**
2 Estado da Arte **3**
2.1 Compósitos 3
2.1.1 Compósitos de Matriz Polimérica 5
2.1.1.1 Fibras de Reforço 6
2.1.1.2 Matrizes Termoplásticas 9
2.1.1.3 Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica 12
2.1.2 Processamento de Materiais Compósitos 17
2.1.2.1 Moldação por Compressão a Quente 17
2.1.2.2 Moldação por Injecção 18
2.1.2.3 Enrolamento Filamentar 19
2.1.2.4 Pultrusão 21
2.2 Tubagens 23
2.2.1 Introdução 23
2.2.2 Tipos de Tubagem 24
2.2.2.1 Polietileno (PE) 24
2.2.2.2 Polipropileno (PP) 25
2.2.2.3 Polibutileno (PB) 25
2.2.2.4 Acrilonitrilo Butadieno e Estireno (ABS) 25
2.2.2.5 Policloreto de Vinilo (PVC) 26
2.3 Reparação de Tubagens 29
2.3.1 Processos de Reparação de Tubagens 29
2.3.1.1 Soldadura Topo a Topo 30
2.3.1.2 Electrosoldadura 31
2.3.1.3 Acessórios Mecânicos 32
2.3.1.4 Reforços 33
2.4 Objectivos do Trabalho 34
3 Procedimento Experimental **35**
3.1 Introdução 35
3.2 Matérias-Primas 36
3.2.1 Fibras de Reforço 36
3.2.2 Policloreto de Vinilo (PVC) 36
3.2.2.1 Determinação da Densidade do PVC 37

3.2.2.2 Caracterização Dimensional do PVC....37
3.2.2.3 Observação por Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM)....38
3.2.2.4 Ensaios com Peneiros....38
3.2.3 Determinação das Propriedades Mecânicas das Matérias-Primas....42
3.2.3.1 Ensaios de Tracção dos Provetes de PVC....42
3.2.3.1.1 Técnica....42
3.2.3.1.2 Preparação e Ensaio dos Provetes....43
3.2.3.1.3 Tratamento dos Resultados....44
3.2.4 Determinação da Massa Volúmica do PVC Processado....46
3.2.5 Análise Termogravimétrica do PVC....46
3.2.5.1 Técnica....46
3.3 Pré-Impregnados....47
3.3.1 Produção de Pré-Impregnados....47
3.3.2 Determinação do Teor de Fibras nos Pré-Impregnados....48
3.3.2.1 Técnica....49
3.3.3 Observação por Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM)....49
3.4 Compósitos....50
3.4.1 Produção de Compósitos....50
3.4.1.1 Produção de Placas Por Compressão a Quente....50
3.4.1.1.1 Consolidação de Towpregs....50
3.4.1.1.2 Consolidação de Pré Impregnados de FV e PVC de baixa viscosidade....51
3.4.1.2 Produção de Anéis Tubulares por Enrolamento Filamentar....52
3.4.2 Ensaios de Compósitos....53
3.4.2.1 Ensaios de Placas....53
3.4.2.1.1 Ensaio de Flexão em Três Pontos....54
3.4.2.1.1.1 Técnica....54
3.4.2.1.1.2 Preparação e Ensaio dos Provetes....56
3.4.2.2 Ensaios de Anéis Tubulares....56
3.4.2.2.1 Ensaio de Tracção (Split Disk)....56
3.4.2.2.1.1 Técnica....57
3.4.2.2.1.2 Ensaio dos Provetes e Tratamento de Dados....58
3.4.2.2.2 Ensaio de Corte Interlaminar....59
3.4.2.2.3 Observação ao Microscópio Electrónico de Varrimento....60
3.4.2.3 Determinação da Fracção Mássica de Fibras....60
3.5 Reparação de Tubagens em PVC....61
3.5.1 Preparação da Tubagem....61
3.5.2 Ensaios de Pressão Interior em Tubagens....63
4 Apresentação e Discussão de Resultados....65
4.1 Caracterização das Matérias-Primas....65
4.1.1 Policloreto de Vinilo....65

4.1.1.1 Determinação da Densidade 65
4.1.1.2 Determinação da Granulometria 66
4.1.1.3 Observação do PVC no Microscópio Electrónico de Varrimento (SEM) 71
4.1.1.4 Determinação das Propriedades Mecânicas do PVC 71
4.1.2 Determinação da Massa Volúmica do PVC Processado 73
4.1.3 Determinação das Propriedades Térmicas do PVC 73
4.1.3.1 Ensaios de Termogravimetria (TGA) 73
4.2 Fabrico e Caracterização de Pré-Impregnados de FV/PVC 74
4.2.1 Fabrico de Pré-Impregnados 74
4.2.2 Determinação dos Teores de Fibra e de Polímero 76
4.2.3 Observação ao Microscópio Electrónico de Varrimento (SEM) 77
4.3 Transformação dos Pré-Impregnados por Compressão a Quente 78
4.3.1 Propriedades Mecânicas das Placas Transformadas por Compressão a Quente 79
4.3.1.1 Propriedades das Placas em Flexão 80
4.4 Consolidação dos Pré-Impregnados por Enrolamento Filamentar 82
4.4.1 Condições de Processamento 82
4.4.2 Determinação das Propriedades Mecânicas em Tracção Através de Ensaios de 'Split-Disk' 83
4.4.3 Determinação da Resistência ao Corte Interlaminar 85
4.4.4 Observação ao Microscópio Electrónico de Varrimento de tubos em FV/PVC 86
4.5 Reparação de Tubagens em PVC 88
4.5.1 Determinação da Pressão Interior em Tubagens de PVC 88
4.6 Comparação de Propriedades de Compósitos FV/PVC com as de Outros Materiais de Uso Corrente em Engenharia 90
5 Conclusões 93
6 Sugestões para Trabalhos Futuros 95
Notação 97
Referências 99
ANEXO I - Propriedades das Matérias-Primas I.1
ANEXO I-1 - Propriedades das Fibras De Vidro I.3
ANEXO I-2 - Policloreto de Vinilo (PVC) I.9
ANEXO II - Propriedades dos Pré-Impregnados de FV/PVC II.1
ANEXO III - Compressão a Quente III.1
ANEXO IV - Enrolamento Filamentar IV.1

CAPÍTULO I

1 Introdução

Os sistemas compósitos, que por definição são constituídos pelo menos por dois materiais distintos com uma interface comum [1], têm vindo a ser largamente utilizados em diferentes aplicações comerciais e industriais, nomeadamente, os de matriz polimérica, cuja aplicação é cada vez mais significativa em mercados como o automóvel e o aeroespacial [2, 3]. Nestes mercados, têm vindo a substituir com vantagem os materiais metálicos nos vários tipos de componentes fabricados, incluindo os componentes estruturais. Entre os compósitos de matriz polimérica já referidos, podem-se distinguir os tradicionalmente mais utilizados, de matriz termoendurecível, e os mais recentes, de matriz termoplástica, que apresentam algumas vantagens, nomeadamente, uma maior tenacidade, maior tolerância ao dano, maior durabilidade e ainda a possibilidade de reprocessamento e reciclagem. Com estas vantagens espera-se uma taxa de crescimento mais acentuada na aplicação deste tipo de matrizes do que a das matrizes termoendurecíveis [4]. No entanto, também se esperam maiores dificuldades, que se traduzem em novos desafios tecnológicos e científicos, nomeadamente, pelos elevados níveis de temperatura e de pressão inerentes ao seu processamento.

De facto, a dificuldade em processar compósitos finais a partir de matrizes termoplásticas, tem influenciado naturalmente a menor aplicação destes, estando o seu desenvolvimento dependente dos processos de transformação, especialmente ao nível da impregnação dos reforços e da consolidação final.

Com este trabalho pretende-se estudar o fabrico de tubagens a partir de compósitos de matriz termoplástica reforçada com fibra de vidro, bem como, desenvolver métodos de reparação em tubagens fabricadas a partir de termoplásticos. Seleccionou-se a fibra de vidro (FV) como reforço e o Policloreto de Vinilo (PVC) como matriz, pelo seu potencial de aplicação na manutenção e na reparação de tubagens industriais, nomeadamente, de tubagens usadas no transporte de fluidos químicos e também pelo facto do seu estudo ser ainda recente. Por outro lado, as fibras de vidro são de longe, o reforço mais utilizado para o fabrico de sistemas compósitos.

Com esse objectivo, começou-se por produzir pré-impregnados de matriz termoplástica reforçada com fibras contínuas, utilizando um equipamento desenvolvido num trabalho de doutoramento anteriormente realizado [5], que permite produzir pré-impregnados flexíveis, designados por

"*towpreg*", por deposição de termoplásticos em pó sobre mechas de fibras de reforço contínuas. Estes pré-impregnados, podem ser directamente utilizados na produção de peças compósitas.

Na fase inicial, o processo de fabrico dos pré-impregnados foi optimizado, variando-se os parâmetros do equipamento, no sentido de estabelecer as condições operacionais adequadas à optimização da deposição do termoplástico nas fibras.

Numa segunda fase, adaptaram-se para a transformação de pré-impregnados de matriz termoplástica duas tecnologias usadas correntemente para o fabrico de compósitos de matriz termoendurecível: a compressão a quente e o enrolamento filamentar. A compressão a quente foi utilizada para transformar os pré-impregnados produzidos anteriormente e outros pré-impregnados, de manta de fibras de vidro e PVC em pasta, em compósitos finais. O enrolamento filamentar foi a tecnologia utilizada para a produção de tubos em compósito, a partir de mechas de fibra de vidro directamente impregnadas com PVC em pasta.

Finalmente, foi estudada a reparação de fendas em tubagens de PVC no sentido de se desenvolverem processos expeditos de reparação de tubagens.

Espera-se com este trabalho contribuir um pouco para o estudo dos processos de transformação de compósitos de matriz termoplástica, bem como, para o desenvolvimento de processos manutenção e reparação de tubagens em PVC.

CAPÍTULO II

2 Estado da Arte

2.1 Compósitos

Um compósito é um sistema estrutural que consiste na combinação de dois ou mais materiais distintos. Os constituintes são combinados ao nível macroscópico e não são solúveis entre si. Um dos constituintes é denominado de reforço e o outro, que é responsável pela impregnação do reforço, é geralmente referido como matriz. O "reforço" é a fase que se caracteriza por possuir maior rigidez, dureza e resistência mecânica, sendo a outra fase a "matriz". Num material compósito a matriz deve garantir a transmissão e repartição dos esforços aplicados pelo reforço [6-9].

Segundo Griffith, os sistemas compósitos apresentam excelentes propriedades pelo facto dos reforços apresentarem propriedades mecânicas muito superiores às dos materiais idênticos na forma maciça. Podem classificar-se segundo vários critérios. No entanto, o tipo de matriz é o mais relevente, distinguindo-se habitualmente as seguintes: matriz polimérica, matriz metálica, matriz cerâmica e matriz cimentosa [10].

Actualmente os reforços mais usados em compósitos de matriz polimérica são as fibras de vidro, de carbono, aramídicas e de boro. No que respeita às matrizes, estas podem ser termoplásticas ou termoendurecíveis. As matrizes termoplásticas actualmente mais utilizadas são de polipropileno (PP), poliamida (PA), policarbonato (PC), poli-éter-éter-cetona (PEEK), as poliimidas termoplásticas polietermidas (PEI), as poliamidas-imidas (PAI), bem como, o polisufureto de fenileno (PPS). No que respeita às matrizes termoendurecíveis, dentre as mais utilizadas destacam-se os poliésteres insaturados, as resinas de viniléster, as resinas fenólicas, as resinas de epóxido, as bismaleimidas e as poliimidas termoendurecíveis.

Apesar de manterem um crescimento significativo ao longo das duas últimas décadas, os compósitos são ainda um material relativamente recente, com uma cota de cerca de 0,5% da totalidade do mercado das matérias-primas empregues no fabrico de componentes, que continua a ser claramente dominado pelo aço (com uma percentagem superior a 70%) [4].

Na Figura 2.1 pode observar-se a evolução da procura dos materiais compósitos em geral, nos últimos anos. Na Figura 2.2 podem observar-se dados recentes relativamente à aplicação destes materiais em diferentes sectores de actividade

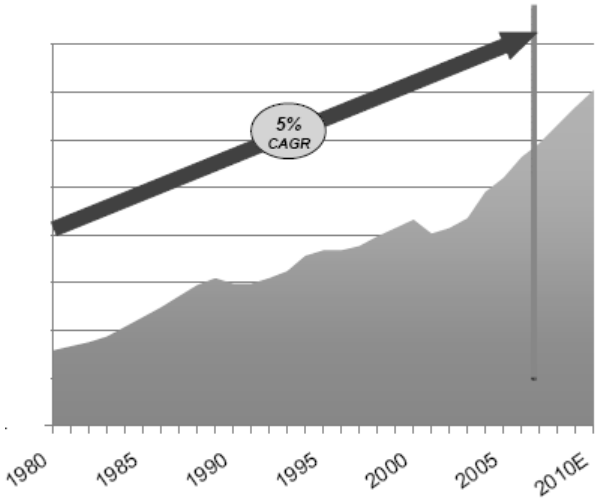


Figura 2.1 Mercado mundial de materiais compósitos [11].

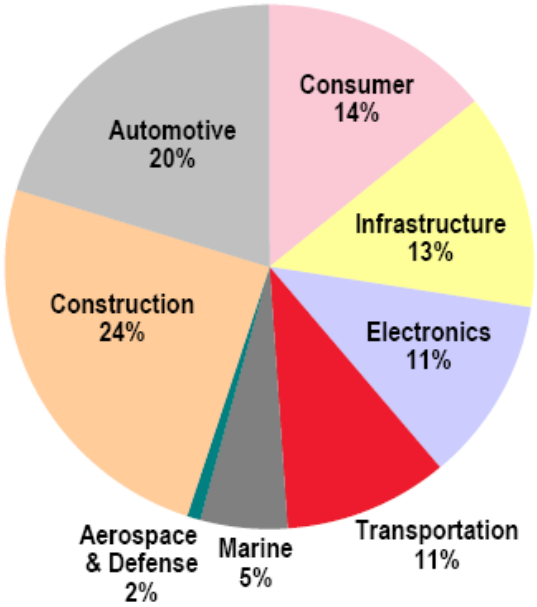


Figura 2.2 Mercado mundial de materiais compósitos por sector de actividade em 2005 [12].

Prevê-se que estes materiais, para além de continuarem a ter uma aplicação significativa em mercados avançados (militar, espacial, aeronáutico e médico), substituam também, de forma crescente, os materiais tradicionais em aplicações mais vulgares de engenharia, como por exemplo nos sectores da construção civil e dos transportes.

Os sistemas compósitos apresentam resistência e rigidez específicas elevadas, grande capacidade de

amortecimento de vibrações, baixo coeficiente de expansão térmica, elevada resistência a temperaturas extremas, à corrosão e ao desgaste.

O aumento da procura de materiais compósitos deve-se ao facto destes permitirem facilmente a combinação de diferentes materiais e tecnologias de fabrico e de apresentarem ainda uma margem de desenvolvimento significativa, com vista à obtenção de cada vez melhores propriedades. Como consequência do aumento da procura destes materiais, têm vindo a ser desenvolvidas diferentes tecnologias de fabrico de compósitos, com características muito distintas, para os diferentes mercados mais relevantes.

Como exemplos de mercados com aplicações destes materiais, podem referir-se o da construção civil, o aeroespacial, a indústria automóvel, o de componentes eléctricos e electrónicos, o de equipamentos domésticos etc.

Os factores chave que contribuem para o desenvolvimento da indústria dos compósitos estão identificados como: i) constante melhoria do rácio custo/desempenho, ii) o crescente uso de matrizes baseadas em polímeros termoplásticos (ecologicamente mais favoráveis) e iii) a facilidade de serem processados em geometrias complexas (permitindo uma grande flexibilidade na concepção com o característico baixo peso). De facto, este último factor será essencial no mercado dos transportes onde as preocupações com a poupança de combustível e consequente diminuição dos níveis de poluição do ar (impacto ambiental) são actualmente consideradas fundamentais [13].

2.1.1 Compósitos de Matriz Polimérica

Os sistemas compósitos de matriz polimérica surgiram, na sua vertente estrutural, em meados do século XX. Este tipo de matriz é a mais usada, podendo o polímero ser do tipo termoplástico ou termoendurecível. Neste trabalho a matriz estudada é do tipo termoplástico.

Os termoplásticos caracterizam-se, nomeadamente, por amolecerem com o aumento da temperatura, pelo que podem ser processados (fundidos) repetidas vezes. Pelo contrário os termoendurecíveis não voltam a amolecer e a fundir por acção da temperatura. O seu reprocessamento requer a trituração e utilização para finalidades distintas das iniciais. Os termoplásticos fundidos apresentam viscosidades mais altas do que os termoendurecíveis, o que torna a sua transformação mais difícil [13-16].

Até finais do séc. XX, os compósitos de matriz termoendurecível tradicionais foram sempre mais utilizados em aplicações estruturais do que os de matriz termoplástica, dada a inexistência de tecnologias que permitissem impregnar convenientemente fibras longas de reforço com termoplásticos, o que conduzia à obtenção de compósitos com fraca adesão fibra/matriz e, consequentemente, propriedades mecânicas mais baixas [17].

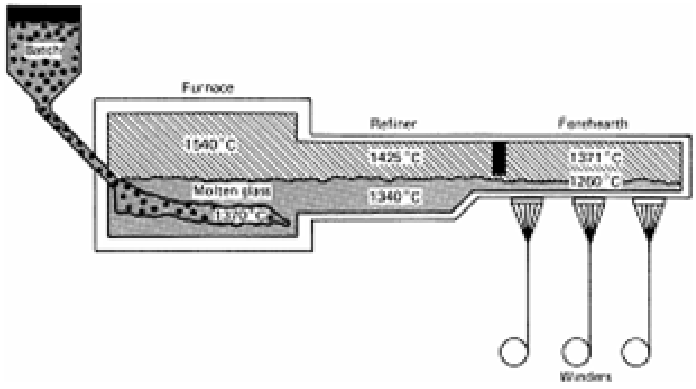
A Tabela 2.1 compara, qualitativamente, as propriedades de transformação mais relevantes dos pré-impregnados de matriz termoplástica e termoendurecível.

Tabela 2.1 Comparação de pré-impregnados com matriz termoplástica e termoendurecível [5]

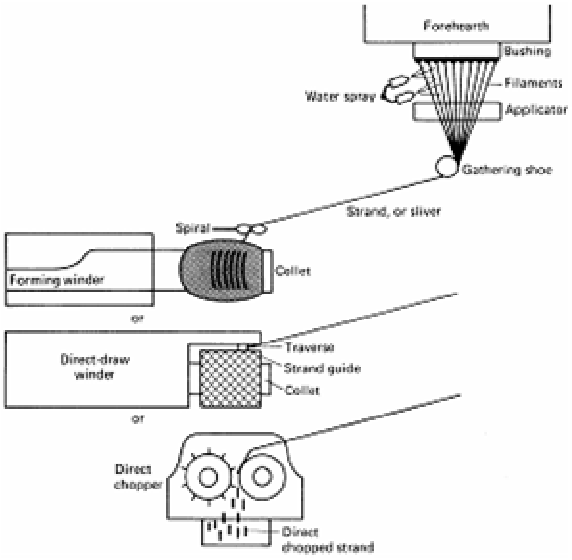
Propriedade	**Fibras de carbono com PEEK (termoplástico)**	**Fibras de carbono com epóxido (termoendurecível)**
Viscosidade	Muito elevada	Baixa a elevada
Fluxo de resina	Baixo	Elevado
Teor de solventes residuais	Baixo	Baixo a elevado
Manuseamento	Muito rígido	Flexível a mole
Flexibilidade (sem aquecimento)	Má	Boa
Condições de armazenamento	Sem condições particulares	Arca frigorífica
Armazenagem	Sem limitações	Limitada

2.1.1.1 Fibras de Reforço

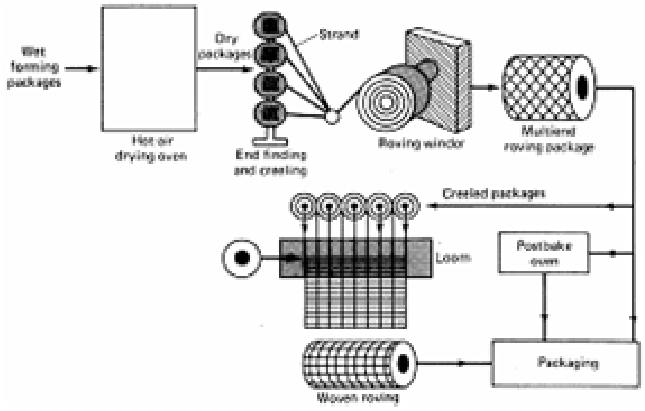
As fibras de vidro são as mais utilizadas como reforço nos sistemas compósitos. São essencialmente constituídas por silício, ao qual se associam diferentes óxidos que facilitam a fusão do vidro de forma a permitir a sua passagem pelas fieiras onde se fabricam os filamentos. Entre as suas características mais importantes salienta-se a excelente aderência à matriz, quando usadas como reforço em materiais compósitos, boas propriedades dieléctricas e uma interessante relação "desempenho mecânico/custo" [18].



a) Fusão do vidro



b) Formação da fibra de vidro



c) Bobinagem das fibras.

Figura 2.3 Representação esquemática da produção de fibras de vidro [19].

Actualmente são produzidas pelo menos três tipos de fibras de vidro sob a forma de fio (ou mechas de filamentos): as do tipo E, tipo S e tipo R. As fibras de vidro são identificadas e classificadas pelas normas BS/ISO. Para caracterizar mechas de fibras contínuas, é corrente utilizar-se o conceito de *Tex*, que indica o peso em gramas de 1000 metros de mechas de fibras.

As fibras de carbono são muito menos usadas que as de vidro. Embora sejam bastante mais rígidas (três a sete vezes mais) são também muito mais caras (cerca de dez a quinze vezes mais), pelo que são geralmente apenas utilizadas em componentes estruturais exigindo módulo muito elevado associado a um baixo peso (elevado módulo específico).

Existem dois tipos de fibras de carbono, as fibras de carbono propriamente ditas, com percentagens de carbono entre 80 e 95%, e as fibras de grafite, com percentagens de carbono de 99%.

A tecnologia mais recente par a produção de fibras de carbono é baseada na decomposição térmica de vários percursores orgânicos: a celulose, que dá origem às chamadas *rayon fibers*, o poliacrilonitrilo (PAN) e o alcatrão (*pitch*).

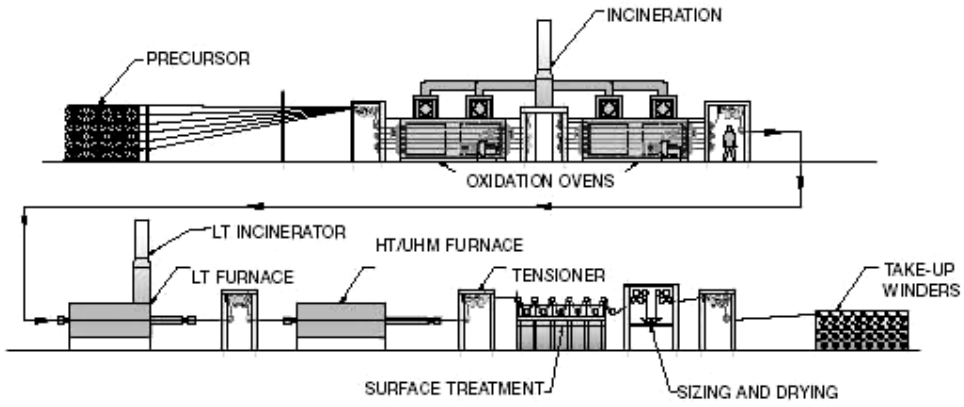


Figura 2.4 Representação esquemática do fabrico de fibras de carbono. [20]

As fibras 'PAN' apresentam, normalmente, uma boa resistência mecânica e elevada adesão "fibra/matriz", enquanto que as fibras *Pitch* exibem um módulo mais elevado [21].

As fibras de carbono apresentam algumas vantagens relativamente às de vidro e às aramídicas, nomeadamente, o seu baixo coeficiente de dilatação térmica e a sua boa condutibilidade eléctrica e térmica. Por outro lado, apresentam também algumas desvantagens, como, o preço mais elevado, uma resistência ao choque inferior e a possibilidade de sofrerem corrosão galvânica no contacto com metais.

As fibras aramídicas são ainda menos empregues que as fibras de vidro e de carbono. Tratam-se de fibras poliméricas, produzidas a partir de poliamidas aromáticas, sendo a solução de polímero mantida a baixa temperatura (entre -50ºC e -80ºC) e depois extrudida a uma temperatura de, aproximadamente, 200ºC. Assim, a cadeia molecular é alinhada, favorecendo as propriedades mecânicas. Estas fibras apresentam uma elevada resistência específica à tracção, ao impacto e à abrasão, e são utilizadas em pequenos "nichos" de mercado dedicados ao fabrico de peças especialmente exigentes do ponto de vista destas propriedades A sua baixa resistência à compressão e à exposição aos raios ultra-violetas, a dificuldade com que podem ser maquinadas, a fraca aderência às matrizes poliméricas, nomeadamente às termoplásticas, e, sobretudo, o seu elevado preço, têm limitado significativamente a sua aplicação.

Na Tabela 2.2 são indicadas as propriedades mecânicas mais relevantes das fibras de reforço acima mencionadas

Tabela 2.2 Propriedades típicas das fibras de reforço [5]

Propriedade	Unidade	Fibras de reforço					
		Vidro			Carbono		Aramida
		E	S	R	Pitch	PAN	Kevlar 29
Densidade	-	2,56	2,49	2,58	2,00	1,80	1,44
Calor específico	kJ/kg·K	0,90	0,73	-	-	-	1,10
Tensão de rotura*	GPa	3,60	4,50	4,40	1,50	2,80	2,80
Módulo*	GPa	76	86	85	380	270	62
Coeficiente de expansão térmica*	10^{-6}/ºC	4,90			-1,30	-0,60	-2,00
Condutibilidade térmica*	W/m·K	1,04			7-28	7-10	-
Tensão de rotura específica*	KNm/kg	1400	1800	1700	750	1555	1944
Módulo específico*	MNm/kg	29,60	34,50	32,90	190	150	43,00
Diâmetro das fibras	μm	3-20	8-13	5-24	10-11	7,50	12

* Propriedades medidas na direcção axial das fibras de reforço.

2.1.1.2 Matrizes Termoplásticas

As matrizes termoplásticas são constituídas maioritariamente por plásticos formados a partir de macromoléculas individuais lineares, sem qualquer reticulação entre si. A reconformação dos termoplásticos é possível quando estes são sujeitos a aquecimento, durante o qual as ligações entre as cadeias macromoleculares deixam de se verificar, permitindo assim a sua fluência. O arrefecimento posterior restitui as ligações entre as cadeias macromoleculares entretanto quebradas.

De um modo geral os polímeros termoplásticos apresentam maior resistência ao impacto, maior tenacidade e são menos higroscópios do que os polímeros termoendurecíveis.

O polipropileno (PP) é um termoplástico branco e opaco, apresenta boa resistência ao impacto, excelente resistência ao ataque químico e resistência às altas temperaturas. A temperatura típica de processamento ronda os 200ºC.

A poliamida (PA) é fortemente higroscópica, apresenta baixo coeficiente de atrito, grande resistência ao desgaste e boa resistência térmica.

O policarbonato (PC) é um polímero incolor, dimensionalmente estável, retardador de chama, pouco higroscópico. Apresenta elevada resistência ao impacto e boa resistência térmica, química e à exposição aos agentes ambientais. É muito utilizado em aplicações de absorção de energia na indústria automóvel. A temperatura típica de processamento é de 200ºC.

O poli-éter-éter-cetona (PEEK), muito utilizado na indústria aeronáutica, é um polímero semicristalino que apresenta uma temperatura de transição vítrea, *Tg*, próxima dos 140ºC podendo ser utilizado em contínuo a temperaturas até 250ºC. A utilização deste polímero como matriz num compósito exige que a impregnação dos reforços seja feita com pressões e temperaturas muito elevadas.

As poliimidas termoplásticas, polietermidas (PEI) e as poliamidas-imidas (PAI), caracterizam-se pela boa resistência a altas temperaturas. São polímeros amorfos com temperaturas de processamento próximas dos 350 ºC, com elevada resistência mecânica e rigidez a altas temperaturas, estabilidade dimensional e boas propriedades eléctricas. São também retardadoras de chama e resistentes a agentes químicos, como, hidrocarbonetos e solventes halogenados. A sua elevada resistência à fluência permite substituir os metais e outros materiais em aplicações estruturais.

O polisufureto de fenileno (PPS) é um polímero semicristaslino com uma temperatura de transição vítrea de 85 ºC, apresentando uma elevada resistência mecânica, química e podendo ser usado em contínuo a temperaturas até aos 225 ºC.

Nas aplicações não estruturais e semi-estruturais utiliza-se, normalmente, o polipropileno, a poliamida e o policarbonato. Em compósitos avançados de alta resistência utiliza-se sobretudo o poli-éter-éter-cetona, a poliamidas e o polisulforeto de fenileno.

Tradicionalmente, a poliamida é o termoplástico mais utilizado como matriz nos materiais compósitos, apesar do seu preço ser mais elevado que o do polipropileno. Isto deve-se, sobretudo, à sua aplicação em peças injectadas para um mercado de tão grande consumo, como é o da indústria automóvel. Trata-se de uma das indústrias pioneiras na aplicação dos termoplásticos reforçados com fibras curtas. Como na altura a injecção era, quase exclusivamente, o único método de produção de termoplásticos reforçados, as peças finais apresentavam fibras de reforço com comprimentos muito pequeno e, consequentemente, relativamente baixas propriedades mecânicas. Uma vez que as poliamidas apresentavam propriedades mecânicas superiores às do polipropileno e as características mecânicas da matriz tinham um contributo decisivo no desempenho mecânico do compósito injectado, a matriz seleccionada era normalmente a poliamida. Relativamente ao Polipropileno, a melhor adesão da poliamida às fibras de reforço, era outra importante justificação para a sua aplicação generalizada. Nos compósitos reforçados com fibras muito curtas pode, muito facilmente, atingir-se o denominado "comprimento crítico" das fibras, isto é, o menor comprimento que as fibras necessitam ter para que se garanta uma efectiva transferência dos esforços mecânicos entre a matriz e as fibras [5].

Tabela 2.3 Propriedades típicas dos termoplásticos mais usados em compósitos [5]

Propriedade	Unidade	Termoplástico					
		ABS	Nylon 66	PEEK	PP	PC	PET
Densidade	-	1,04	1,14	1,3	0,905	1,15	1,36
Calor específico	kJ/kg·K	1,3	1,7	-	2,0	1,2	1,0
Tensão de rotura	MPa	38	70	62	33	65	75
Módulo à flexão	GPa	2,2	2,8	3,8	1,5	2,8	3
Deformação na rotura	%	8	60	4	150	100	70
Preço	-	2,1	3,9	42	1	4,2	3,0
Condutibilidade térmica	W/m·K	0,25	0,24	-	0,20	0,2	0,2
Temperatura de processamento	ºC	252	260	385	204	270	260-310
Temperatura de serviço	ºC	60-105	65-177	177-315	120	120	80-120

* Preço com base num preço para o PP igual à unidade.

Uma vez que o objectivo deste trabalho é o estudo e a reparação de tubagens de policloreto de vinilo reforçado com fibras de vidro, entendeu-se justificável apresentar de seguida algumas informações relevantes sobre este polímero termoplástico.

O PVC é um material plástico sólido que se apresenta na sua forma original como um pó de cor branca. Este termoplástico fabrica-se por polimerização do monómero de cloreto de vinilo que, por sua vez, é obtido do sal e do petróleo. Foi patenteado como fibra sintética há mais de oitenta anos e em 1931 começou a sua comercialização. O PVC é reciclável, leve, quimicamente inerte e completamente inócuo. Resiste ao fogo, é impermeável e isolante térmico, eléctrico e acústico. Pode ser transformado por injecção, moldação-sopro, calandragem, termo-moldação, prensagem, recobrimento e moldação de pastas.

As características do PVC permitem-lhe ser formulado com diversos aditivos, dando origem a compostos destinados ao fabrico de produtos rígidos ou flexíveis, transparentes ou opacos, compactos ou espumas.

O consumo mundial anual de PVC é actualmente de cerca de 30 milhões de toneladas [22], das quais 25% são utilizadas na Europa Ocidental, o que o torna um dos plásticos com maior procura. Utiliza-se principalmente em aplicações de longa duração, tais como: tubos, perfis para janelas e portas, móveis, etc. Para estas aplicações a vida útil poderá variar entre os 15 e os 100 anos. Em aplicações de média duração (componentes para electrodomésticos, peças para automóveis, tapeçarias, mangueiras,

brinquedos, etc.) o material deverá garantir um bom funcionamento até aos 15 anos. Também é utilizado em aplicações de curta duração, nomeadamente, em garrafas, boiões, filmes para embalagens, etc., com uma vida útil até aos 2 anos.

Neste trabalho serão produzidos e estudados compósitos de fibras contínuas tendo como matriz o PVC. A Tabela 2.4 resume as propriedades mecânicas mais relevantes do PVC.

Tabela 2.4 Propriedades mecânicas típicas do PVC [23]

Propriedades	Elastómero	Homopolímero	Flexível	Rígido	Semi-rígido	Valores típicos
Densidade	1,09 a 1,31	0,36 a 1,40	1,14 a 1,45	0,77 a 1,48	1,30 a 1,58	0,53 a 1,86
Módulo à flexão (MPa)	1310	--	290 a 3100	2210 a 3170	379 a 1920	1750 a 2890
Tensão de rotura à tracção (MPa)	1,59 a 21,0	--	0,76 a 34,0	37,6 a 54,3	15,0 a 31,3	1,52 a 164
Elongação (%)	300 a 500	--	240 a 450	2,6 a 66	190 a 300	210 a 450
Dureza Rockwell	--	--	115	89 a 116	--	106 a 116
Impacto Izod (com entalhe) (J/m)	1010	--	107 a 1980	16,0 a 1070	26,7 a 80,1	32,0 a 1190

As propriedades térmicas do termoplástico são muitas vezes determinantes na sua selecção como matriz a utilizar no compósito, dada a forte influência que estas têm, não só no posterior desempenho dos compósitos à temperatura de serviço, mas, também, na facilidade com que eles podem ser processados.

2.1.1.3 Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica

Os pré-impregnados são constituídos por fibras de reforço e pela matriz, podendo ser posteriormente processados em compósitos por aplicação de ciclos de pressão e temperatura.

Os pré-impregnados de matriz termoplástica classificam-se, de acordo com o comprimento característico das fibras de reforço que utilizam, em três grandes grupos: pré-impregnados de fibras curtas (SFRTP – Short Fibre Reinforced Thermoplastic), de fibras longas (LFRTP – Long Fibre Reinforced Thermoplastic) e de fibras contínuas (CFRTP – Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic).

Os pré-impregnados de fibras curtas (SFRTP's) são normalmente produzidos na forma de grânulos, obtidos a partir da mistura das fibras com termoplástico numa extrusora. Este processo de produção é

económico, mas provoca a degradação e a quebra das fibras e apenas permite obter grânulos com fibras com alguns milímetros de comprimento [21].

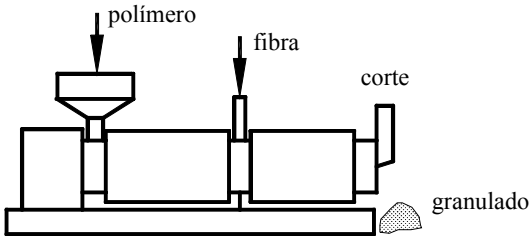


Figura 2.5 Extrusão de grânulos de termoplástico reforçado com fibras curtas [5].

De facto, os elevados esforços de corte introduzidos por este processo de impregnação resultam numa forte quebra, perda de integridade e degradação das fibras.

Os LFRTP's são pré-impregnados que apresentam comprimentos de fibras superiores a 6 mm. São obtidos por co-extrusão ou por pultrusão e dão origem a grânulos cilíndricos alongados (pellets). Estas técnicas de impregnação provocam menor degradação das fibras que os métodos de produção dos SFRTP's e permitem obter pré-impregnados com propriedades mecânicas bastante superiores.

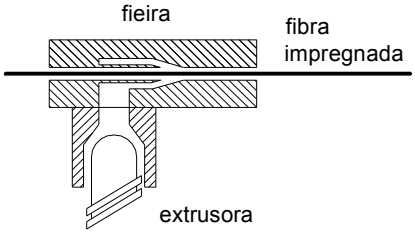


Figura 2.6 Co-extrusão de grânulos reforçados com longas [5].

Por fim, existe ainda um processo de impregnação baseado na fusão directa do polímero representado esquematicamente na Figura 2.7, que se utiliza na produção de GMT's (Glass Mat Thermoplastic)

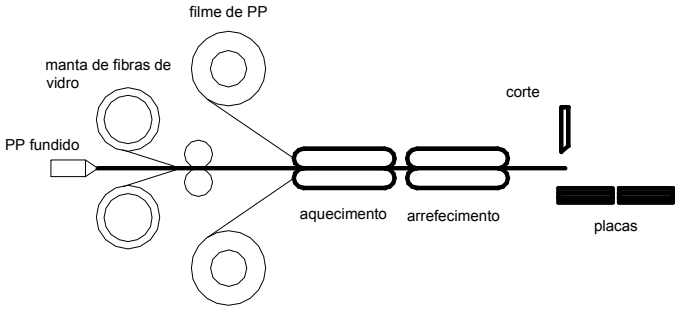


Figura 2.7 Produção de GMT's por impregnação baseada no polímero fundido [5].

Neste último processo, estratificam-se camadas de mantas de fibras de vidro, de polipropileno em filme e de polipropileno fundido, sendo, depois, o conjunto aquecido e levemente prensado. No final, procede-se ao arrefecimento e corte de placas de GMT destinadas a serem posteriormente estampadas.

A Tabela 2.5 permite comparar o desempenho mecânico de compósitos obtidos a partir de pré-impregnados SFRTP e LFRTP.

Tabela 2.5 Propriedades típicas de compósitos LFRTP e SFRTP (adaptado de [24])

Material (PP/vidro)	**Processo**	**Resistência à flexão** (MPa)	**Módulo à flexão** (GPa)	**Resistência à tracção** (MPa)	**Módulo à tracção** (GPa)	**Comprimento das fibras após transformação** (mm)
Pré-impregnado SFRTP	Injecção	-	5,5	77	4,1	0,4
Pré-impregnado LFRTP (fibras com 12 mm de comprimento)	Injecção	165	7,0	100	7,2	4,0
Pré-impregnado LFRTP (fibras com 25 mm de comprimento)	Compressão	137	4,8	98	4,8	22

Como se pode verificar pela análise da tabela, o compósito LFRTP apresenta propriedades mecânicas superiores às do SFRTP.

Actualmente já existe no mercado uma interessante variedade de pré-impregnados de matriz termoplástica reforçada com fibras contínuas. Na Tabela 2.6 apresentam-se as propriedades genéricas de alguns CFRTP's disponíveis comercialmente.

Tabela 2.6 Propriedades típicas de alguns pré-impregnados de fibras contínuas comerciais [5]

Propriedade	**Unidade**	**PP vidro E**	**PP carbono**	**PA vidro E**	**PA carbono**	**PEEK vidro S2**	**PEEK carbono**
Volume de fibras	%	48	50	51	51	53	53
Peso de polímero	%	28	34	30	38	32	40
Peso específico	$g.cm^{-3}$	1,68	1,34	1,83	1,45	1,94	1,56
Temperatura de processamento	ºC	190-230		250-280		370-390	

Os CRFTP's podem-se classificar em duas grandes categorias, de acordo com a flexibilidade que apresentam: os pré-impregnados flexíveis ou com impregnação parcial, caracterizados por não apresentarem as fibras totalmente impregnadas, e os pré-impregnados semi-rígidos ou com impregnação total (de menor flexibilidade) que se apresentam com o reforço completamente impregnado.

Nos pré-impregnados flexíveis, a impregnação total do reforço é feita aquando da sua transformação por acção da temperatura e pressão a que o material é submetido. São exemplos típicos de pré-impregnados com impregnação parcial, as mechas de fibras impregnadas com gotas de termoplástico em pó (normalmente designadas por *towpregs*), as mechas constituídas por filamentos de termoplástico e reforço dispostos paralelamente (*commingled fibres*), as misturas de mechas de reforço com termoplástico em pó embebidas numa bainha de termoplástico (FIT) e ainda os tecidos eventualmente obtidos a partir destes produtos.

Nos pré-impregnados semi-rígidos, o reforço já está totalmente impregnado, sendo a transformação usada para se obter a forma que se pretende para o componente final, por consolidação das camadas empilhadas de pré-impregnado. Estes pré-impregnados são habitualmente designados por *prepregs* e encontram-se comercialmente na forma de placas, chapas laminadas, fitas ou bandas e barras [5].

Os *towpregs*, os *commingled fibres* e os *FIT* são normalmente transformados por pultrusão ou enrolamento filamentar podendo utilizar-se quer a compressão a quente quer a estampagem na produção de componentes a partir dos tecidos flexíveis deles obtidos.

Os *prepregs* em chapa e fita são, por sua vez, normalmente processados por compressão a quente, estampagem ou pultrusão.

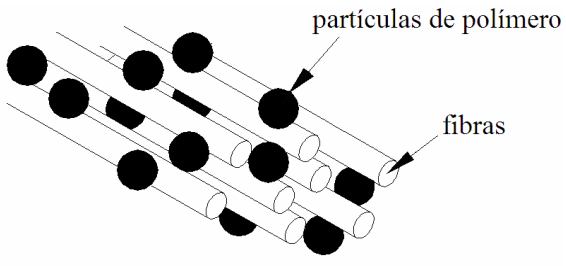


Figura 2.8 Esquema do pré-impregnado *towpreg* [5].

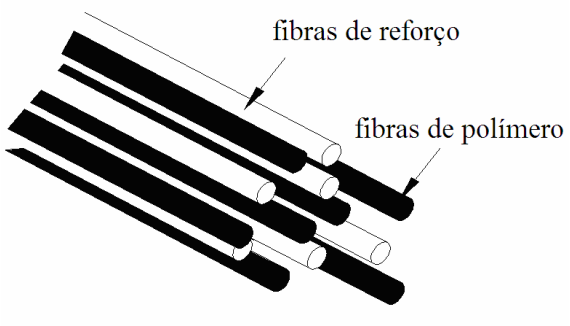


Figura 2.9 Esquema dos *Commingled fiber*' [5].

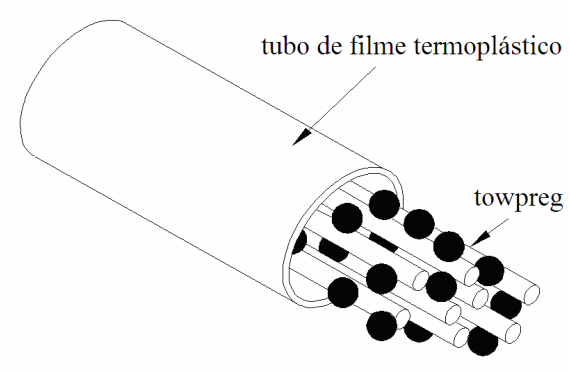


Figura 2.10 FIT – Esquema do Fibre Impregneé de Thermoplastic (FIT) [5].

A Figura 2.11 permite dar uma visão global do mercado de compósitos termoplásticos de fibras longas.

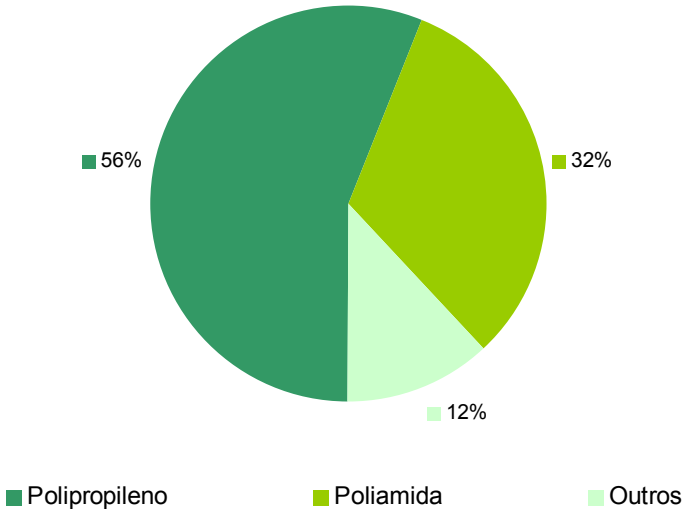


Figura 2.11 Mercado de compósitos termoplásticos de fibras longas, por polímero [25].

2.1.2 Processamento de Materiais Compósitos

O processamento de um material compósito tem uma importância determinante na sua qualidade final. Como tal, é importante seleccionar adequadamente o processo de fabrico e os respectivos parâmetros de processamento, nomeadamente, a pressão, a temperatura e o tempo de processamento.

A optimização dos parâmetros de processamento é função do método de processamento e das propriedades específicas dos materiais. Em todo o caso, é importante evitar processamentos com viscosidades elevadas, bem como, evitar a degradação dos materiais.

Do ponto de vista operacional interessa estabelecer o intervalo de combinações possíveis entre as variáveis de processamento para os diferentes processos de fabrico, no sentido de se obterem peças finais com as características pretendidas. O intervalo de combinações possíveis é designado por "janela de processamento", que se pode observar sob a forma de gráfico na Figura 2.12.

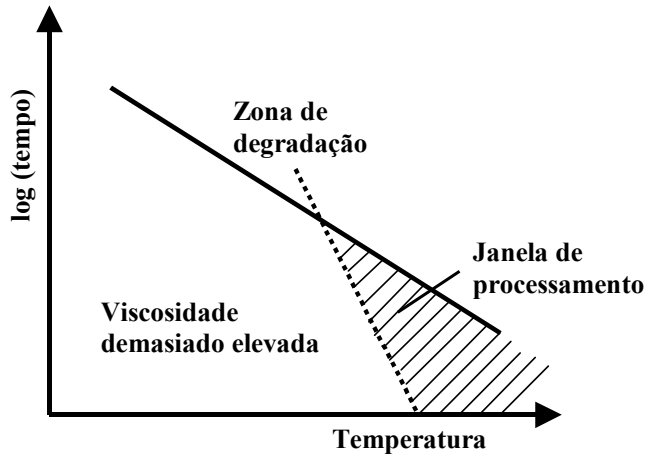


Figura 2.12 Tempo e temperatura correspondentes à "janela de processamento" de um pré-impregnado de matriz termoplástica [26].

Com este gráfico é possível relacionar a temperatura e o tempo de processamento, permitindo, por um lado perceber qual o tempo de processamento máximo sem que ocorra a degradação do material e, por outro, perceber que se a temperatura de processamento for demasiado baixa, conduzirá a uma viscosidade da matriz muito elevada e, consequentemente, a um tempo de transformação tão longo, que o processo se torna comercialmente inviável.

Os processos de transformação de termoplásticos reforçados actualmente mais utilizados são: moldação por compressão a quente, moldação por injecção, o enrolamento filamentar e a pultrusão.

2.1.2.1 Moldação por Compressão a Quente

A moldação por compressão pode ser feita a frio ou a quente, dependendo da necessidade de pré-aquecimento dos moldes utilizados. Com este processo é possível fabricar peças para a indústria

automóvel, nomeadamente, peças para as carroçarias ou outros componentes estruturais, equipamentos eléctricos e electrónicos, banheiras e mobiliário urbano [27].

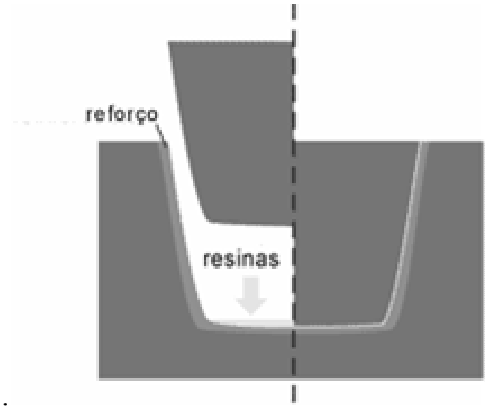


Figura 2.13 Esquema de processamento por moldação por compressão.

A compressão a quente é um processo similar ao da compressão a frio, porém, os moldes são pré-aquecidos, e as pressões utilizadas podem ser muito elevadas, o que obriga à utilização de moldes resistentes. Os laminados compósitos são fabricados colocando o pré-impregnado na cavidade do molde, colocado entre os pratos de uma prensa, aplicando um ciclo de pressão e temperatura. Normalmente, procede-se ao aquecimento do molde até à temperatura de processamento desejada, e, de seguida, aplica-se pressão, mantendo-se a temperatura durante o tempo de consolidação necessário. Finalmente, procede-se ao arrefecimento do molde, retira-se a pressão e extrai-se o laminado.

Os ciclos de processamento são mais rápidos que os da compressão a frio o que permite uma cadência de produção mais elevada. As peças fabricadas por este processo podem ser mais complexas e com melhores propriedades mecânicas.

A compressão a quente é a tecnologia de transformação de pré-impregnados de matriz termoplástica mais utilizada nos estudos experimentais necessários à validação de modelos teóricos de consolidação. Este facto, deve-se à simplicidade deste processo de fabrico bem como ao fácil controlo dos parâmetros operatórios mais importantes: pressão e temperatura.

2.1.2.2 Moldação por Injecção

A moldação por injecção é o processo utilizado há mais tempo, sendo ainda o mais usado para fabricar compósitos de fibras curtas e muito utilizado na produção de grandes séries de peças.

O ciclo de injecção divide-se em várias fases, iniciando com o fecho do molde, seguindo-se a injecção, a pressurização, a plasticização, o arrefecimento e finalmente a extracção.

Neste processo as pressões variam entre os 300 e os 1500 MPa e as temperaturas entre os 200º e os 350ºC, para a matéria-prima, e, entre os 20º e os 120ºC, para o molde. Como tal, os moldes são normalmente em aços tratados para suportarem aquelas condições.

Actualmente, existem máquinas de injecção equipadas com vários sensores e microprocessadores que permitem a monitorização do processo, bem como, correcções em tempo real, nomeadamente, da dosagem de matéria-prima, da temperatura de injecção, da temperatura do molde, da velocidade e pressão de injecção, o que torna possível obter peças de alta qualidade. Existem também alguns processos de produção de compósitos por injecção a baixa pressão e por transferência de resina, como é o caso do RTM, S-RIM e R-RIM. Nestes processos de injecção a baixa pressão são utilizadas resinas de baixa viscosidade que permitem usar reforços de fibras contínuas, com grandes vantagens ao nível as propriedades mecânicas.

2.1.2.3 Enrolamento Filamentar

O enrolamento filamentar é uma tecnologia usada no fabrico de estruturas compósitas com simetria axial, como, reservatórios de pressão, peças esféricas ou cilíndrico-esféricas, tubos cilíndricos, quadrangulares ou hexagonais, com taxas de reforço de 60 a 75% de fibras em peso.

Este processo consiste, basicamente, no enrolamento de bandas ou mechas de fibras de reforço com ângulos pré-determinados, sobre um mandril em rotação [28,29], conforme se pode observar pela Figura 2.14.

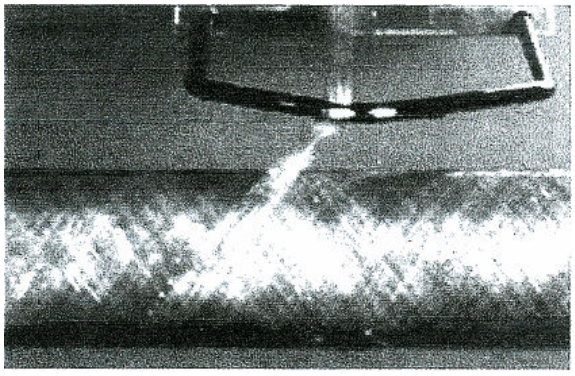


Figura 2.14 Enrolamento de fibras sobre o mandril.

As principais variáveis de processamento a considerar no enrolamento filamentar com matrizes termoplásticas são: o material do mandril, velocidade de produção, intensidade do aquecimento, temperatura atingida no aquecimento, pressão de consolidação, temperaturas de pré-aquecimento, taxas de aquecimento e arrefecimento, tensão nas mechas pré-impregnadas e a temperatura do mandril.

Este processo utiliza uma máquina com vários eixos de controlo numérico que permite posicionar, no mandril as fibras impregnadas, na quantidade e orientação necessárias para construir a estrutura reforçada desejada. Podem ser utilizados pré-impregnados de matriz termoplástica, que são directamente enrolados em torno do mandril (processo representado esquematicamente na Figura 2.15) ou então fibras que são impregnadas antes do enrolamento, como é norma no fabrico de compósitos de matriz termoendurecível (processo representado esquematicamente na Figura 2.16). Os filamentos são então enrolados em várias camadas no mandril rotativo. Após esta fase de enrolamento procede-se à consolidação através do sistema de aquecimento

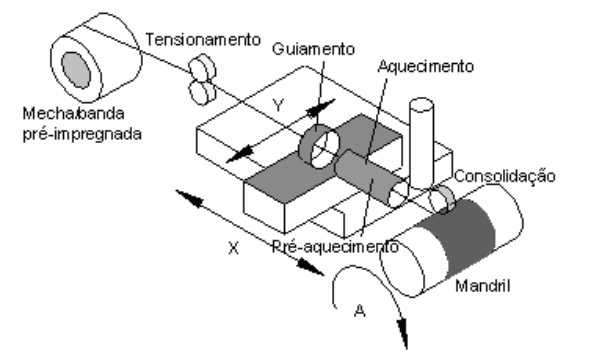


Figura 2.15 Esquema de processamento **e**nrolamento filamentar de fibras com matriz termoplástica (adaptado de [30]).

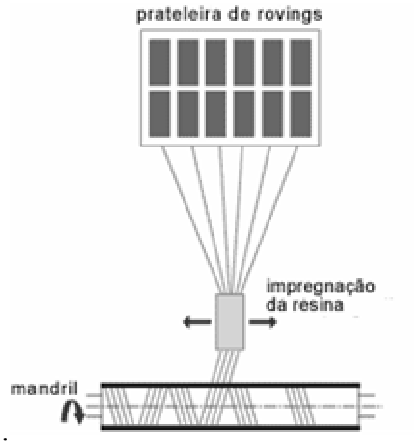


Figura 2.16 Esquema de processamento por enrolamento filamentar com matrizes termoendurecíveis-[31].

Os movimentos de translação e rotação do olhal de deposição e de transporte das fibras de reforço são sincronizados com os do mandril, conseguindo-se obter padrões de enrolamento muito complexos com controlo do ângulo de enrolamento [32]. As mechas de reforço, mantidas sob tensão por sistemas apropriados, são enroladas até que haja uma cobertura completa do mandril. A obtenção da espessura

desejada é conseguida pela sobreposição sucessiva das camadas, onde os ângulos de orientação das fibras podem ser diferentes.

O ângulo de orientação das fibras, normalmente medido relativamente ao eixo longitudinal do mandril tubular, pode variar desde valores baixos (enrolamento quase longitudinal) até aproximadamente 90º (enrolamento circunferencial).

O sistema de pré-aquecimento, é determinante para o estabelecimento da velocidade máxima de enrolamento que pode ser usada [33]. A temperatura de pré-aquecimento deverá ser convenientemente estabelecida de acordo com os outros parâmetros do processo [34]. Utilizam-se, normalmente, sistemas eléctricos ou por infra-vermelhos no pré-aquecimento, que é geralmente efectuado antes da zona de consolidação para que as perdas térmicas sejam mínimas [35].

Para a consolidação de termoplásticos por enrolamento filamentar existem quatro tipos de sistemas de aquecimento: ar quente, infravermelhos, aquecimento por chama e LASER, [5].

A optimização dos parâmetros do enrolamento filamentar é, normalmente, realizada por via experimental, já que a utilização de modelos analíticos expeditos é limitada pela complexidade dos fenómenos envolvidos e a quantidade de variáveis operacionais em jogo [5].

2.1.2.4 Pultrusão

A pultrusão, cujo esquema se mostra na Figura 2.17, é um processo contínuo através do qual se produzem perfis de secção constante, ocos ou maciços, de diferentes formas. Normalmente são utilizados reforços de fibras de vidro, tipicamente na forma de bobinas, mantas ou tecidos, dispostos de modo a proporcionarem um reforço longitudinal. O reforço é obrigado a passar por um recipiente com resina no estado líquido, normalmente resina de poliester, onde se dá a impregnação. De seguida, passa através de uma fieira de aço pré-aquecida, designada por molde ou fieira, que garante a forma do perfil e polimeriza o reforço impregnado. À saída da fieira, o perfil é puxado pelo módulo de arrasto e, cortado no comprimento desejado. A velocidade típica da pultrusão varia entre os 0,5 e os 2 metros por minuto, dependendo da resina, das espessuras e da complexidade do perfil. No caso de se utilizar esta tecnologia com pré-impregnados de matriz termoplástica, as mechas são conduzidas directamente para a fieira mais complexa, onde são aquecidas e comprimidas e, posteriormente, arrefecidas sob pressão.

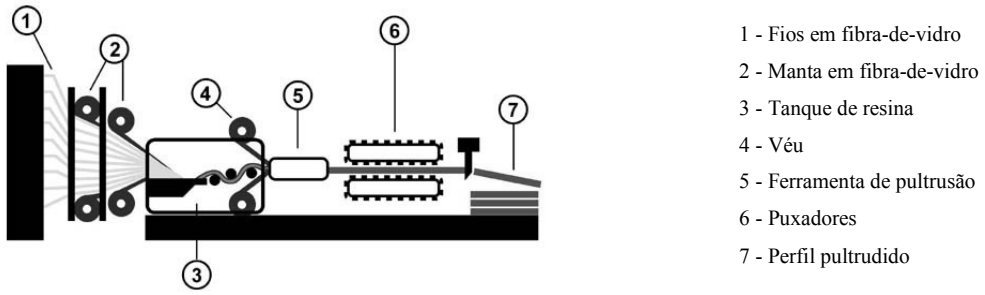


Figura 2.17 Representação esquemática da moldação por pultrusão [36].

Este processo de produção contínua e totalmente automática tem pouca incorporação de mão-de-obra no produto final, permite obter perfis com grande variedade de secções com excelentes características mecânicas na direcção longitudinal, devido às elevadas percentagens de fibras (30 a 70%) em peso.

2.2 Tubagens

2.2.1 Introdução

Nos últimos anos ao longo de todo o mundo, a importância de tubos plásticos na concepção de sistemas de canalizações públicas e industriais, de abastecimento de água e esgoto e outras, tem aumentado gradualmente. Esta tendência reflecte uma crescente confiança nos materiais plásticos, talvez devido principalmente a um maior conhecimento e experiência a nível mundial neste domínio.

Os plásticos são na sua maioria fabricados com base em matéria-prima proveniente do petróleo, sendo que, apenas aproximadamente 4% da produção mundial de petróleo é utilizado para o fabrico de plásticos, enquanto 96% são queimados como combustível até nas áreas de transportes, aquecimento, etc [37].

Os plásticos pertencem ao grupo de materiais polímeros, e são geralmente produzidas por polimerização simples de substâncias orgânicas.

Existem diversos tipos de plásticos que são utilizados no fabrico de tubagens, sendo os mais comuns, o policloreto de vinilo (PVC), o polietileno (PE) e o polipropileno (PP).

Estes materiais plásticos permitem obter tubagens cujas propriedades são compatíveis com aplicações domésticas e industriais, como por exemplo, redes pressurizadas de água quente e fria, redes de distribuição de gás, redes de esgotos, sistemas de climatização e redes de transporte de fluidos industriais.

As tubagens fabricadas com estes materiais apresentam como características principais a leveza, boa flexibilidade e resistência química, excelente durabilidade e uma relação custo-eficácia favorável, quando comparadas com tubagens em aço, sendo ainda fáceis de instalar e com exigências mínimas em termos de manutenção.

O fabrico de tubagens é normalmente feito por extrusão podendo ser usados aditivos que melhoram as suas propriedades de acordo com as aplicações finais.

Os tubos de plástico em PVC foram desenvolvidos por volta de 1935, os de polietileno de baixa densidade (PEBD) em 1945, os de polietileno de alta densidade (PEAD) e os reforçados com fibras de vidro (GRP) por volta de 1955.

Os termoplásticos de PE e de PVC predominantes são os mais utilizados para o transporte de água e de esgoto. Estes termoplásticos podem ser reforçados com fibras de vidro e resinas, normalmente de poliéster.

2.2.2 Tipos de Tubagem

2.2.2.1 Polietileno (PE)

As tubagens de PE são fabricadas por extrusão e são utilizadas numa ampla gama de aplicações, nomeadamente, no transporte de água, na distribuição de gás natural e em esgotos [37].

Do polietileno derivaram alguns outros materiais, como o polietileno reticulado, designado por PEX, cujas tubagens são normalmente utilizadas em instalações de água quente e fria.

Os tubos PEX podem ser fabricados de três formas distintas, consoante a orientação das cadeias poliméricas. Das suas características destacam-se a elevada resistência a fluidos agressivos, nomeadamente, substâncias ácidas e básicas, a resistência à corrosão externa e a baixa condutibilidade térmica que permite reduzir a dispersão térmica no transporte de água quente. Estas tubagens são aplicadas em sistemas de aquecimento por radiadores e em redes sanitárias.

Outro material derivado do PE é o polietileno resistente à temperatura (PE-RT), que apresenta propriedades melhoradas relativamente ao polietileno, nomeadamente, maior resistência a temperaturas elevadas. A sua resistência à baixa ou alta temperatura torna o PE-RT ideal para uma ampla gama aplicações com água quente e fria, por exemplo, sistemas de aquecimento de piso radiante e aplicações industriais. As tubagens PE-RT foram desenvolvidas desde há cerca de 20 anos e foram ganhando popularidade ao longo dos últimos anos.

Actualmente existem soluções comerciais que combinam o plástico com metais. Trata-se de um tubo composto por duas finas camadas de polietileno reticulado (PEX) separadas por uma finíssima camada de alumínio, como se pode ver na Figura 2.18. Para a execução da soldadura do alumínio, utiliza-se uma tecnologia de soldadura a laser.



Figura 2.18 Esquema de um tubo composto.

Nos últimos anos vários têm sido desenvolvidos novos polietilenos de média densidade, que para além da sua flexibilidade apresentam uma resistência idêntica à do polietileno de alta densidade, ou ainda superior, quando sujeitos a temperaturas elevadas.

Existem outros termoplásticos para a produção de tubos, como, o polipropileno (PP), o polibutileno (PB), e o acrilonitrilo butadieno e estireno (ABS).

2.2.2.2 Polipropileno (PP)

Os tubos de PP são normalmente fabricados por extrusão e têm sido utilizados desde 1955 especialmente para o transporte de efluentes industriais quentes. Hoje, estes têm uma maior utilização em instalações domésticas de água quente e fria, em sistemas de aquecimento, em esgotos e em sistemas de drenagem de solos. A Figura 2.19 pode ver-se a instalação de tubagem para transporte de esgoto de grande diâmetro.



Figura 2.19 Tubagens em PP usadas no transporte de esgotos [37].

2.2.2.3 Polibutileno (PB)

O PB é um polímero (butileno) fabricado a partir de derivados de combustíveis fósseis (petróleo, gás e carvão) combinando flexibilidade com elevada resistência a temperaturas elevadas. Os tubos de PB são fabricados por extrusão desde dos anos 1950's, mas, só desde os anos1960's é que foram produzidos industrialmente. As tubagens em PB são utilizadas em instalações de água quente e fria [37].

2.2.2.4 Acrilonitrilo Butadieno e Estireno (ABS)

O ABS é um material termoplástico também aplicado no fabrico de tubos por extrusão desde os anos 1950's. É utilizado em sistemas de canalização industriais onde a resistência ao impacto e a rigidez são factores cruciais. A sua relação custo/eficácia tornou o ABS num popular plástico de engenharia [37].

2.2.2.5 Policloreto de Vinilo (PVC)

Desde 1960, o total da utilização de policloreto de vinilo (PVC) nos países nórdicos passou de cerca de 30.000 toneladas para 150.000 em 1970 e atingiu 270.000 em 1985. Durante o mesmo período, o uso de polietileno de baixa densidade estima-se que tenha crescido a partir de 85.000 para 500.000 toneladas, enquanto que o polietileno de alta densidade passou de 20.000 para 60.000 toneladas em 1970 e para 175.000 toneladas em 1985 [37].

Assim, o uso de plásticos está a expandir-se rapidamente, e, especialmente, no caso das tubagens de plástico. Isto é particularmente verdade para tubos de água e esgoto de aplicação exterior e interior. Todos os países industriais mostram a mesma tendência. Como exemplo, pode referir-se que a produção de tubo plástico na Europa Ocidental passou de cerca de 1,4 milhões de toneladas em 1985 para 2,2 milhões de toneladas em 1993. Os valores correspondentes para os E.U.A. foram de 1,8 milhões de toneladas em 1986 e 2,2 milhões de toneladas em 1993.

Na Figura 2.20 pode observar-se o consumo de PVC por aplicação (%) na Europa Ocidental em 2001.

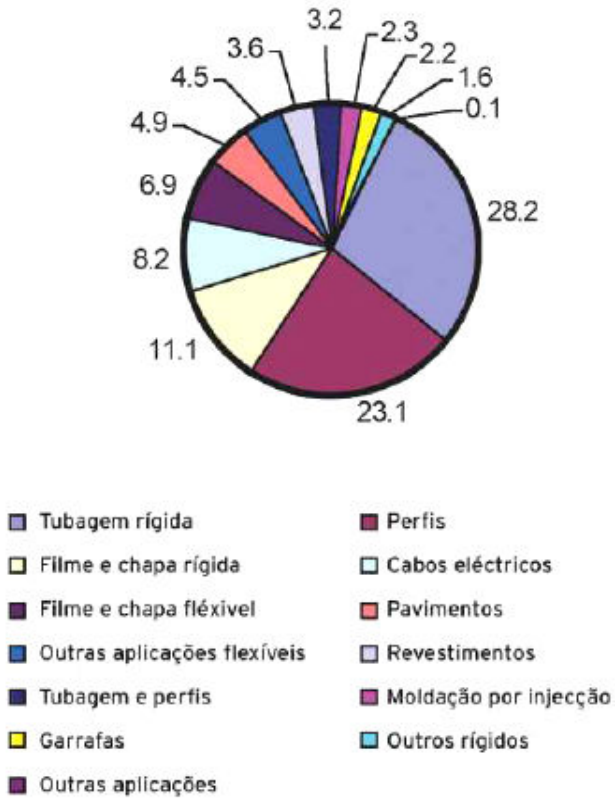


Figura 2.20 Consumo de PVC por aplicação (%) na Europa Ocidental em 2001 [22].

Em 2002, o consumo mundial de PVC excedeu as 28 milhões de toneladas, das quais cerca de 20% são usadas na Europa Ocidental.

A evolução favorável dos preços, também contribuiu para o facto de que hoje os tubos plásticos são competitivos relativamente aos tubos metálicos convencionais, usados em engenharia.

Em Portugal o consumo de PVC nos últimos anos tem variado, conforme se pode observar pela Tabela 2.7.

Tabela 2.7 Consumo de PVC em Portugal [38]

Ano	1999	2000	2001	2002	2003
Consumo total aparente de PVC (toneladas)	537,882	529,686	535,979	548,307	537,302

As tubagens de PVC são normalmente fabricadas por extrusão. Estas tubagens são altamente versáteis, pois podem ser utilizadas em esgotos, redes de distribuição de água, redes de distribuição de gás e em diversas instalações industriais. A utilização deste tipo de tubagens generalizou-se por volta dos anos 1950's. Estas tubagens são hoje muito utilizadas na construção de redes de sistemas de esgoto.

Existem vários tipos de tubagem em PVC, dos quais se destacam as tubagens compactas de PVC-U (não plasticizado), tubagens compactas de PVC-O (orientado), PVC-C (clorado) tubagens estruturadas, do tipo multicamada, de dupla parede corrugada e alveolares [38].

As tubagens compactas de PVC-U são obtidas pelo tradicional processo de extrusão. As compactas de PVC-O são fabricadas por um processo que reorienta as cadeias moleculares compridas de tubos de PVC-U produzidos previamente por extrusão. Este processo de reorientação molecular, na direcção circunferencial ou longitudinal, melhora notavelmente as propriedades, nomeadamente, a tensão circunferencial, a resistência ao impacto e a resistência à fadiga. As tubagens estruturadas são fabricadas por um processo de extrusão que varia segundo o desenho da parede da tubagem. Este desenho de parede estruturada faz com que aumente o seu momento de inércia, aumente a rigidez anelar sem necessidade de aumentar a espessura de parede, resolvendo de forma económica a resistência da tubagem a cargas externas. Entre os distintos tipos de parede estruturada podemos encontrar, entre outros: tubos multicamada, tubos de dupla parede corrugada e tubos alveolares.

As tubagens multicamada (Figura 2.21) têm na sua parede uma camada interna e outra externa compactas, que conferem à tubagem boa resistência externa aos choques, boa resistência ao ataque químico e abrasivo dos agentes que a envolvem, assim como, boa resistência ao ataque químico dos fluidos que circulam pelo seu interior. A camada central, expandida, permite reduzir o peso da tubagem em 20 ou 30% comparado com as tubagens compactas. Outra possibilidade é incorporar na

camada central PVC-U reciclado, mantendo as propriedades mecânicas, graças às camadas compactas interior e exterior.

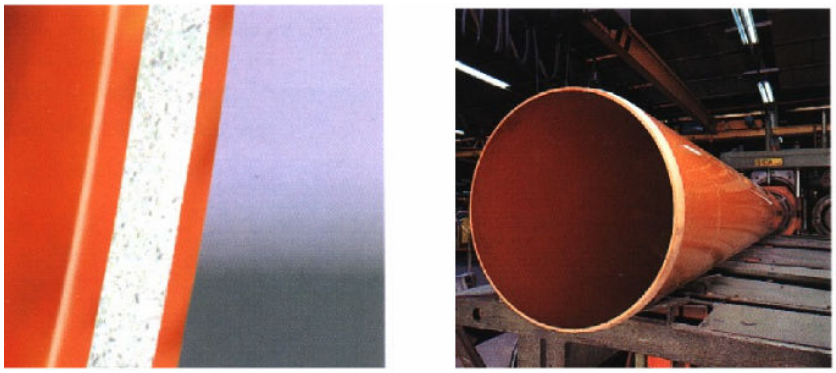


Figura 2.21 Tubagem de PVC multicamada [38].

As tubagens de dupla parede corrugada (Figura 2.22) são fabricadas por extrusão de um duplo tubo que mediante um equipamento especial de corrugação em contínuo, conforma o exterior do tubo, permanecendo o seu interior totalmente liso. Os tubos fabricam-se com copo e a união entre eles e entre tubos e peças realiza-se mediante junta elástica.

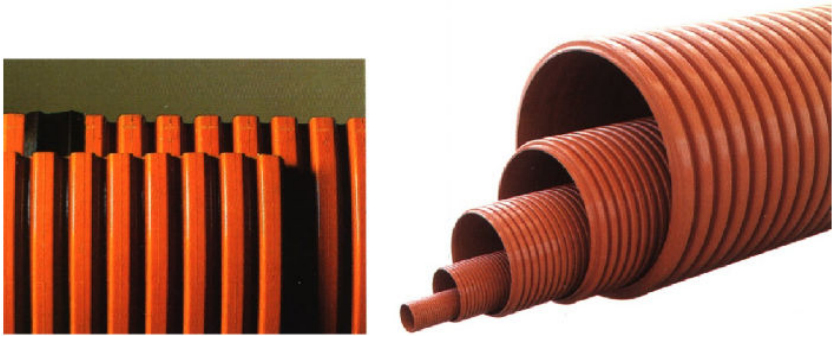


Figura 2.22 Tubagem de PVC de dupla parede corrugada [38].

O desenho das tubagens corrugadas aumenta o momento de inércia, sem necessidade de incrementar o peso por aumento de espessura de parede, resolvendo economicamente a compressão da tubagem.

As tubagens de PVC resistem normalmente bem aos ácidos e às bases assim como aos óleos, álcoois e aos hidrocarbonetos. No entanto, são sensíveis aos hidrocarbonetos aromáticos e clorados, aos ésteres e cetonas.

As principais aplicações das tubagens em PVC são:

- Condução de água potável e não potável, com e sem pressão
- Evacuação de águas pluviais
- Evacuação de águas residuais no interior de edifícios
- Redes de saneamento com e sem pressão

- Drenagem agrícola
- Drenagem obra civil
- Canalizações de rego
- Protecção de cabos eléctricos
- Redes enterradas contra incêndios
- Tubagens de arejamento e ventilação
- Cofragem perdida
- Conduções industriais de fluidos ácidos e alcalinos
- Caleiras para águas pluviais

2.3 Reparação de Tubagens

2.3.1 Processos de Reparação de Tubagens

As tubagens, em geral, podem ser reparadas por alguns processos distintos, nomeadamente, através da interposição de acessórios, por soldadura do tipo topo a topo ou electrosoldadura e através de reforços.

O critério de selecção deve ser determinado de acordo com a configuração da tubagem, os diâmetros e pressões a empregar, a disponibilidade de equipamentos, a acessibilidade, o custo da reparação, as características dos fluidos que são transportados no interior das tubagens, o tempo de reparação, a resistência da soldadura, etc.

No que diz respeito aos processos de reparação por soldadura referidos, pode dizer-se que são eficazes e oferecem notáveis rendimentos assim como garantem uma total estanquidade das uniões obtidas, embora existam diferenças entre os dois métodos referidos (electrosoldadura e soldadura topo-a-topo), das quais se destacam:

- na soldadura topo a topo o equipamento fica imobilizado enquanto se desenvolve o processo, que só finaliza aquando do arrefecimento da união. Por outro lado, o sistema de electrosoldadura permite o uso do equipamento noutra soldadura logo após o tempo de fusão;
- os equipamentos de electrosoldadura são mais leves, têm um custo inferior e têm pouca manutenção;
- a electrosoldadura é possível em situações de obra difíceis, sendo ideal para efectuar reparações onde não são possíveis movimentos longitudinais da tubagem;
- a electrosoldadura é limitada pelo limite do diâmetro máximo dos acessórios disponíveis no mercado, enquanto a soldadura topo a topo, não tem limite neste sentido;
- a electrosoldadura permite unir tubos de diferente material, com diferente espessura de parede, o que não é recomendável no caso da soldadura topo a topo.

2.3.1.1 Soldadura Topo a Topo

Trata-se de um sistema empregue para a união de tubagens e acessórios fabricados em PEAD, para diâmetros superiores a 90mm. O processo efectua-se mediante o aquecimento dos extremos dos dois tubos através do uso de uma placa de aquecimento, até se alcançar a fusão das superfícies em contacto.

As variáveis do processo, temperatura, pressão e tempo, devem ser ajustadas de modo a impedir a alteração das propriedades físicas originais do material, tendo em conta a matéria-prima, o diâmetro e a espessura da parede do tubo. Neste processo a temperatura deve ser da ordem dos 210 ± 10 ºC. O processo encontra-se esquematizado na Figura 2.23.

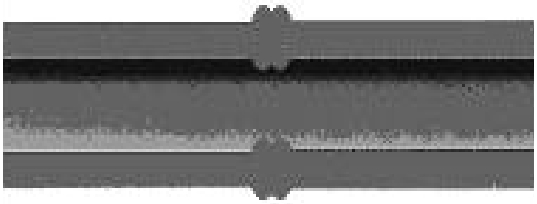
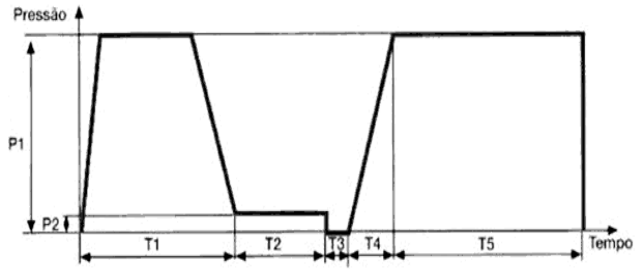


Figura 2.23 Esquemas do processo de soldadura topo a topo.

Este tipo de soldaduras implica a uma interrupção de serviço da tubagem para preparação dos tubos e pressupõe a utilização de equipamentos específicos, nomeadamente, um gerador de electricidade ou ligação à rede, uma máquina de soldar com base e maxilas para fixação dos tubos a soldar, uma rectificadora, uma placa de aquecimento com indicador de temperatura e um equipamento hidráulico com controlo de pressão para movimentar as maxilas.

Neste processo de soldadura é importante garantir o perfeito alinhamento entre os tubos a soldar e a rectificação do perímetro da zona a soldar, para se obter uma superfície isenta de resíduos. A soldadura é conseguida através de um ciclo de pressão e temperatura (Figura.2.24) utilizando a referida placa de aquecimento entre os topos do tubos a soldar, até se conseguir que os extremos formem um cordão uniforme sobre esta em todo o seu perímetro.



P1 Pressão de operação
P2 Pressão de aquecimento
T1 Tempo para a formação do cordão uniforme de altura
T2 Tempo de aquecimento
T3 Tempo de remoção da placa de aquecimento
T4 Tempo de aumento gradual da pressão (soldadura)
T5 Tempo de arrefecimento

Figura 2.24 Ciclo de pressão e temperatura para a soldadura do tipo topo a topo.

2.3.1.2 Electrosoldadura

A electrosoldadura é um método de ligação de tubagens através de acessórios com resistências eléctricas que contactam a tubagem pelo exterior (Figura 2.25). As resistências eléctricas aquecem quando sujeitas a tensão eléctrica, fundindo o material tanto do acessório como da tubagem de forma homogénea. Após arrefecimento estes materiais solidificam dando-se a soldadura dos mesmos.

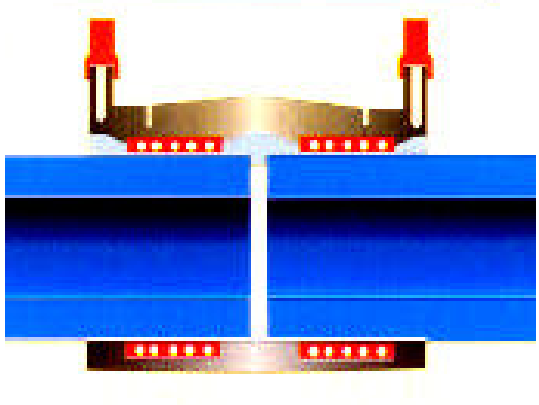


Figura 2.25 Esquema do processo de electrosoldadura.

A utilização deste método pressupõe essencialmente os seguintes requisitos:

- a dimensão dos acessórios têm que ser compatíveis com os tubos a soldar;
- as resistências internas devem estar o mais próximo possível das superfícies a unir e perfeitamente colocadas e controladas durante o processo de fusão;
- a distribuição de calor deve repartir-se de forma controlada e uniforme sobre a superfície a soldar;
- a pressão e temperatura de fusão devem controlar-se com precisão;
- o controlo adequado do tempo de soldadura em função da temperatura ambiente.

O processo de ligação mediante a técnica de electrosoldadura é simples, rápido e eficiente. Podem efectuar-se ligações com uma preparação mínima, mas as superfícies a unir devem encontrar-se totalmente secas.

No posicionamento dos tubos, devem tomar-se as precauções necessárias para evitar movimentos do conjunto durante o processo de fusão. Para isso é recomendável utilizar posicionadores que fixam o tubo e que minimizam o risco de um movimento acidental, ao mesmo tempo que alinham correctamente os tubos. Estes posicionadores são necessários no caso de uniões de tubagens até 180 mm, em todos os diâmetros de tubagens em bobines e quando o alinhamento do tubo é difícil.

O material fundido deverá ser visível através dos orifícios (testemunhos) junto aos terminais, indicando assim que o processo foi concluído com êxito.

Depois do ciclo de aquecimento deve-se retirar as ligações eléctricas e deixar arrefecer o tubo agora soldado o tempo necessário sem o retirar do posicionador. Decorrido o tempo de arrefecimento poderá retirar-se o elemento posicionador, sem submeter a tubagem à pressão até que a união atinja a temperatura ambiente.

2.3.1.3 Acessórios Mecânicos

Além das ligações por soldadura, também se podem ligar tubagens recorrendo a ligações roscadas, de plástico ou metal, nomeadamente em instalações de abastecimento de água potável. Os acessórios de ligação podem ser utilizados para a reparação de tubagens sendo constituídos basicamente por: um corpo que se une ao tubo, um aro dentado de fixação, que pode ser de material plástico ou metálico, uma junta de estanquicidade, e, uma peça móvel roscada ou aparafusada ao corpo. Tanto o corpo, como a peça móvel podem ser de material metálico ou de plástico. As uniões de plástico têm a vantagem de serem resistentes ás solicitações químicas. Os anéis metálicos podem utilizar-se quando as tubagens não se destinam ao transporte de produtos agressivos e/ou não sofram ataque químico por parte dos solos em tubagens enterradas.

A ligação de tubagens por meio de flanges (Figura 2.26) é uma variante da ligação por soldadura topo a topo. É utilizada sempre que as condições de obra não permitam realizar a soldadura no local da obra, quando se pretende unir tubagens de polietileno a tubos fabricados noutros materiais ou a acessórios flangeados (por exemplo válvulas). O processo de ligação consiste na introdução de flanges pelo exterior dos tubos e na eventual soldadura topo a topo destes. A ligação de tubagens em PEAD com outros tubos ou acessórios é feita simplesmente com o aperto das flanges por parafusos.



Figura 2.26 Flange em aço para ligação de tubagens.

2.3.1.4 Reforços

A reparação de tubagens com auxílio de reforços consiste basicamente na colocação sobre a zona a reparar de um reforço, normalmente de fibras impregnadas com uma resina. Este tipo de reparação, ao contrário dos referidos anteriormente, pode ser efectuada no local e não necessita que se proceda ao seccionamento da tubagem a reparar. É um método de reparação que tem vindo a ser desenvolvido nos últimos anos. Actualmente existem no mercado soluções de reparação (Figuras 2.27) utilizando reforços colocados na sua superfície exterior, para o controlo ou isolamento de vários tipos de tubagens, mais especificamente em tubagens domésticas e industriais, em aço, ferro fundido, cobre, plástico e alumínio .



Figura 2.27 Reparação da tubagem com enrolamento do reforço em torno da superfície exterior da tubagem [39].

Este tipo de solução consiste em aplicar e consolidar camadas de fibra de vidro impregnada em resina termoendurecível, na superfície da tubagem de forma a tapar o dano. Consegue-se, assim, garantir a resistência mecânica e química da tubagem depois de reparada.

2.4 Objectivos do Trabalho

Com este trabalho pretende-se dar um contributo para o desenvolvimento de aplicações de materiais compósitos de matriz termoplástica e de alguns processos de transformação destes, que podem ser utilizados na reparação de tubagens. Foi estudada a utilização de um pré-impregnado de matriz termoplástica de baixo custo, *towpreg bem como o reforço de fibras de vidro com um PVC em pasta na reparação de tubagens*

Verifica-se que a grande maioria das tecnologias utilizadas na transformação destes pré-impregnados são muito recentes e se encontram ainda em fase experimental, e ainda, que a expansão do mercado dos termoplásticos reforçados se encontra fortemente dependente do desenvolvimento de tecnologias que permitam produzir pré-impregnados de matriz termoplástica com menores custos.

Para este estudo seleccionou-se a fibra de vidro (FV) como material de reforço e o PVC como matriz, por um lado, para desenvolver novos *towpregs,* por outro lado porque o reforço de tubagens estruturais em PVC não está ainda suficientemente desenvolvido.

Assim, os principais objectivos deste trabalho são:

- optimizar a produção de *towpregs* de PVC reforçado com fibras de vidro (FV/PVC) num equipamento construído anteriormente, de forma a que se obtenha um material capaz de ser transformado em compósito com desempenho mecânico adequado à grande maioria das aplicações dos mercados de grande consumo.
- produzir, por enrolamento filamentar, estruturas tubulares a partir dos *towpregs*;
- produzir, por enrolamento filamentar, estruturas tubulares a partir de FV e de PVC em pasta;
- determinar as propriedades mecânicas das estruturas compósitas produzidas;
- contribuir para o desenvolvimento de métodos expeditos de reparação de tubagens de PVC.

CAPÍTULO III

3 Procedimento Experimental

3.1 Introdução

Neste capítulo descrevem-se as matérias-primas usadas no fabrico dos pré-impregnados e os principais procedimentos de ensaios a que elas, os pré-impregnados e compósitos produzidos foram sujeitos.

A descrição das matérias-primas bem como a descrição dos ensaios realizados seguem-se de acordo com a seguinte ordem:

i) descrição das matérias-primas;

ii) ensaios de matérias-primas;

iii) ensaios de pré-impregnados de matriz termoplástica produzidos;

iv) ensaios de compósitos transformados a partir dos pré-impregnados fabricados.

As matérias-primas foram objecto de ensaios, nomeadamente, para caracterização das dimensões das partículas do termoplástico (em pó) utilizado e para determinação das suas propriedades mecânicas e térmicas.

Os pré-impregnados foram igualmente ensaiados com o objectivo de se determinarem os parâmetros de produção mais favoráveis, tendo em consideração o teor em reforço, a observação macroscópica e microscópica.

Os compósitos de matriz termoplástica produzidos, a partir dos pré-impregnados, placas obtidas por compressão a quente e tubos obtidos por enrolamento filamentar, foram também submetidos a um considerável número de ensaios mecânicos e de determinação do teor dos constituintes, para avaliação do seu desempenho.

3.2 Matérias-Primas

3.2.1 Fibras de Reforço

Na produção dos pré-impregnados (*towpregs)* de FV/PVC foram utilizadas mechas de fibra de vidro tipo E de 2400 Tex da Owens Corning, refª 305E-TYPE 30 DIRECT ROVING, cujas características se indicam na ficha técnica no Anexo I-1. Esta fibra de vidro está disponível no mercado na forma de mechas em bobinas de desenrolamento pelo interior.

3.2.2 Policloreto de Vinilo (PVC)

Neste trabalho foi utilizado um PVC produzido pela CIRES – Portugal (Companhia Industrial de Resinas Sintéticas, S. A., com a referência Previnil GM267, cujas propriedades estão indicadas na ficha técnica do produto fornecida pelo fabricante, que pode ser consultada na Tabela I-2.1 no Anexo I-2.1. e resumidas na Tabela 3.1 a seguir apresentada. Actualmente, a utilização do PVC encontra-se bastante generalizada, com aplicações nas mais diversas áreas, como por exemplo, dispositivos cirúrgicos usados em medicina, acessórios de uso doméstico, componentes utilizados na indústria automóvel, tubagens com múltiplas aplicações, etc.

Tabela 3.1 Propriedades do granulado de PVC utilizado (dados do fabricante).

Propriedade	Unidade	Valor
Massa volúmica aparente	g/l	0,770
Tensão de rotura em tracção	MPa	45

As principais razões que levaram a escolher este polímero como matriz para os *towpregs* produzidos neste trabalho, foram, essencialmente:

- o baixo custo do material, em que também se alicerça a sua grande aceitação comercial;
- a boa resistência química do PVC;
- a possibilidade de processamento por 'via húmida' com a utilização de um PVC com baixa viscosidade;
- a reduzida informação disponível sobre compósitos de matriz termoplástica, e, em particular, dos de matriz com PVC, o que justifica a necessidade de se efectuarem mais estudos;
- o interesse por parte da CIRES em diversificar os mercados consumidores de PVC tentando encontrar novas tecnologias e aplicações para o referido polímero.

3.2.2.1 Determinação da Densidade do PVC

Dadas as características das partículas deste polímero com granulometria muito fina, com elevada homogeneidade e sendo insolúveis em água, optou-se por determinar esta propriedade pelo designado Método do Picnómetro [40].

A determinação da densidade foi realizada por este método à temperatura ambiente (cerca de 15,2 ºC). Inicialmente, pesou-se numa balança analítica um picnómetro vazio (m_{apic}), de capacidade igual a 100 ml, previamente lavado e desengordurado e seco. De seguida pesou-se o mesmo picnómetro cheio com água destilada (m_{bpic}), com o cuidado de eliminar as bolhas de ar eventualmente presas no seu interior e de secar cuidadosamente a superfície exterior;

Após secagem do picnómetro, introduziu-se lentamente a amostra de PVC no mesmo, procurando-se eliminar as bolhas de ar interpostas. Como se observaram efeitos de tensão superficial nas paredes do capilar com a aderência dos grãos, recorreu-se a uma suave corrente de ar comprimido seco, com o objectivo de perfazer o volume total do picnómetro. Pesou-se o conjunto numa balança analítica (m_{cpic}).

O cálculo da densidade relativa (d_{pvc}) foi realizado utilizando a seguinte expressão:

$$d_{pvc} = \frac{m_{cpic} - m_{apic}}{m_{bpic} - m_{apic}} \tag{3.1}$$

3.2.2.2 Caracterização Dimensional do PVC

A caracterização dimensional do pó de PVC está não só associada ao tamanho e à forma das partículas, mas também à sua distribuição e é importante para a aplicação nos modelos teóricos de consolidação, os quais requerem geralmente a determinação do diâmetro (raio) das partículas do monómero. A caracterização dimensional foi realizada por observação de amostras de polímero em pó ao microscópio bem como recorrendo a diversos ensaios com peneiros.

A observação ao microscópio, utilizando-se um microscópio electrónico de varrimento, permitiu estudar a forma e a distribuição das partículas, bem como as condições de adesão entre as fibras e o PVC. Embora esta técnica permitisse contar e medir com precisão as dimensões das partículas, foi considerada demasiado morosa para ser utilizada na determinação de valores representativos da distribuição de tamanhos e, consequentemente, das dimensões médias das partículas do PVC em pó.

A utilização da técnica dos peneiros permitiu estudar a distribuição de tamanhos das partículas do polímero em pó. Consiste em fazer passar uma dada quantidade de polímero por uma bateria de peneiros com diferentes malhas de dimensões características conhecidas e, determinando-se a quantidade de polímero retida em cada peneiro, podem estimar-se as dimensões médias das partículas.

Após a passagem do termoplástico em pó pelo conjunto de peneiros as suas partículas ficam divididas em classes, de acordo com o seu tamanho. Sabendo-se que as partículas retidas em cada peneiro têm diâmetro superior à abertura da sua malha e inferior ao da malha do peneiro imediatamente anterior e assumindo-se uma distribuição uniforme de tamanhos das partículas entre os dois limites anteriores, atribui-se a cada classe um diâmetro igual à média das dimensões das malhas destes dois peneiros. Definido o diâmetro, calculado o volume e pesadas as partículas retidas em cada peneiro, calculou-se o número de partículas de cada classe a partir da massa volúmica do polímero.

A técnica dos peneiros permite uma caracterização dimensional expedita, possibilitando a análise de um maior número de partículas de PVC em pó do que a microscopia, o que permite determinar valores médios mais representativos. Esta técnica pode ser aplicada industrialmente para separar as partículas por classes de tamanhos pretendidos para produção de *towpregs*. A utilização destas duas técnicas permitiu uma caracterização expedita do pó de PVC.

3.2.2.3 Observação por Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM)

Uma vez que o PVC em pó utilizado apresentava presumivelmente partículas com baixa granulometria, optou-se por utilizar um microscópio electrónico de varrimento para o estudo da sua morfologia.

Assim, a forma e dimensões das partículas do PVC em pó utilizado foram por diversas vezes observadas num microscópico electrónico de varrimento JEOL JSM-6301F com sistema de microanálise OXFORD INCA / ENERGY 350. As observações incidiram sobre amostras recolhidas cuidadosamente e directamente das embalagens adquiridas de PVC em pó.

Inicialmente, as amostras foram coladas na superfície de num suporte cilíndrico de alumínio usando um adesivo de *epóxido*. Seguidamente, preparou-se a amostra para a observação, aplicando-se uma fina camada de uma solução à base de ouro na superfície das partículas. Finalmente, procedeu-se à avaliação morfológica e do tamanho das partículas em pó no microscópio.

3.2.2.4 Ensaios com Peneiros

Estes ensaios consistem na estratificação das partículas do pó de PVC por tamanhos, através da passagem de uma dada quantidade de polímero por uma bateria de peneiros de diferentes aberturas de malha, empilhados verticalmente, da maior para a menor abertura e postos em vibração.

Os ensaios foram realizados sobre três amostras com cerca de 100 g cada retiradas do meio de um dos sacos de PVC com cerca de 40 kg de polímero em pó.

De acordo com os procedimentos recomendados pela ASTM [41], utilizou-se um equipamento constituído por um empilhamento contendo oito peneiros circulares com diâmetro aproximado de

200 mm, com aberturas de malha progressivamente menores, e um recipiente na base para retenção do pó de PVC que atravessou o peneiro com menor abertura de malha.

Decidiu-se, assim, utilizar inicialmente uma bateria constituída pelos peneiros números 60, 80, 100, 120, 140, 170, 230 e 270 de acordo com a norma ASTM E11-95, a que correspondem, respectivamente, as aberturas de malha de 250, 180, 150, 125, 110, 90, 63 e 53 (μm).

Depois de colocar o PVC em pó no peneiro superior, com maior abertura de malha, a bateria de peneiros foi posta em vibração durante cerca de 20 min. No recipiente final ficaram depositadas as partículas de PVC com diâmetro inferior 53 μm. Após o ensaio, foi pesada a massa total das partículas depositadas em cada peneiro e recipiente numa balança electrónica com precisão de 0,0001 g.

A frequência mássica de partículas de PVC retidas em cada peneiro foi calculada através da expressão:

$$f_{im} = \frac{m_i}{M} \tag{3.2}$$

onde,

f_{im} é a frequência mássica de partículas para a classe de tamanhos i,

m_i é a massa de partículas na classe i, e,

M é a massa total de partículas.

De seguida calculou-se o número de partículas associado a cada classe, n_i, considerando-se as partículas perfeitamente esféricas e com um diâmetro médio, $\bar{d}$, correspondente ao valor médio de cada classe i, através de:

$$n_i = \frac{m_i}{\rho_p V_i} \tag{3.3}$$

onde, ρ_p, é a massa específica do PVC e, V_i, o volume de cada partícula de cada classe i calculado por:

$$V_i = \frac{\pi\left(\bar{d}\right)^3}{6} \tag{3.4}$$

A frequência relativa de partículas em termos de número de partículas pode, então, também ser calculada como:

$$f_i = \frac{n_i}{N} \tag{3.5}$$

onde, f_i, é a frequência relativa de partículas na classe i em termos de número de partículas e o número total de partículas, N, é obtido por:

$$N = \sum_{i=1}^{n_t} n_i \tag{3.6}$$

onde n_t é o número total de classes consideradas.

Para caracterizar a granulometria do PVC em pó utilizado, foram calculadas, a partir das frequências acumuladas, as medianas em termos de número e de massa de partículas. A mediana determinou-se como o valor do número e/ou da massa de partículas correspondente a uma percentagem acumulada de 50%. A média e a variância das dimensões das partículas foram, por outro lado, calculadas a partir da distribuição de Weibull que melhor se aproximava da distribuição de granulometrias determinada experimentalmente.

A distribuição de Weibull tem sido bastante utilizada no estudo de distribuições de tamanhos de partículas obtidas por via experimental [5]. Trata-se de uma distribuição que, na sua formulação mais genérica, é função de três parâmetros. A função de distribuição, S_w, e função densidade de probabilidade, f, de Weibull, definem-se como [5]:

$$S_w(d_p) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d_p - d_0}{\theta_w - d_0} \right)^b \right] \tag{3.7}$$

e

$$f(d_p) = \frac{b}{\theta_w - d_0} \left(\frac{d_p - d_0}{\theta_w - d_0} \right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{d_p - d_0}{\theta_w - d_0} \right)^b \right] \tag{3.8}$$

onde:

d_p é o tamanho da partícula de polímero;

d_0 é uma constante ligada ao menor tamanho de partícula da amostra;

b é uma constante positiva ligada ao grau de dispersão dos tamanhos de partículas presentes e,

θ_w é uma constante de escala.

A média, mediana e variância da distribuição de Weibull podem calcular-se de acordo com as fórmulas seguintes:

$$\overline{X} = d_0 + (\theta_w - d_0)\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) \tag{3.9}$$

$$d_{med} = d_0 + (\theta_w - d_0)\ln(2)^{1/b} \tag{3.10}$$

$$\sigma^2 = (\theta_w - d_0)^2 \left[\Gamma\left(1+\frac{2}{b}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{b}\right) \right] \tag{3.11}$$

onde,

$\overline{X}$ é a média;

d_{med} é a mediana;

σ^2 é a variância e,

Γ é a função gama [5].

Aplicando logaritmos à função de distribuição (Eq. 3.7), é possível reescrever aquela equação da seguinte forma:

$$\log\ln\left(\frac{1}{1-S}\right) = b\log(d_p - d_0) - b\log(\theta_w - d_0) \tag{3.12}$$

Atribuindo valores próximos do tamanho mínimo de partícula ao parâmetro d_0, deverá ser possível reconhecer uma relação linear entre $\ln\left(\frac{1}{1-S}\right)$ e $(d_p - d_0)$ quando os seus valores forem representados num sistema coordenado em escala logarítmica. Se tal relação não for evidente, então a distribuição obtida por via experimental não poderá ser bem aproximada pela distribuição de Weibull.

Se a relação anterior for aproximadamente linear, a sua expressão analítica pode facilmente obter-se recorrendo, por exemplo, à regressão linear pelo método dos mínimos quadrados [5]. Neste caso, d_0, deverá ser tomado como o valor que torna o coeficiente de correlação linear, r^2, mais próximo de 1 (correlação linear perfeita). Se exprimirmos a relação linear como:

$$Y = AX + B \tag{3.13}$$

em que, A e B, são os parâmetros que definem a recta dos mínimos quadrados. Pode definir-se, Y, como:

$$Y = \log\ln\left(\frac{1}{1-S}\right) \tag{3.14}$$

e, X, como:

$$X = \log(d_p - d_0) \tag{3.15}$$

Então, as expressões de, θ_w e b, são dadas por:

$$\theta_w = d_0 + \exp(B/A) \tag{3.16}$$

e

$$b = A \tag{3.17}$$

3.2.3 Determinação das Propriedades Mecânicas das Matérias-Primas

A determinação das propriedades mecânicas do pó de PVC, com a referência Previnil GM267, utilizado na produção dos *towprwgs*, foi feita com base em provetes produzidos a partir deste polímero, com os quais se realizaram ensaios de tracção. As propriedades mecânicas das fibras de vidro 305E-TYPE 30 tinham sido já avaliadas e publicadas no âmbito de um trabalho anterior [42,43], determinadas por análise de Weibull dos resultados obtidos de ensaios de tracção a que se submeteram monofilamentos das fibras com três comprimentos iniciais diferentes de acordo com a norma ASTM D3379-75. Os resultados obtidos, na altura, encontram-se resumidos na Tabela I-1.1 do Anexo I.

3.2.3.1 Ensaios de Tracção dos Provetes de PVC

3.2.3.1.1 Técnica

Foram realizados ensaios de tracção em cinco provetes cortados de duas placas fabricadas a partir do pó de PVC. Para estes ensaios foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos INSTRON 4208, com uma célula de carga de 5 kN e uma velocidade de afastamento entre amarras de 2 mm/min. Para medição do alongamento foi utilizado um extensómetro MTS modelo 632.85, com comprimentos iniciais de referência axial de 25,4 mm.

Os ensaios realizaram-se conforme a norma ISO 3268/78, utilizando provetes com geometria do tipo I (Figura 3.1).

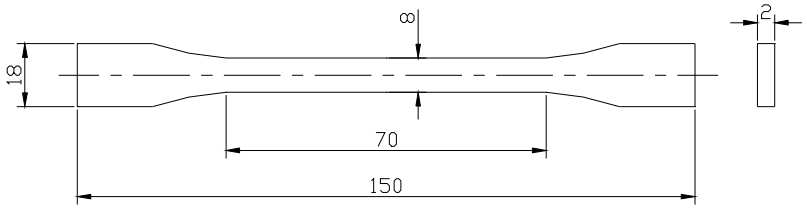


Figura 3.1 Geometria dos provetes de PVC para ensaios de tracção.

Foram determinadas as propriedades do material a partir dos ensaios aos cinco provetes (referenciados de P1 a P5).

Para cada provete, traçou-se uma curva inicial da força versus deslocamento a partir dos dados adequiridos pela máquina de ensaios. Em seguida, traçou-se a correspondente curva tensão-deformação dividindo os valores da força e do deslocamento adquiridos, respectivamente, pela secção e comprimento iniciais do provete.

Tendo-se verificado que o PVC apresentava um comportamento quase elástico para pequenas deformações, considerou-se que a parte inicial da curva tensão/deformação obedecia à Lei de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \tag{3.18}$$

onde, σ é a tensão aplicada ao provete, E é o seu módulo de Young e ε a deformação aplicada.

Sendo o módulo de Young, *E*, determinado pela inclinação da curva tensão/deformação longitudinal na sua zona elástica inicial.

Determinou-se o módulo para 1 % de deformação, através da seguinte equação:

$$E_{1\%} = \frac{\sigma_{1\%}}{1\%/100} \tag{3.19}$$

em que, $\sigma_{1\%}$ é a tensão a 1% de deformação.

Foram também determinadas as seguintes propriedades do material:

i) tensão de rotura (σ_{rot});

ii) tensão de cedência (σ_l), e,

iii) deformação de cedência (ε_l).

O valor das propriedades foi calculado pela média dos resultados obtidos a partir dos cinco provetes.

3.2.3.1.2 Preparação e Ensaio dos Provetes

Inicialmente foram produzidos provetes por injecção do PVC num molde apropriado usando-se uma injectora Krauss Maffei KM 60/210, com 600 kN de força de fecho e 0,113 kg de capacidade de injecção.

A partir do pó de PVC com a referência Previnil GM267 produziram-se, para ensaios, cinco provetes de tracção, de acordo com a norma ISO 3268. A Fig.3.2 permite visualizar o Layout dos provetes na cavidade do molde.

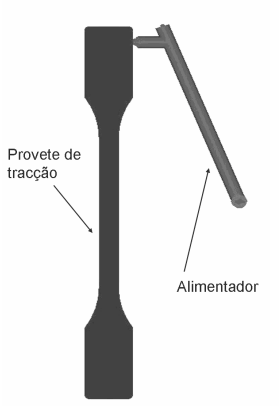


Figura 3.2 Esquema do molde dos provetes de tracção.

As moldações foram obtidas em ciclo automático, com o tempo de injecção estabelecido pela injectora nas condições de processamento definidas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Parâmetros de injecção para fabrico dos provetes de tracção de PVC.

Propriedade	Unidade	Valor
Temperatura do molde	(ºC)	40
Temperatura de injecção	(ºC)	230/210
Temperatura do cilindro (1)	(ºC)	200-210-220-230
Temperatura do cilindro (2)	(ºC)	160-180-200-210
Pressão máxima de injecção	(MPa)	70

Uma vez que o PVC se degradou significativamente nas várias tentativas de processamento, não foi possível produzir qualquer provete para ensaio.

Depois de várias tentativas falhadas na produção dos provetes por injecção, optou-se por fabricá-los a partir de barras obtidas por extrusão a quente, numa extrusora Carvex de duplo fuso, com temperaturas ao longo do fuso de 160 ºC, 170 ºC e 180 ºC, e, uma velocidade de processamento de, aproximadamente, 0.5 m/min.

As barras obtidas, com dimensões aproximadas de 600x30x4 mm^3, foram posteriormente maquinadas para se obter a desejada forma em altere dos provetes de tracção. Foram primeiramente facejadas numa fresadora convencional e depois maquinadas numa fresadora CNC, de acordo com os programas apresentados no Anexo I-2.3.

As dimensões médias dos provetes ensaiados, obtidas a partir das três medidas efectuadas, podem ver-se na Tabela I-2.3 do Anexo I-2.3.

3.2.3.1.3 Tratamento dos Resultados

As curvas tensão/deformação obtidas directamente dos ensaios não passavam pela origem do referencial e apresentavam alguma não linearidade inicial, pelo facto de se introduzirem tensões residuais no provete durante o seu aperto nas amarras da máquina de ensaios e de existirem escorregamentos iniciais entre o provete e as referidas amarras, no arranque do ensaio. Para que estas perturbações não influenciassem o cálculo dos valores das propriedades obtidas experimentalmente para o PVC, fez-se passar a curva tensão/deformação pela origem e não se considerou a parte inicial não linear para calcular o módulo inicial.

Verificou-se que as curvas tensão/deformação obtidas com o extensómetro, apresentaram uma quase perfeita linearidade entre 0,15 e 0,7 % de deformação longitudinal, como se pode observar através da Figura 3.3. O módulo de elasticidade do PVC foi calculado considerando este intervalo de deformação.

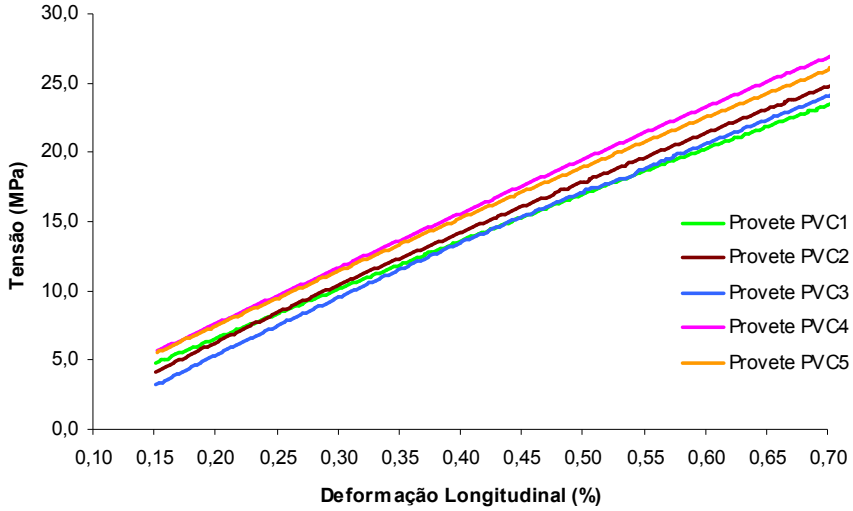


Figura 3.3 Curvas tensão/deformação longitudinal dos ensaios de tracção dos provetes de PVC realizados com extensómetro.

A curva de ensaio foi, por esse facto, aproximada por uma recta entre estes dois valores de deformação utilizando a técnica dos mínimos quadrados, de forma a obter-se uma expressão do tipo:

$$\sigma = E\varepsilon_{adq} + \sigma_0 \tag{3.20}$$

onde,

σ é a tensão aplicada ao provete,

E é o módulo inicial,

ε_{adq} é a deformação calculada a partir dos valores lidos pelo extensómetro e,

σ_0 é a tensão residual a que o provete estava inicialmente submetido.

Donde, se fez corresponder ao declive da recta o valor do módulo de Young (E) do material.

Admitindo-se que para um estado inicial de tensão nulo a deformação do provete é nula, o que corresponde à origem do referencial, adoptou-se a expressão para calcular a deformação real (ε) a partir do valor lido pelo extensómetro (ε_{adq}):

$$\varepsilon = \varepsilon_{adq} + \frac{\sigma_0}{E} \tag{3.21}$$

3.2.4 Determinação da Massa Volúmica do PVC Processado

A determinação experimental da massa volúmica do PVC, depois de processado, foi efectuada a partir de uma amostra com as dimensões de, aproximadamente, 50 x 30 x 4.4 (mm^3), extraído de uma régua extrudida, nas condições referidas no parágrafo3.2.3.1.2. A amostra foi pesada numa balança AND FR-200MKII, com precisão de 0,1 mg. O valor da massa volúmica foi calculado dividindo o valor da massa pelo respectivo volume da amostra.

3.2.5 Análise Termogravimétrica do PVC

Sendo um objectivo deste trabalho produzir *towpregs* em policloreto de vinilo reforçado com fibras de vidro (FV/PVC) e processá-lo em compósitos, foi necessário conhecer as propriedades térmicas do polímero a usar como matriz para seleccionar a gama de temperaturas a utilizar nos diferentes estágios de produção e transformação.

As temperaturas usadas durante a produção dos *towpregs*, bem como as temperaturas usadas na sua posterior transformação condicionam decisivamente o desempenho, qualidade e as propriedades tanto dos pré-impregnados produzidos como dos compósitos fabricados a partir deles. A utilização de temperaturas demasiado baixas durante a produção dos *towpregs* não permite uma suficiente impregnação e adesão polímero/fibras de reforço. Do mesmo modo, os *towpregs* não são adequadamente consolidados se as temperaturas de transformação forem demasiado baixas. Por outro lado as temperaturas demasiado elevadas na produção e transformação dos *towpregs* levam à degradação da matriz polimérica, diminuindo assim a qualidade e desempenho dos pré-impregnados e dos compósitos produzidos.

A técnica usada na determinação das características térmicas do PVC foi a análise termogravimétrica (TGA) que dá informação sobre a temperatura de degradação do polímero por carbonização.

3.2.5.1 Técnica

Este ensaio foi realizado com uma balança termogravimétrica da marca Mettler, para medir a perda de massa do PVC com a temperatura em atmosfera oxidante (O_2).

Uma amostra de PVC em pó com cerca de 16 mg, foi colocada no forno do aparelho, foi aquecida desde a temperatura ambiente à velocidade de 10 ºC/min. A balança termogravimétrica registou, durante todo o ensaio, a variação do peso da amostra, tendo-se obtido um gráfico de perda de massa da amostra com a temperatura semelhante ao representado na Figura 3.4. Como se pode ver na figura, a temperatura de início da degradação foi determinada como a abcissa correspondente ao ponto de intersecção da recta horizontal, relativa à zona em que não se verifica perda de massa na amostra, com a recta que aproxima a zona linear inicial onde uma efectiva diminuição de massa da amostra com a

temperatura é detectada. O gráfico referente ao ensaio efectivamente realizado pode ser consultado no Anexo I-2.5.

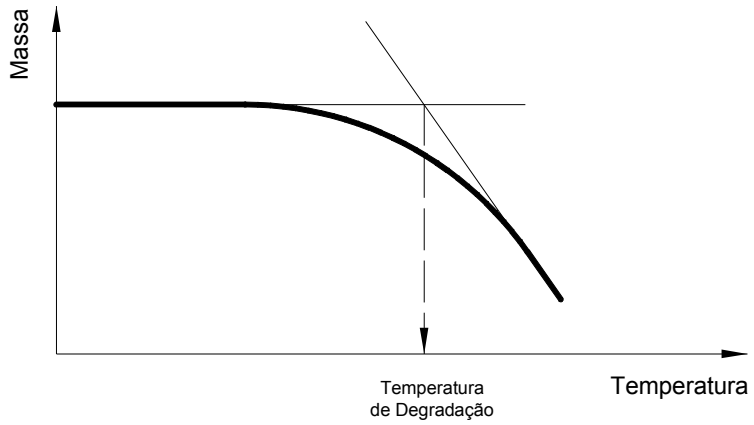


Figura 3.4 Representação gráfica da determinaçao da temperatura de início da degradação.

3.3 Pré-Impregnados

3.3.1 Produção de Pré-Impregnados

Numa primeira fase produziram-se amostras de *towpregs* de FV/PVC com o objectivo de se estabelecer os valores parâmetros iniciais de funcionamento do equipamento, tendo em conta o compromisso entre propriedades mecânicas e tempo de processamento, compatível com a industrialização do processo.

Para a produção do *towpreg* de FV/PVC, foi utilizado um equipamento existente (Fig.3.5) [44,45] em ambiente controlado, constituído por um alimentador de fibra, um espalhador, uma câmara de deposição, um alimentador de polímero, um forno de radiação e um dispositivo de enrolamento.

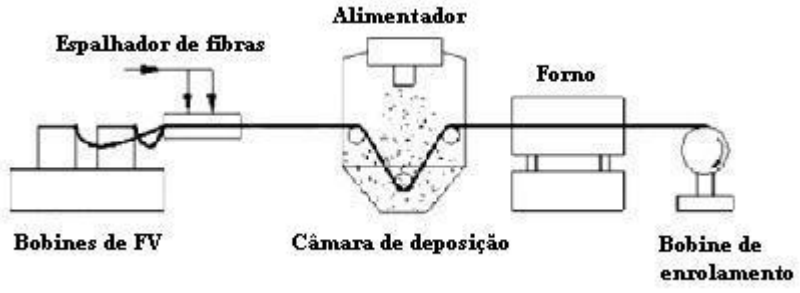


Figura.3.5 Esquema do equipamento inicial

A fibra de vidro é puxada pelo enrolador na extremidade de saída do equipamento e desenrolada a partir de um *roving* na extremidade de entrada. A fibra passa através do espalhador, onde é aberta, de

forma a permitir uma deposição homogénea do PVC durante a sua passagem pela câmara de deposição. Neste estádio, a fibra está exposta a um ambiente com PVC em suspensão, promovido pelo efeito de turbilhão de ar sobre o polímero que alimenta a câmara. Em seguida a fibra impregnada com PVC atravessa o forno de radiação, ao longo do qual se dá alguma fusão do PVC e a consequente adesão às fibras. No estágio final, o *towpreg* de FV/PVC é enrolado numa bobine colocada no dispositivo de enrolamento.

Depois de determinados os parâmetros iniciais para a produção de *towpregs*, procurou-se optimizá-los por forma a aumentar a deposição de PVC na fibra de vido. Para isso, procedeu-se à variação de alguns parâmetros operacionais relevantes, nomeadamente, temperatura do forno e velocidade linear da fibra. A temperatura do forno foi variada entre os 200 ºC e 300 ºC, sendo experimentadas diferentes velocidades de puxo das fibras entre os 0.2 e 1 m/min. Com estas experiências foi possível encontrar os parâmetros operatórios do equipamento que conduziam ao teor de polímero mais elevado no *towpreg* fabricado. Os resultados encontrados mostraram, no entanto, que os teores de polímero conseguidos eram insuficientes.

Ao longo do fabrico dos *towpregs* constatou-se que a adesão do pó de PVC à fibra não era a melhor, visto que o pó depositado na parte inferior da fibra se soltava à saída da câmara de deposição, não chegando a ser consolidado no forno.

Para aumentar as condições de adesão do pó à fibra inseriu-se no equipamento existente uma câmara de humidificação, entre o espalhador e a câmara de deposição, de acordo com a Figura 3.6. Com esta alteração verificou-se que a quantidade de pó que se soltava da fibra era menor.

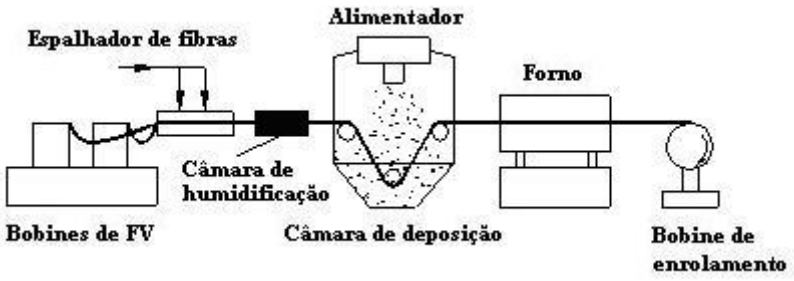


Figura 3.6 Esquema do equipamento alterado com um humidificador.

3.3.2 Determinação do Teor de Fibras nos Pré-Impregnados

Os pré-impregnados têm na sua estrutura fibras de reforço, que influenciam as propriedades dos compósitos a que dão origem, os parâmetros do seu processamento, bem como o preço final. Por outro lado, o teor de polímero tem de ser superior a um valor crítico, para não existirem vazios no compósito e, facilitar o processamento do pré-impregnado. Como tal, é importante controlar o teor das fibras na produção dos pré-impregnados. Neste trabalho optou-se por determinar o teor mássico das fibras de

reforço através da pesagem dos pré-impregnados produzidos, por se tratar de um método de controlo expedito, que permite uma implementação industrial fácil e pouco dispendiosa.

3.3.2.1 Técnica

Para determinar a fracção mássica de fibra de vidro nos *towpregs* de FV/PVC fabricados neste trabalho, foram utilizadas 92 amostras de pré-impregnado com o comprimento de 2 metros. Estas amostras foram pesadas numa balança AND FR-200MKII, com precisão de 0,1 mg.

A pesagem das amostras foi feita logo após a sua produção, o que permitiu a evaporação de eventuais teores de água, nomeadamente, nas amostras produzidas depois da introdução da câmara de humidificação.

Após pesagem de cada amostra na balança, determinou-se a fracção mássica de fibras (w_f) pela seguinte expressão:

$$w_f = \frac{d_{lin}}{d_{tow}} \tag{3.22}$$

onde d_{tow} é o peso linear do *towpreg*e e d_{lin} é o peso linear das fibras de vidro (Tex).

A partir do valor determinado anteriormente, a fracção volúmica de fibras pode calcular-se por:

$$v_f = \frac{1}{1 + \frac{\rho_f}{\rho_p}\left(\frac{d_{tow}}{d_{lin}} - 1\right)} \tag{3.23}$$

onde,

v_f é a fracção volúmica de fibras,

ρ_f é a massa específica da fibra de vidro (2,56 Mg/m^3) e,

ρ_p é a massa específica do PVC (1,31 Mg/m^3).

Os valores obtidos experimentalmente neste trabalho encontram-se incluídos no Anexo II.

3.3.3 Observação por Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM)

Foram observadas diversas amostras de *towpregs* produzidos, segundo um procedimento semelhante ao já descrito no parágrafo 3.2.2.3.

3.4 Compósitos

3.4.1 Produção de Compósitos

A produção dos compósitos a partir dos pré-impregnados foi feita utilizando as tecnologias de compressão a quente e enrolamento filamentar.

3.4.1.1 Produção de Placas Por Compressão a Quente

A compressão a quente é uma tecnologia muito utilizada para obter placas em compósito a partir de pré-impregnados por permitir ciclos de fabrico relativamente simples e curtos.
Utilizou-se esta tecnologia para produzir placas em compósito a partir dos *towpregs* produzidos e de tecido equilibrado de fibra de vidro E, com um peso específico de 163 g/m^2 impregnado com um plastisol de homopolímeros de cloreto de vinilo. Um plastisol de PVC é a designação dada a uma dispersão de partículas de resinas de PVC com tamanho que varia usualmente entre 0,1 e 2 μm, obtidas pelos processos de polimerização em emulsão, em líquidos orgânicos designadamente em plastificantes.

O plastisol de PVC utilizado, fabricado pela CIRES – Portugal com a referência VICIR E 1270P, apresenta as mesmas características do PVC em pó utilizado no fabrico dos *towpregs*.

As placas produzidas foram posteriormente sujeitas a ensaios para o estudo das suas propriedades mecânicas.

3.4.1.1.1 Consolidação de *Towpregs*

A consolidação dos *towpregs* foi conseguida através de uma técnica adaptada de Klett [46] e Nunes [47], segundo a qual o pré-impregnado é enrolado sobre um postiço de alumínio de forma a adquirir uma pré forma (Fig.3.7), colocado na cavidade de um molde e posteriormente processado.

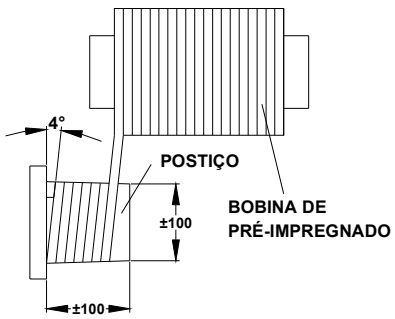


Figura 3.7 Técnica utilizada no empilhamento do pré-impregnado.

O processamento foi efectuado numa prensa SATIM de 400 kN, utilizando-se um ciclo de fabrico de 15 minutos a uma pressão de 15 MPa e à temperatura de 210 ºC.

Depois de enrolado com a forma pretendida o *towpreg* é retirado do postiço de alumínio e colocado sobre a placa intermédia na cavidade do molde (Fig. 3.8). De seguida, fecha-se o molde, colocando o punção em cima da cavidade moldante e inicia-se o seu aquecimento até à temperatura de estágio. Depois de homogeneizada a temperatura nas superfícies do molde, fecha-se a prensa e aplica-se a pressão desejada ao material. No final do ciclo de pressão e temperatura definido, inicia-se o arrefecimento com circulação de água fria pelos canais do molde até à temperatura ambiente.

Para o processo de extracção procede-se à abertura dos pratos da prensa e colocam-se as placas dos extractores e de extracção nas posições mostradas na Figura 3.8. A extracção da placa consolidada é realizada com auxílio do fecho dos pratos da prensa.

O molde apresenta uma cavidade com uma área de 100 × 100 (mm^2) e uma folga entre o punção e a cavidade de cerca de 50 μm, para permitir a formação de rebarbas. Dispõe de um sistema manual para extracção de placas, sistemas independentes de aquecimento e arrefecimento do punção e respectiva cavidade, bem como sistema de monitorização das temperaturas (Fig.3.8).

O aquecimento é garantido por dois conjuntos de quatro resistências de cartuchos com 0,5 kW cada, montados, respectivamente, do lado do punção e da cavidade. A temperatura é monitorizada e controlada por dois sistemas de termopares tipo K colocados no punção e na cavidade moldante e controladores tipo Honeywell-BTC-2220. O arrefecimento do molde efectua-se por passagem de água em canais com 8 mm de diâmetro maquinados no punção e cavidade.

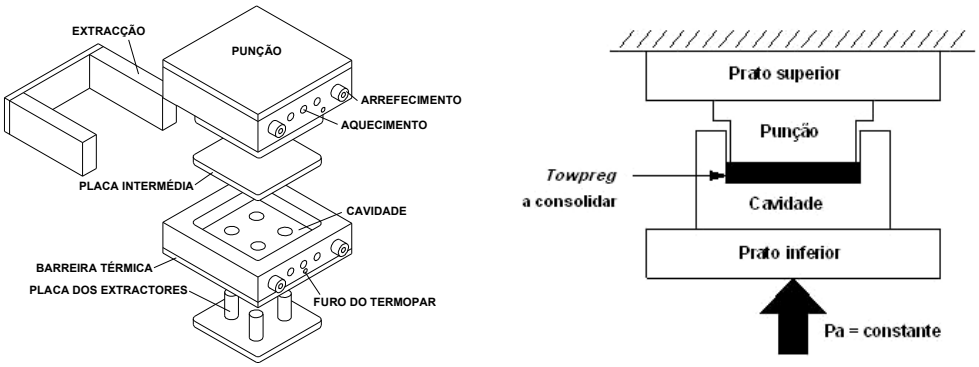


Figura 3.8 Desenhos esquemáticos do molde utilizado no fabrico de placas em compósito.

3.4.1.1.2 Consolidação de Pré Impregnados de FV e PVC de baixa viscosidade

Foram produzidas placas de compósito de fibra de vidro e plastisol de PVC (referido no parágrafo 3.4.1.1) com 200x200 (mm^2). As placas foram obtidas por impregnação manual, interpondo o plastisol

entre 5 camadas ortotrópicas de tecido de fibras de vidro envolvidas por uma película de filme desmoldante, sendo posteriormente, processadas directamente entre os pratos da prensa (Fig.3.9) durante um ciclo de processamento com 15 minutos a uma pressão de 3 MPa e à temperatura de 170 ºC. Depois deste ciclo de fabrico procedeu-se ao arrefecimento sob pressão até à temperatura ambiente.

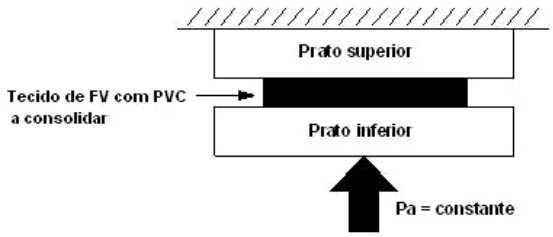


Figura 3.9 Esquema do processamento das placas de tecido de fibra de vidro e PVC

3.4.1.2 Produção de Anéis Tubulares por Enrolamento Filamentar

Trata-se de uma tecnologia especialmente interessante para transformar directamente os *towpregs* produzidos neste estudo ou outros pré-impregnados, por permitir gerar geometrias de revolução complexas a partir de mechas de fibras contínuas.

Para o fabrico dos tubos de matriz termoplástica reforçada com fibras de vidro, optou-se por utilizar a o plastisol de PVC, já referido, em vez dos *towpregs* produzidos. Esta opção ficou a dever-se à dificuldade de processamento do *towpreg* com baixo teor de polímero que foi possível fabricar.

Os tubos produzidos para este estudo utilizaram o equipamento de enrolamento filamentar que se pode observar na figura 3.10. Os tubos foram fabricados a partir de mechas de fibra de vidro e do plastisol de PVC com baixa viscosidade. O processo consiste na impregnação da FV com o plastisol de PVC por um rolo de impregnação existente no equipamento de enrolamento filamentar, seguida de enrolamento em torno de um mandril circular. A consolidação do polímero (reticulação) foi conseguida através da utilização de um soprador de ar quente sobre o mandril. O processo tem a vantagem de ser simples, contínuo e de fácil industrialização.



Figura. 3.10 Máquina de enrolamento filamentar (INEGI).

As mechas de fibra de vidro foram as já referidas anteriormente. As bobinas são desenroladas e de seguida impregnadas com o plastisol de PVC que se encontra num recipiente por um rolo existente no sistema de impregnação do equipamento de enrolamento filamentar. Seguidamente, as mechas são enroladas, de forma aproximadamente circunferencial, em torno de um mandril circular. A consolidação é feita com um soprador de ar quente direccionado para a superfície do tubo, que acompanha o movimento longitudinal da máquina, de acordo com o esquema da Figura 3.11.

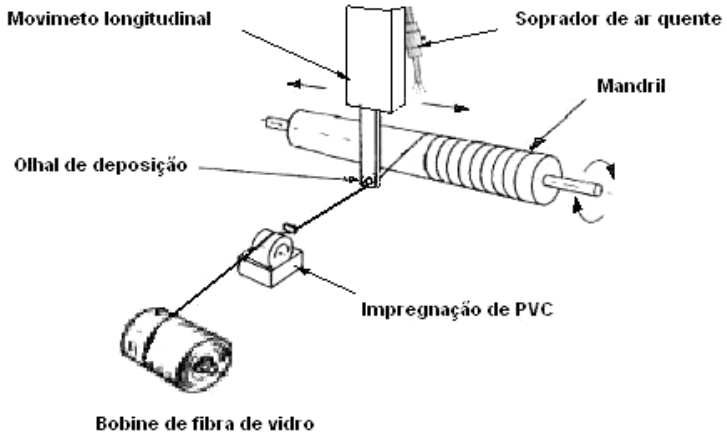


Fig. 3.11 Esquema de produção de anéis tubulares por enrolamento filamentar.

Para determinar as propriedades mecânicas, em tracção e flexão e a resistência ao corte interlaminar dos tubos de FV/PVC produzidos, foram extraídos provetes destes que se submeteram aos ensaios descritos de seguida.

3.4.2 Ensaios de Compósitos

3.4.2.1 Ensaios de Placas

As placas em compósito, produzidas pelo processo descrito nos parágrafos anteriores, foram sujeitas a ensaios de flexão em três pontos, tracção e de determinação do teor ponderal em fibras e matriz.

A qualidade da consolidação foi avaliada por observação das placas produzidas num microscópio electrónico de varrimento (SEM), tendo sido observadas a superfície exterior e secção transversal perpendicular às fibras em diversas amostras cortadas das placas produzidas e preparadas conforme procedimento similar ao descrito no parágrafo 3.2.2.3.

Nos parágrafos seguintes descrevem-se resumidamente, os diferentes ensaios a que se submeteram as placas produzidas.

3.4.2.1.1 Ensaio de Flexão em Três Pontos

3.4.2.1.1.1 Técnica

Com vista à determinação do módulo e resistência à flexão, foram cortados provetes das placas produzidas a partir dos *towpregs* e submetidos a ensaios de flexão em três pontos, de acordo com a norma ISO 178. Os provetes foram cortados com as dimensões de 100x20x2,5 (mm^3) de forma a assegurar que na sua secção transversal se verifique um largo predomínio das tensões normais provocadas pela solicitação de flexão, relativamente às tensões de corte desenvolvidas pelo esforço cortante (Fig. 3.12).

De facto, o modo de rotura em flexão apenas é garantido em provetes que apresentem valores suficientemente elevados do cociente *L/h*, entre a distância entre apoios, *L*, e a espessura do provete, *h*.

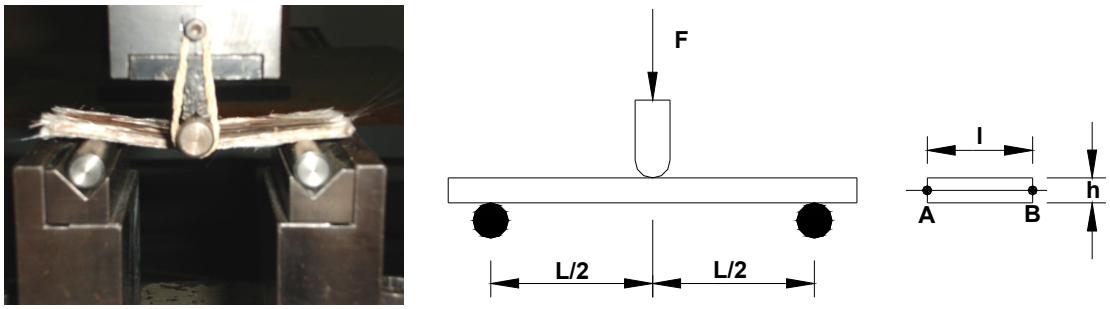


Figura 3.12 Esquema do ensaio de flexão em três pontos.

Normalmente, considera-se que as tensões normais de tracção/compressão devidas aos esforços de flexão são largamente predominantes na secção transversal dos provetes quando no ensaio se usam cocientes *L/h* superiores a 16. Se se utilizarem cociente *L/h* inferiores a 5, sabe-se, por outro lado, que o provete romperá por corte dado estas tensões, predominarem na sua secção transversal [5].

Considerando-se que a solicitação de flexão é largamente predominante, as tensões normais geradas variam linearmente ao longo da espessura do provete, sendo de compressão na sua face superior e de tracção na inferior, atingindo os valores máximos dados pela seguinte expressão nas fibras exteriores:

$$\sigma = \frac{3FL}{2lh^2} \tag{3.24}$$

onde,

F é a força transversal aplicada,

L é a distância entre apoios,

l é a largura do provete e,

h é a altura do provete.

A tensão de rotura à flexão é calculada através da expressão anterior, em que *F* toma o valor da carga máxima medida no ensaio aquela a que se verificou a rotura do provete.

As deformações correspondentes, nomeadamente a de rotura, podem também calcular-se através de:

$$\varepsilon = \frac{6D_m h}{L^2} \tag{3.25}$$

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

O módulo de elasticidade (em flexão) pode ser também calculado como:

$$E = \frac{L^3 m_d}{4lh^3} \tag{3.26}$$

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

Os valores do módulo de Young e da tensão de rotura do compósito, podem ser calculados por aplicação da lei das misturas [5]. Se se considerar nula a fracção volúmica de vazios, então:

$$E_1 = E_f v_f + E_p(1 - v_f) \tag{3.27}$$

em que,

E_1 é o módulo de elasticidade da camada na direcção das fibras,

E_f é o módulo de elasticidade das fibras,

v_f é a fracção volúmica de fibras, e,

E_p é o módulo de elasticidade da matriz

Analogamente, para a resistência mecânica:

$$X = X_f v_f + X_p(1 - v_f) \tag{3.28}$$

em que,

X é a tensão de rotura longitudinal,

X_f é a resistência mecânica das fibras (tensão de rotura) e,

X_p é a resistência mecânica da matriz (tensão de rotura).

A expressão 3.28 deverá considerar-se apenas válida para fracções volúmicas de fibras superiores a 5% e quando a deformação na rotura das fibras for inferior à da matriz (o que acontece na maioria dos casos práticos e, em particular, para as fibras e matriz utilizadas neste trabalho).

Na prática e para os materiais usados neste trabalho, os valores do módulo e da resistência mecânica da matriz são muito menores que os correspondentes valores para as fibras, pelo que as expressões 3.27 e 3.28 poderão ser simplificadas para:

$$E_1 \approx E_f v_f \tag{3.29}$$

e

$$X \approx X_f v_f \tag{3.30}$$

3.4.2.1.1.2 Preparação e Ensaio dos Provetes

Os ensaios de flexão em três pontos realizaram-se à temperatura ambiente numa máquina de ensaios Instron 4208 utilizando uma célula de carga de 5 kN e uma velocidade de deflexão de 2 mm/min. De cada placa em compósito produzida por compressão, foram cortados para ensaio cinco provetes rectangulares. Considerando que a espessura média dos provetes rondava os 2,5 mm, escolheu-se uma distância entre apoios de 80 mm, a que corresponde um cociente L/h=32.

A partir das curvas carga versus deflexão obtidas, determinou-se o valor de m_d pelo método dos mínimos quadrados. Tal como referido no parágrafo 3.2.3.1.3 para o caso dos ensaios de tracção, aquela curva foi também corrigida por forma a garantir-se que a uma carga nula corresponda uma deflexão também nula. Os resultados dos ensaios de flexão das placas de compósito consolidadas a partir de *towpregs* e de plastisol de PVC encontram-se compilados no Anexo III-1 e no Anexo II-2, respectivamente.

3.4.2.2 Ensaios de Anéis Tubulares

Foram efectuados ensaios de tracção e corte interlaminar para determinação das propriedades mecânicas dos tubos produzidos, descritos nos parágrafos seguintes.

3.4.2.2.1 Ensaio de Tracção (Split Disk)

Os ensaios de "split-disk" permitiram determinar a tensão de rotura e o módulo de elasticidade em tracção na direcção circunferencial dos tubos produzidos, nas condições definidas no parágrafo seguinte.

3.4.2.2.1.1 Técnica

A determinação das propriedades mecânicas foi feita através de ensaios de anéis tubulares extraídos dos segmentos de tubo produzidos, utilizando um dispositivo designado por '*split-disk'*, segundo a norma ASTM D2290-92. Este ensaio consiste em submeter os anéis tubulares a esforços de tracção semelhantes aos desenvolvidos em tubos sujeitos a pressão interna, tal como é ilustrado na Figura 3.13.

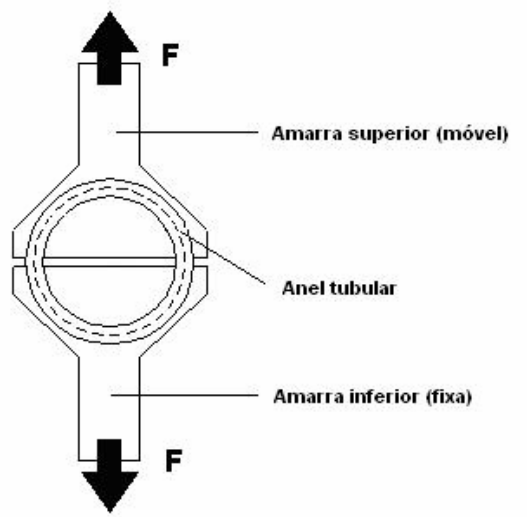


Figura 3.13 Esquema do dispositivo de ensaios 'split-disk' (adaptado de [5]).

Os anéis ensaiados foram cortados dos tubos fabricados com uma largura de 6 mm e ensaiados de acordo com a norma ASTM D2290-92. No ensaio calculou-se a tensão de rotura à tracção (σ_θ) através da seguinte equação:

$$\sigma_\theta = F/(2le) \tag{3.31}$$

onde,

F é a carga de rotura,

l é a largura do anel e,

e é a espessura.

O módulo de elasticidade circunferencial foi determinado a partir do deslocamento medido na máquina de ensaios. Sendo a variação do raio do anel, Δr:

$$\Delta r = \frac{\Delta u}{\pi} \tag{3.32}$$

onde, Δu, é a variação da distância entre os dois meios discos do dispositivo de ensaio. O que permite, finalmente, estimar o valor do módulo de elasticidade circunferencial, E_θ, como:

$$E_\theta = \frac{\Delta F}{\Delta u}\frac{\pi D}{4le} \tag{3.33}$$

onde,

D é o diâmetro médio do anel e,

ΔF é a variação da carga de tracção.

Os resultados obtidos a partir destes ensaios permitem estabelecer uma relação directa com a pressão interior que o tubo pode suportar (pressão de rebentamento), através da seguinte equação:

$$\sigma_\theta = \frac{p_i r_i}{r_e - r_i} \tag{3.34}$$

em que p_i é a pressão interior aplicada, σ_θ a tensão circunferencial na parede, ri o raio interior do tubo (igual a 40 mm) e r_e o seu raio exterior.

3.4.2.2.1.2 Ensaio dos Provetes e Tratamento de Dados

Foram ensaiados anéis cilíndricos com cerca de 80 mm de diâmetro interior, 6 mm de largura e 3 mm de espessura, numa máquina universal de ensaios mecânicos Instron 4208, com uma célula de carga de 5 kN, a uma velocidade de 1 mm/min. Durante o ensaio foram registados os valores da carga e do deslocamento das amarras, sendo este considerado igual ao afastamento entre os dois meios discos do dispositivo de ensaio. A Figura 3.14 representa uma curva típica força-deslocamento obtida nos ensaios realizados. Esta curva permite identificar a carga de rotura e observar a existência de uma região inicial linear, através da qual é possível estimar o módulo de elasticidade circunferencial. Os resultados dos ensaios de "split-disk" encontram-se compilados no Anexo IV-1.

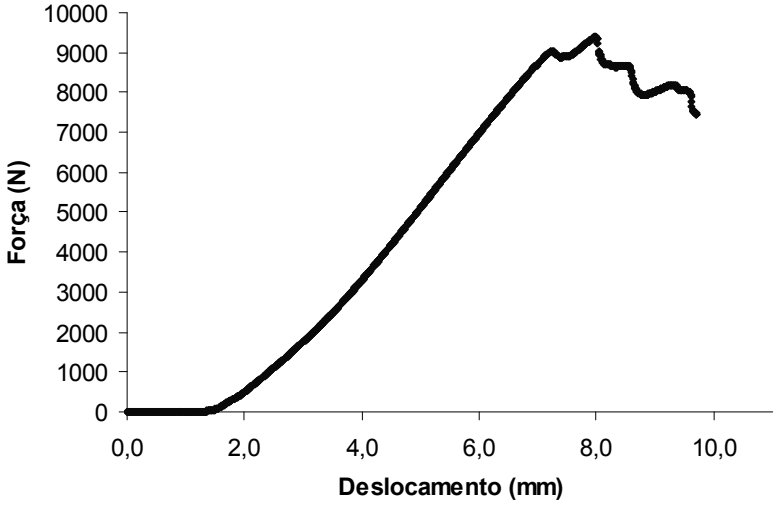


Figura 3.14 Curva força/deslocamento típica obtida no ensaio de "split disk".

3.4.2.2.2 Ensaio de Corte Interlaminar

Os ensaios para a determinação da resistência ao corte interlaminar, que permitiram retirar conclusões relativamente à qualidade da consolidação, foram efectuados com base em estudos anteriormente realizados [48,49], utilizando um dispositivo desenvolvido num estudo anterior [50].

Os provetes a ensaiar são colocados entre o apoio fixo e o braço com a superfície interior do tubo voltada para o interior do dispositivo de ensaio, de acordo com as Figuras 3.15 e 3.16. O apoio móvel é deslocado de forma a garantir o alinhamento das arestas que definem o plano de corte.

A carga é aplicada pela máquina de ensaios com uma velocidade de deslocamento de 1 mm/min a meio do braço do dispositivo, correspondendo a uma carga aplicada na superfície da amostra com uma velocidade de deslocamento de 2 mm/min, provocando no provete um esforço de corte. O comprimento do braço é de 80 mm.

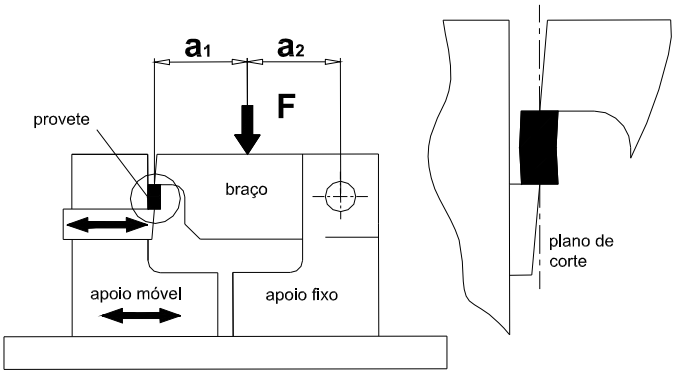


Figura 3.15 Esquema do dispositivo para ensaios de corte interlaminar [5].

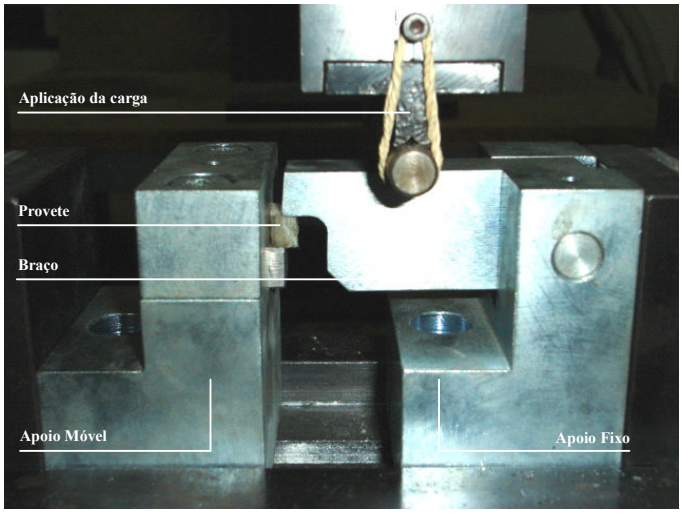


Figura 3.16 Dispositivo para ensaio de corte montado na máquina de ensaios (adaptado de [5]).

A resistência ao corte interlaminar, τ_r, é calculada dividindo a carga de rotura, *P,* pela área da secção solicitada:

$$\tau_r = F\left(\frac{a_2}{a_1 + a_2}\right)\frac{1}{lh} \tag{3.35}$$

onde,

a_1, a_2 são as distâncias mostradas na Figura 3.15,

l é a largura do provete e,

h é a altura do provete.

Os resultados dos ensaios de resistência ao corte interlaminar estão compilados no Anexo IV-2.

3.4.2.2.3 Observação ao Microscópio Electrónico de Varrimento

As amostras de tubo consolidado por enrolamento filamentar a partir de FV/PVC, foram observadas as superfícies do lado exterior, do lado interior e da secção transversal das referidas amostras tubulares, de forma similar ao procedimento ao já descrito no parágrafo 3.2.2.3.

3.4.2.3 Determinação da Fracção Mássica de Fibras

Foi determinada a fracção mássica de fibras nas placas produzidas por compressão e nos tubos produzidos por enrolamento filamentar, através de ensaios de calcinação de acordo com a norma NP 2216 / ISO 1172.

Secaram-se cadinhos e provetes numa estufa a 50 ºC, até que duas pesagens sucessivas, intervaladas de 30 minutos, não diferissem mais do que 1 mg. Posteriormente procedeu-se à pesagem dos cadinhos numa balança com precisão de 0,01 mg, designando-se a sua massa inicial por m_1, e, à pesagem do conjunto do provete e cadinho, designando-se a respectiva massa por m_2.

De seguida, aqueceu-se lentamente o conjunto provete e cadinho até 625 ºC numa mufla, até que toda a matéria orgânica tivesse desaparecido e restasse apenas um resíduo de fibras. Após o arrefecimento até à temperatura ambiente, pesou-se o cadinho com o resíduo remanescente, designando-se a massa obtida por, m_3.

A fracção mássica de fibras, w_f, foi calculada através de:

$$w_f = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \tag{3.36}$$

Conhecendo a fracção mássica de fibras é possível determinas a respectiva fracção volúmica por:

$$v_f = \frac{w_f \rho_p (1 - v_v)}{\rho_f + w_f (\rho_p - \rho_f)} \tag{3.37}$$

onde,

v_f é a fracção volúmica das fibras,

w_f é a fracção mássica (ou ponderal) de fibras,

ρ_f e ρ_p são as densidades das fibras e da matriz, respectivamente e,

v_v representa o teor em vazios.

A fracção mássica de polímero, w_p, pode ser obtida pela expressão $w_p = (1 - w_f)$. Se o teor de vazios não for significativo pode simplificar-se a expressão anterior, considerando-se $v_v = 0$.

3.5 Reparação de Tubagens em PVC

3.5.1 Preparação da Tubagem

A aplicação da tecnologia de fabrico de compósitos, a partir do plastisol de PVC de baixa viscosidade, na reparação de tubagens em PVC, é um dos objectivos deste trabalho, no sentido de contribuir para o desenvolvimento de uma técnica de reparação de tubagens, que seja expedita, económica e sem recurso à substituição das mesmas.

Foi realizado um estudo em 6 tubos de PVC PN10 de 90 mm de diâmetro exterior e 2 mm de espessura, com 750 mm de comprimento cada.

Optou-se por estudar a reparação manual das tubagens, cujo dano foi simulado por um furo circular (Fig.3.17), com manta de fibras de vidro impregnada com o plastisol de PVC.

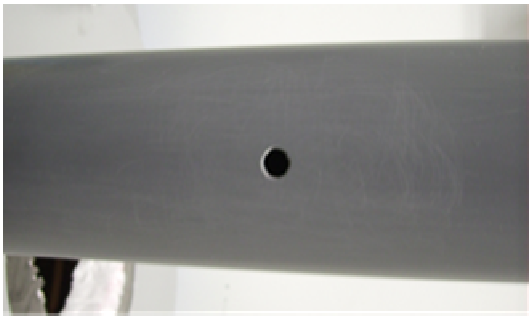


Figura 3.17 Dano efectuado num dos tubos de PVC.

Foi efectuado com uma máquina de furar vertical um furo com 10 mm de diâmetro em 3 dos tubos referidos. De seguida, lixou-se e desengordurou-se a superfície de cada um dos tubos na zona da reparação com o intuito de aumentar a rugosidade superficial e retirar a gordura, para facilitar a adesão do polímero do tubo ao PVC adicionado na sua reparação.

Na reparação começou por se depositar uma camada do plastisol de PVC na superfície do tubo (Fig.3.18).



Figura 3.18 Deposição do plastisol de PVC na superfície da tubagem.

De seguida interpuseram-se 3 camadas de tecido de fibras de vidro que se impregnaram manualmente com a ajuda de um pincel com o plastisol de PVC (Fig.3.19).

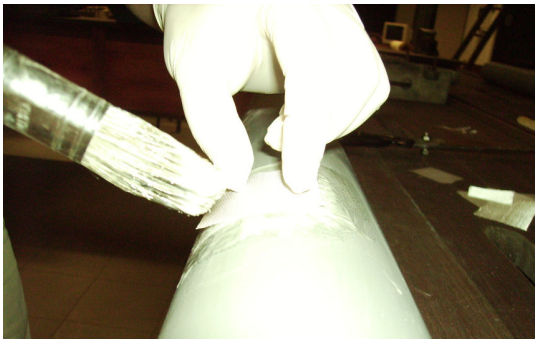


Figura 3.19 Colocação do tecido de reforço na zona da reparação.

Finalmente procedeu-se à reticulação do PVC através de um soprador de ar quente (Fig.3.20). O aquecimento da superfície foi feito até se atingir a dureza característica do PVC depois de processado, colocando o soprador a uma distância adequada para não queimar o PVC.



Figura 3.20 Aquecimento da zona da reparação para consolidação do PVC.

3.5.2 Ensaios de Pressão Interior em Tubagens

Foram ensaiados os 6 tubos atrás referidos, no sentido de se avaliar a qualidade da reparação efectuada em 3 dos tubos. Os ensaios foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, numa instalação de pressurização da marca Reglerautomatik, modelo RPCS Master 2, com um transdutor de pressão com limite de pressão de 60 bar.



Figura 3.21 Equipamento de pressurização Reglerautomatik RPCS Master 2 (LNEC).

Os tubos foram previamente chanfrados nas extremidades e de seguida tamponados com terminais do Tipo A, sem veio central. Depois de devidamente tamponados (Fig.3.22) foram cheios com água a uma pressão de 7 bar, e, sangrados para eliminar eventuais bolhas de ar no interior.



Figura 3.22 Tubo de PVC preparado para o ensaio de pressão interior (tamponado nas extremidades com terminais do Tipo A).

Concluída a preparação, procedeu-se ao ensaio individual dos tubos, mergulhando-os no interior do tanque do equipamento de pressurização com água a uma temperatura de 20,1 ºC ± 0.09 (Fig.3.23). Aumentou-se progressivamente a pressão no interior dos tubos até a rotura, registando-se o valor da pressão atingida e o tempo de cada ensaio.

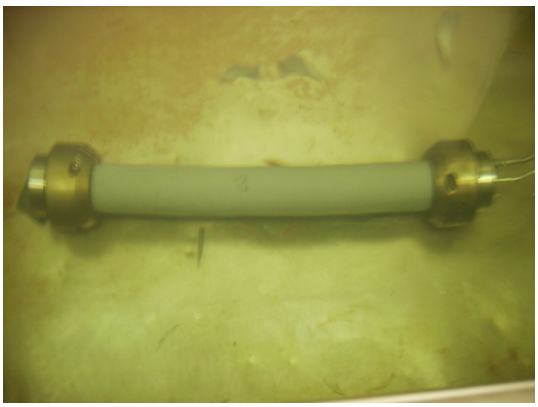


Figura 3.23 Tubo de PVC mergulhado no tanque do equipamento de pressurização para ensaio de pressão interior.

CAPÍTULO IV

4 Apresentação e Discussão de Resultados

Este capítulo encontra-se dividido em quatro sub-capítulos: i) caracterização das matérias-primas utilizadas, ii) produção e caracterização de pré-impregnados de matriz termoplástica, iii) consolidação dos pré-impregnados por compressão a quente e, finalmente, iv) transformação dos pré-impregnados por enrolamento filamentar.

No primeiro sub-capítulo apresentam-se e discutem-se as propriedades relevantes do policloreto de vinilo (PVC) e das fibras de vidro (FV) usados na produção dos pré-impregnados de matriz termoplástica estudados, incidindo sobretudo, sobre os ensaios efectuados e as propriedades que foram determinadas para o PVC no decurso do presente trabalho, uma vez que, a maioria das propriedades das mechas de fibras de vidro tipo E de 2400 Tex usadas (refª 305E-TYPE 30 DIRECT ROVING), foram já determinadas em estudos anteriormente realizados e publicados [42].

No segundo sub-capítulo descrevem-se as condições de produção dos pré-impregnados de matriz termoplástica e apresentam-se as propriedades mais relevantes determinadas nos pré-impregnados fabricados.

No terceiro, apresenta-se a consolidação dos pré-impregnados por compressão a quente, bem como, as propriedades mecânicas mais relevantes nos compósitos produzidos por este método de fabrico.

Por último, no quarto sub-capítulo, apresenta-se o processamento por enrolamento filamentar de estruturas compósitas de matriz termoplástica tubulares, a partir de FV e um plastisol de PVC (pasta de PVC de baixa viscosidade) e, finalmente, as propriedades mecânicas mais relevantes destes compósitos.

4.1 Caracterização das Matérias-Primas

4.1.1 Policloreto de Vinilo

4.1.1.1 Determinação da Densidade

De acordo com o procedimento descrito no capítulo III e com a Equação (3.1), determinou-se a densidade do pó de PVC utilizado. A densidade calculada através do método do picnómetro foi de

0,730. Este resultado foi obtido fazendo-se a média de três ensaios e está em perfeito acordo com o valor fornecido pelo fabricante (0,770). Esta densidade determinada é a densidade aparente porque considera como polímero os interstícios entre as respectivas partículas.

4.1.1.2 Determinação da Granulometria

A caracterização da granulometria do PVC com a referência Previnil GM267 utilizado no fabrico dos pré-impregnados de matriz termoplástica foi feita de acordo com o referido no parágrafo 3.2.2.4 do capítulo III.

Os resultados indicados na Tabela I-2.2 do Anexo I-2.2 foram determinados a partir dos valores mássicos directamente obtidos com a pesagem das partículas retidas em cada peneiro.

Os valores médios calculados a partir dos resultados mássicos obtidos encontram-se sumariados nas 3ª e 4ª colunas da Tabela 4.1. Nas 5ª e 6ª colunas da tabela apresentam-se também os mesmos resultados calculados em termos de número de partículas, a partir das Equações (3.3) e (3.5), respectivamente.

Tabela 4.1 Resultados médios obtidos nos ensaios com os peneiros.

Nº do peneiro	**Abertura**	**Massa de partículas retida**	**Frequência mássica**	**Nº de partículas**	**Frequência de partículas**
-	**μm**	**g**	**%**	**($\times 10^3$)**	**%**
recipiente	0	0,16	0,16	7,292	14,33
230	63	1,51	1,54	4,910	9,65
170	90	6,06	6,19	7,110	13,97
120	125	25,89	26,41	14,518	28,53
100	150	42,95	43,77	13,938	27,39
80	180	21,04	21,44	3,086	6,06
60	250	0,48	0,49	34,000	0,07

Para além da informação que se pode retirar no que respeita à ordem de grandeza do número de partículas distribuídas pelos diferentes tamanhos, constata-se que as frequências relativas de partículas de PVC retidas em cada peneiro são bastante díspares. Esta diferença pode ser melhor observada na Figura 4.1 que estabelece aquelas frequências relativas em função do diâmetro médio das partículas retidas em cada peneiro.

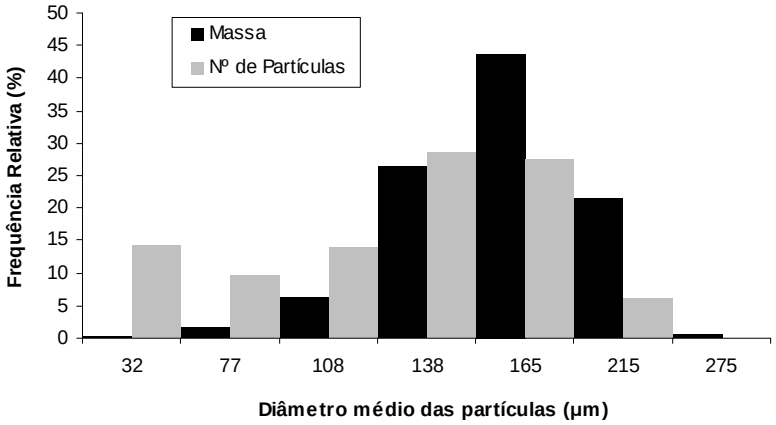


Figura 4.1 Frequências relativas em termos de massa e número de particulas.

Como se pode verificar os resultados mássicos obtidos directamente a partir da pesagem das partículas retidas nos peneiros sobrestimam o tamanho das partículas de polímero, uma vez que as partículas com maior diâmetro têm também maior massa. Isto é, a curva de distribuição apresenta-se distorcida no sentido das partículas com maior tamanho o que conduz a uma sobreavaliação do valor médio e da mediana na distribuição de tamanhos das partículas de polímero.

A partir das frequências relativas determinadas, calcularam-se as frequências acumuladas também em termos de massa e número de partículas, que se apresentam na Figura 4.2. Tal como os resultados anteriores deixavam prever, o comportamento das duas curvas de frequência acumulada também é bastante distinto, conduzindo à obtenção de valores da média e mediana diferentes nos dois casos.

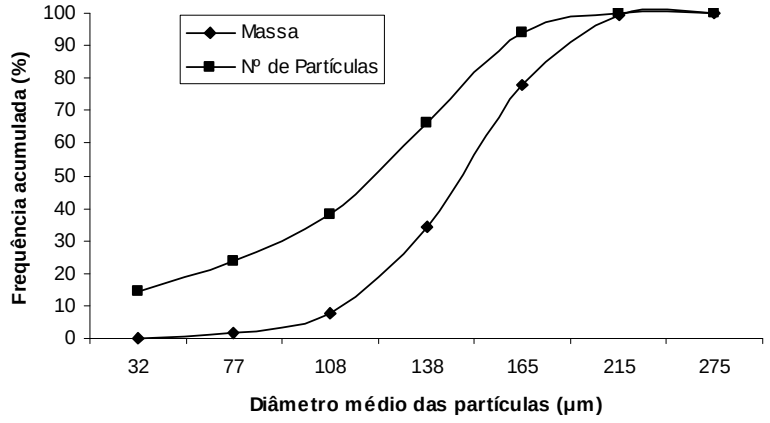


Figura 4.2 Frequências acumuladas em termos de massa e número de particulas.

Como a mediana da distribuição corresponde a uma frequência acumulada de 0,5, podem-se retirar directamente do gráfico anterior os valores das medianas para o diâmetro das partículas. Obtêm-se,

assim, aproximadamente 120 e 150 μm para os valores das medianas consoante se considere o tratamento de dados em termos de número ou de massa de partículas, respectivamente.

Fez-se também a aproximação dos dados experimentais obtidos nestes ensaios pela distribuição de Weibull que melhor se aproximava da distribuição de granulometrias determinada experimentalmente. Assim, começou por se estabelecer os parâmetros da distribuição para os dados experimentais obtidos em termos mássicos.

A Figura 4.3 apresenta em escala logarítmica a relação entre $\ln\left(\frac{1}{1-S_w}\right)$ e $(d_p - d_0)$, onde S_w e d_p representam a frequência acumulada em termos mássicos e o diâmetro das partículas, respectivamente, e d_0 é um valor próximo do tamanho mínimo das partículas de polímero. Atribuindo a d_0 um valor inicial de 32 μm, correspondente ao menor diâmetro médio das partículas de PVC, a maximização do coeficiente de correlação linear resultante da aproximação dos resultados experimentais por uma recta, usando o método dos mínimos quadrados, permitiu estabelecer para d_0 o valor 0,0 ao qual corresponde um coeficiente de correlação linear próximo da unidade ($r^2 = 0{,}9569$).

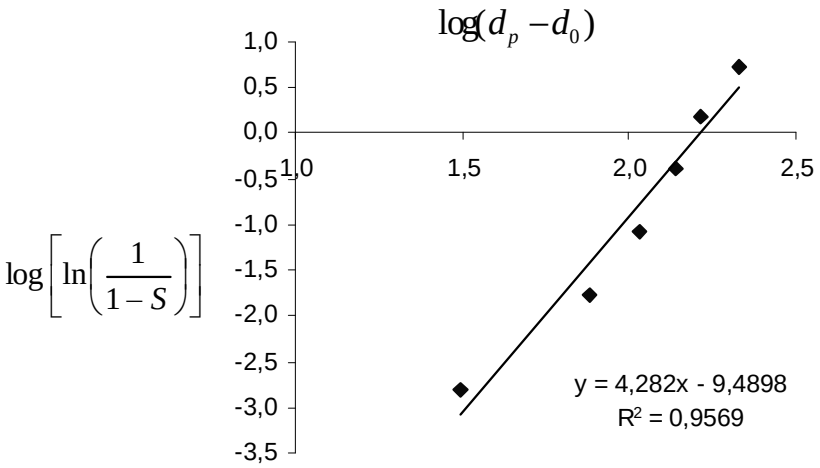


Figura 4.3 Relação linear em escala logarítmica.

Calcularam-se, então, os valores da constante de escala (θ_w) e do parâmetro *b* da distribuição de Weibull.

A Tabela 4.2 sintetiza os valores determinados para os diferentes parâmetros. *A* e *B* representam os coeficientes lineares da recta obtida pelo método dos mínimos quadrados (representada na Fig.4.3), *Y=AX+B*, que melhor aproximou a relação entre $\ln\left(\frac{1}{1-S_w}\right)$ e $(d_p - d_0)$ em escala logarítmica.

Tabela 4.2 Parâmetros da distribuição de Weibull em termos de massa de partículas.

r^2	A	B	θ_w	b	d_0
-	(μm^{-1})	-	(μm)	-	(μm)
0,9569	4,282	-9,490	165	4,282	0,0

A função de distribuição S_w das partículas de PVC, em termos mássicos, fica então definida pela seguinte equação:

$$S_w = 1 - e^{-\left(\frac{d_p}{165}\right)^{4,282}} \tag{4.1}$$

A curva da Figura 4.4 mostra que os resultados obtidos experimentalmente, em termos de frequências acumuladas, são bem aproximados pela função de Weibull determinada.

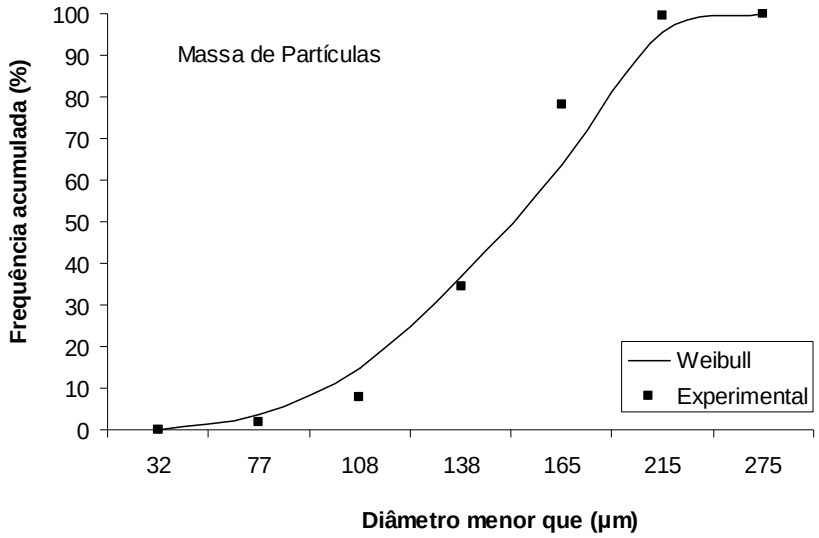


Figura 4.4 Comparação entre os resultados experimentais e calculados para a frequência acumulada de partículas de PVC em termos de massa.

Relativamente aos dados obtidos em termos de número de partículas, obtiveram-se os parâmetros de Weibull apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Parâmetros da distribuição de Weibull em termos de número de partículas.

r^2	A	B	θ_w	b	d_0
-	(μm^{-1})	-	(μm)	-	(μm)
0,831	1,943	-3,975	111	1,943	0,0

A função de distribuição S_w, em termos de número de partículas, é assim dado por:

$$S_w = 1 - e^{-\left(\frac{d_p - 0}{167}\right)^{1,116}} \qquad (4.2)$$

Como se pode ver na Figura 4.5 as frequências acumuladas obtidas experimentalmente em termos de número de partículas também se aproximam bem da função de Weibull determinada.

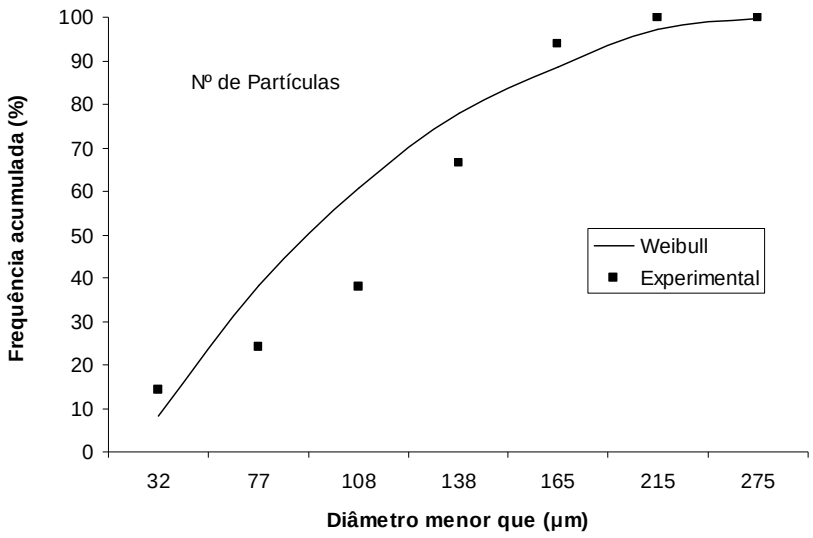


Figura 4.5 Comparação entre os resultados experimentais e calculados para a frequência acumulada de partículas de PVC em termos de número de partículas.

Depois de definidas as duas distribuições de Weibull que melhor aproximavam a distribuição de tamanhos das partículas de PVC determinou-se o valor médio, mediana e a variância do seu diâmetro usando as Equações (3.9) a (3.11) definidas no capítulo III. A Tabela 4.4 apresenta os valores destas propriedades para as partículas PVC usadas neste trabalho, considerando as distribuições dos tamanhos das partículas, tanto em termos mássicos com em número de partículas.

Tabela 4.4. Médias, medianas e variâncias calculadas a partir das distribuições de Weibull.

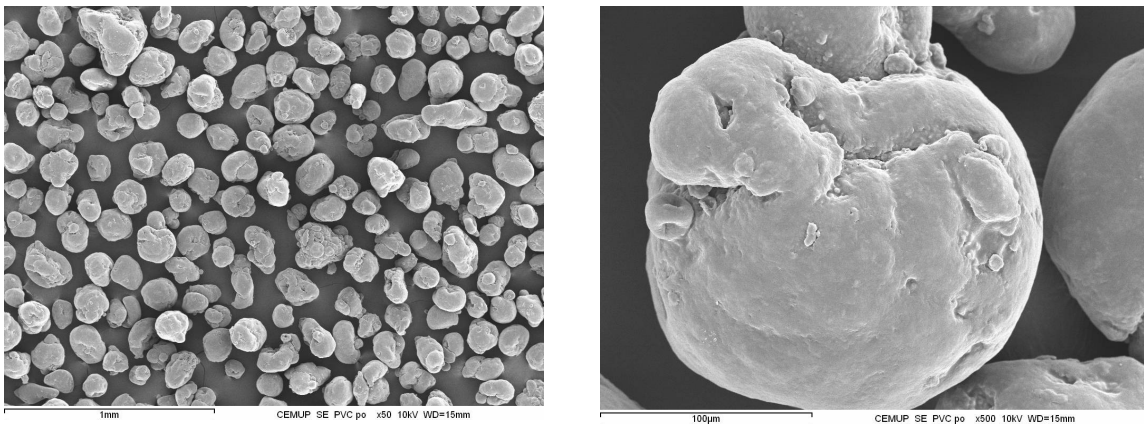
	Média (µm)	**Mediana (**µm)	**Variância** $(\mu m)^2$
Massa de partículas	150,1	151,5	1568,3
Nº de partículas	96,7	90,3	2789,0

Como se pode observar, o valor da mediana determinado pela aproximação de Weibull considerando a distribuição em termos de massa de partículas (151,5 µm) coincide com o determinado a partir da curva experimental (150 µm). O valor da mediana obtido considerando a aproximação de Weibull

(90,3 μm) relativamente ao gráfico experimental (120 μm), em termos do número de partículas, apresenta um erro de cerca de 25%.

4.1.1.3 Observação do PVC no Microscópio Electrónico de Varrimento (SEM)

A observação de amostras de PVC em pó no microscópio electrónico de varrimento (JEOL JSM-6301F) nas condições descritas no ponto 3.2.2.3 do capítulo III, permitiu avaliar a forma e dimensões características do pó de polímero. Na Fig.4.6 apresentam-se duas imagens típicas representativas das observações efectuadas com ampliações de 50 e de 500 vezes. Como se observa, verificou-se que as partículas do PVC em pó apresentavam, de uma maneira geral, uma forma regular, aproximadamente esférica, mas com diferentes tamanhos.



a) Ampliação 50× **b)** Ampliação 500×

Figura 4.6 Partículas do PVC em pó observadas ao microscópio electrónico.

4.1.1.4 Determinação das Propriedades Mecânicas do PVC

A determinação das propriedades mecânicas em tracção do PVC utilizado foi efectuada segundo as recomendações da Norma ISO 3268 e de acordo com o procedimento definido no parágrafo 3.2.3.1.3. do Cap. III. Para o efeito foram produzidos por uma tecnologia corrente de transformação de termoplásticos denominada de extrusão provetes de PVC posteriormente sujeitos a ensaios de tracção. Dos ensaios realizados foram extraídas curvas força-deslocamento, apresentadas no Anexo I-2.4, tendo-se constatado que todas apresentavam um comportamento muito semelhante.

Como se pode observar na Figura 4.7, que se considera representativa do comportamento de todos os provetes ensaiados, a região inicial da curva força-deslocamento obtida apresenta não linearidades muito ligeiras. Verifica-se também que a curva força-deslocamento não passa na origem do referencial.

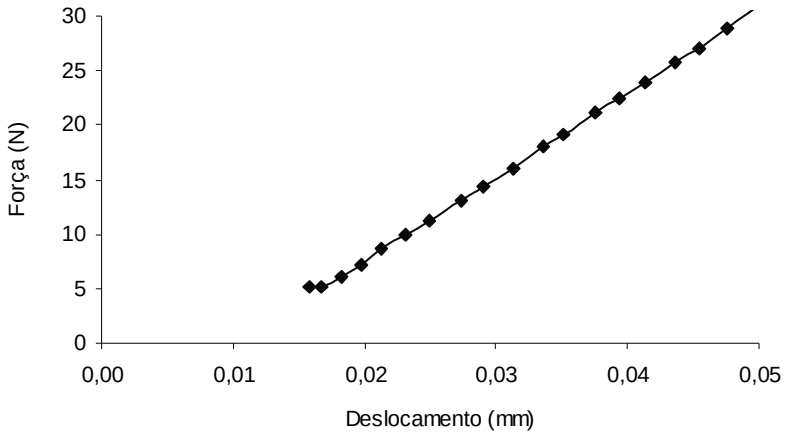


Figura 4.7 Região inicial da curva força-deslocamento no ensaio de tracção do provete PVC1.

Devido a este comportamento do material, houve necessidade de proceder a correcções de modo a que os resultados relativos às propriedades mecânicas não fossem afectados, nomeadamente, o módulo de Young e as deformações no limite elástico e à rotura. As correcções foram efectuadas de acordo com o procedimento referido no parágrafo 3.2.3.1.3 do capítulo III.

Relativamente ao módulo de Young, procedeu-se à determinação do declive das curvas tensão/deformação, resultantes dos ensaios experimentais, considerando apenas um intervalo em que existe uma quase perfeita linearidade entre a tensão e a deformação.

Nesse intervalo, utilizou-se o método dos mínimos quadrados para aproximar por uma recta os pontos da curva tensão/deformação obtidos, tendo-se considerado o módulo inicial do PVC igual ao declive da recta assim determinada. Face à relação quase perfeitamente linear entre tensão e deformação obtida nesta zona das curvas experimentais obtiveram-se coeficiente de correlação muito próximos da unidade em todos os ensaios.

Os valores da deformação dos provetes estavam influenciados pelo desvio introduzido inicialmente pelo escorregamento dos provetes nas amarras da máquina de ensaios. Como tal, procedeu-se à sua correcção de acordo com a Eq. (3.21) apresentada no parágrafo 3.2.3.1.3 do capítulo III. Esta correcção permite eliminar os erros relativos à deformação efectiva dos provetes, deslocando as curvas de forma a passarem pela origem do referencial, sem alterar os valores da força, que é medida pela célula de carga e registado pela máquina de ensaios sem ser afectada por este fenómeno.

A tensão de rotura foi obtida, dividindo a força máxima registada pela secção inicial do provete, tendo-se obtido os valores que se apresentam na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Resultados dos ensaios de tracção do PVC.

Propriedade	Unidade	Referência dos provetes					Média	Desvio Padrão
		PVC 1	PVC 2	PVC 3	PVC 4	PVC 5		
Tensão de rotura (σ_{rot})	MPa	42,62	49,84	48,54	51,92	48,65	48,32	3,46
Módulo de Young (**E**)	GPa	3,37	3,53	3,41	3,87	3,76	3,59	0,22

O valor de tensão de rotura medido experimentalmente neste trabalho (48,3 MPa) está de acordo com o fornecido pelo fabricante (45 MPa). Relativamente ao módulo de Young, não se conhece nenhuma especificação por parte do fabricante.

4.1.2 Determinação da Massa Volúmica do PVC Processado

Para a determinação da massa volúmica do PVC depois de processado, utilizou-se uma amostra extraída de uma régua de PVC extrudido, de acordo com o parágrafo 3.2.4 do Capítulo III. Considerando nula a fracção volúmica de vazios na amostra, o valor da massa volúmica calculado foi de 1,31 g/cm^3.

4.1.3 Determinação das Propriedades Térmicas do PVC

4.1.3.1 Ensaios de Termogravimetria (TGA)

Para realizar o ensaio de termogravimetria utilizou-se uma balança termogravimétrica da marca Mettler, de acordo as condições definidas no parágrafo 3.2.5.1 do capítulo III. Este ensaio permite determinar o início da degradação do polímero e estudar a evolução da sua degradação com o aumento da temperatura. Os resultados obtidos encontram-se no Anexo I-2.5 sob a forma de gráfico.

A Figura 4.8 representa a evolução da perda de massa do polímero com a temperatura. Pode identificar-se um intervalo de temperaturas para o qual se verificou o início da perda de massa (início da degradação do polímero). Apesar da perda de massa do PVC se iniciar a cerca de 180 ºC, considera-se que a temperatura para a qual se dá uma perda significativa de massa é de cerca de 220 ºC, de acordo com o procedimento descrito no parágrafo 3.2.5.1 do capítulo III, através da intersecção da recta horizontal, correspondente a uma perda de massa nula, com a recta correspondente à aproximação linear aos pontos onde se verifica uma efectiva perda de massa no material.

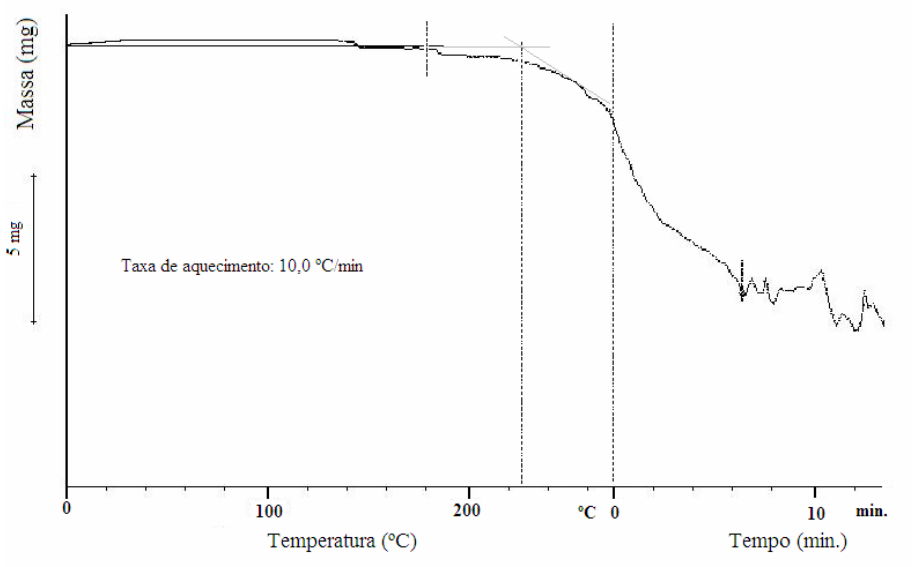


Figura 4.8 Evolução da perda de massa com a temperatura por termogravimetria.

De acordo com este resultado a temperatura máxima de processamento do material só poderá ultrapassar os 180 ºC por períodos muito curtos, sob pena de ocorrer calcinação do PVC.

4.2 Fabrico e Caracterização de Pré-Impregnados de FV/PVC

Os pré-impregnados de PVC reforçado com fibras de vidro (FV/PVC) estudados neste trabalho foram produzidos no equipamento protótipo existente no INEGI e disponibilizado para este estudo [5].

4.2.1 Fabrico de Pré-Impregnados

Os pré-impregnados FV/PVC foram fabricados em contínuo na linha de produção descrita no parágrafo 3.3.1 do Capítulo III e em diversas publicações científicas [51-61].

Não sendo objectivo deste trabalho quantificar a influência de cada um dos parâmetros de processamento na qualidade dos *towpregs*, mas sim, perceber em que sentido os parâmetros principais a influenciam, procurou-se combiná-los de forma a conseguir maximizar-se o teor de polímero no *towpreg*.

Numa fase inicial, procurou-se aumentar a deposição de PVC na fibra de vidro, utilizando-se o equipamento na sua configuração original e experimentando-se diferentes combinações dos parâmetros de processamento. Nestas condições, verificou-se que a deposição do polímero é inversamente proporcional à velocidade linear de fabrico (ou de puxo das mechas de fibras) do *towpreg*, independentemente de outros parâmetros. Por um lado, quanto maior é aquela velocidade,

menor é o tempo de exposição das fibras ao pó de PVC no interior da câmara de deposição e maior é a quantidade deste que se "solta" entre a saída da câmara de deposição e o forno onde se dá o início da consolidação. Nas experiências efectuadas verificou-se que para uma temperatura do forno de cerca de 250 ºC e velocidades de puxo inferiores a 0,3 m/min se dá a degradação do PVC.

Em relação à temperatura do forno, verificou-se que esta exerce uma influência directa na qualidade do *towprwg* ao nível da adesão do polímero ás fibras de vidro, constatando-se ainda que, quanto mais elevada for essa temperatura, mais rígido é o *towpreg* fabricado.

Combinando estes parâmetros estabeleceu-se uma janela de processamento com velocidades de puxo das fibras entre os 0,3 e 0,5 m/min, e, temperaturas do forno entre os 250 e 280 ºC. Operando para além dos valores indicados, com temperaturas abaixo do valor mínimo referido ou velocidades acima do valor máximo, não se conseguiu obter um *towpreg* com boas características (suficiente teor de polímero). Por outro lado, com temperaturas acima do valor máximo e velocidades abaixo do valor mínimo o PVC evidenciou o início da sua degradação.

Mesmo utilizando-se as condições operacionais optimizadas já referidas, verificou-se que a adesão entre o PVC e as fibras de reforço, à saída da câmara de deposição, não era a melhor. Na tentativa de melhorar essas condições, procedeu-se, numa segunda fase, a uma alteração do equipamento, de acordo com o referido no parágrafo 3.3.1. do capítulo III.

Depois das várias experiências com diferentes condições de processamento, optou-se por combinar os parâmetros que permitiram os melhores resultados, com a humidificação das fibras à entrada da câmara de deposição.

Esta alteração permitiu um aumento da taxa de deposição de cerca de 20% relativamente aos melhores resultados até aí conseguidos.

Os parâmetros de processamento experimentados e considerados óptimos para produzir os *towpregs* encontram-se resumidos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Parâmetros óptimos utilizados no fabrico dos *towpregs* de FV/PVC.

Parâmetro	Unidades	Valor
Velocidade linear das fibras	m/min	0,3-0,5
Fluxo de polímero	g/min	>10
Velocidade do ventilador	r.p.m.	800
Temperatura do forno	ºC	250-280
Temperatura na câmara de deposição	ºC	ambiente
Pressão média de ar no espalhador	kPa	500

Utilizando as condições de processamento da Tabela 4.6 foi possível produzir *towpregs*, mantendo praticamente constante o teor de polímero nas fibras.

4.2.2 Determinação dos Teores de Fibra e de Polímero

A determinação do teor mássico de fibra de vidro nos pré-impregnados produzidos foi obtida por pesagem das amostras de *towpreg* produzidas, de acordo com o referido no parágrafo 3.3.2 do capítulo III.

A Tabela 4.7 resume os resultados finais após tratamento de todos os resultados obtidos dos ensaios realizados sobre os *towpregs* fabricados nas condições de processamento já referidas. Na Tabela II.1 do Anexo II pode consultar-se os valores experimentais obtidos nos ensaios.

Tabela 4.7. Teor de fibras no *towpreg*.

Propriedade	Unidade	Com unidade de humidificação				Sem humidificação			
		Média	D. P.	Max.	Mín.	Média	D. P.	Max.	Mín.
Peso	g	6,06	0,59	6,48	5,64	5,69	0,32	6,05	5,49
Peso linear	g/m	3,03	0,30	3,24	2,82	2,84	0,16	3,03	2,74
Teor mássico de fibras	%	80,01	7,97	85,65	74,38	84,66	4,51	87,52	79,46
Teor volúmico de fibras	%	67,20	11,23	75,88	60,00	73,90	6,54	78,27	66,55

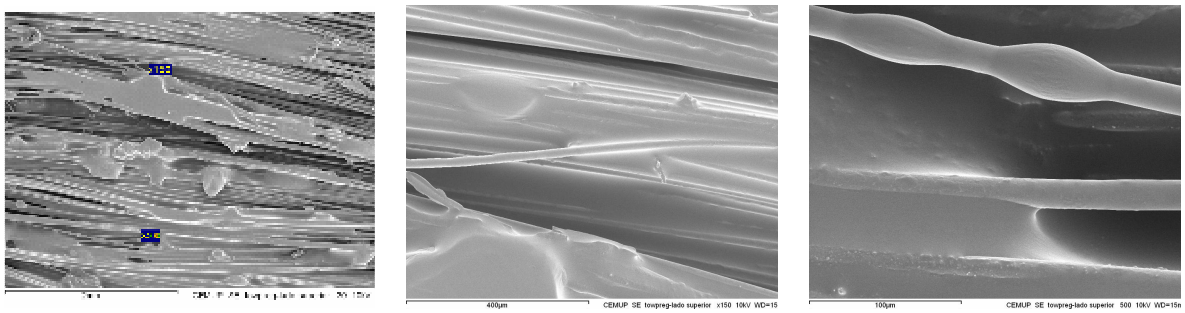
A partir dos resultados da tabela anterior pôde constatar-se que, independentemente dos outros parâmetros de processamento, a humidade relativa tem influência na taxa de deposição do polímero sobre as fibras. Com o aumento da humidade relativa a taxa de deposição de polímero é maior, sendo por consequência maiores os teores finais de polímero nos *towpregs* produzidos. Os resultados encontrados mostram que mesmo com a humidificação das fibras os teores volúmicos de polímero

(cerca de 33%) são ainda relativamente baixos para permitirem um fácil processamento do pré-impregnado num compósito final.

4.2.3 Observação ao Microscópio Electrónico de Varrimento (SEM)

Tal como se fez com as partículas de PVC em pó, os pré-impregnados produzidos (*towpregs*) foram observados no microscópio electrónico de varrimento (SEM) JEOL JSM-6301F, para verificação visual da interface fibra/polímero.

Nas Figura 4.9 e 4.10 mostram-se fotografias obtidas ao microscópio de amostras de *towpreg*.

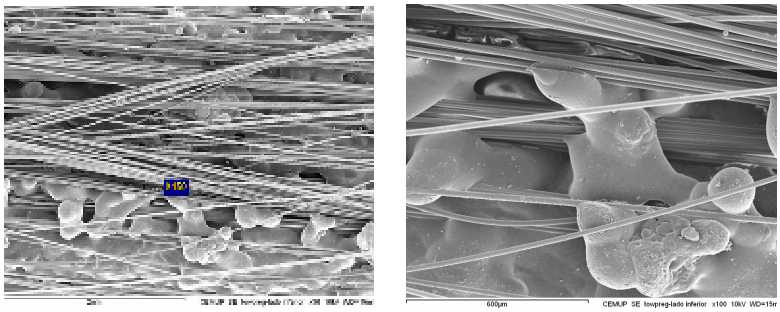


a) Ampliação 30× **b)** Ampliação 150× **c)** Ampliação 500×

Figura 4.9 – Amostra de *towpreg* observada pelo "lado superior" no microscópio electrónico de varrimento.

As amostras observadas correspondem as *towprgs* produzidos nas condições definidas na Tabela 4.6 com a câmara de humidificação instalada. Optou-se por fazer observações das mechas de *towpreg* dos dois lados destas, isto é do lado 'superior' ou do lado onde cai o polímero em pó e do lado 'inferior' ou do lado que fica voltado para baixo. As observações efectuadas pretendem verificar a homogeneidade da distribuição do polímero pelas fibras, bem, como a existência de vazios.

A Figura 4.9 apresenta três fotografias de uma amostra de *towpreg* observada pelo lado superior com diferentes ampliações. A imagem menos ampliada deixa perceber que algumas fibras se encontram impregnadas pelo PVC, embora se possam observar zonas sem polímero. As condições de adesão são aparentemente boas, conforme se pode observar nas figuras com maior ampliação.



a) Ampliação 30× **b)** Ampliação 150×

Figura 4.10 – Amostra de *towpreg* observada pelo "lado inferior" no microscópio electrónico de varrimento.

Na Figura 4.10 podem observar-se fotografias que correspondem a observações das amostras pelo lado inferior. Verifica-se que o preenchimento de polímero é mais acentuado no "lado superior" das mechas de *towpreg*. Isso, deve-se ao facto de que parte do pó de PVC depositado na parte inferior das fibras não chega a ser consolidado no forno, caindo por acção da gravidade, após a saída da câmara de deposição do equipamento usada na produção dos *towpregs*.

4.3 Transformação dos Pré-Impregnados por Compressão a Quente

Os *towpregs* produzidos foram posteriormente processados por compressão a quente, como descrito no parágrafo 3.4.1.1.1 do capítulo III, em ciclos de pressão e temperatura, numa prensa SATIM de 400 kN.

Esta tecnologia foi usada para transformar em placas de material compósito os *towpregs* produzidos bem como os tecidos de fibras de vidro impregnados manualmente com plastisol de PVC.

Para produzir placas a partir de *towpregs* amostras deste pré-impregnado constituídas por 16 m de *towpreg* produzidas nas condições definidas na Tabela 4.6 do parágrafo 4.2.1, foram colocadas na cavidade do molde e seguidamente comprimidas na prensa em condições de pressão e temperatura constantes.

Também foram produzidas placas em compósito, transformadas a partir de tecido de fibras de vidro e PVC. As placas foram executadas colocando directamente 5 camadas de tecido de fibras de vidro intercaladas pelo plastisol de PVC no prato inferior da prensa, tendo sido sujeitas a um ciclo de pressão e temperatura.

No parágrafo 4.3.1 deste subcapítulo, analisam-se os resultados dos ensaios mecânicos a que se sujeitaram as diferentes placas laminadas transformadas.

As figuras 4.11 e 4.12 mostram fotografias das placas transformadas em compósito, produzidas por compressão a quente a partir de *towpregs* e de plastisol , respectivamente.



Figura 4.11 – Placa obtida por compressão a quente a partir de *towpreg*.

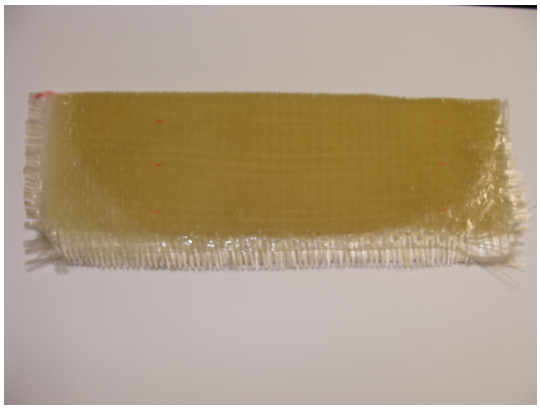


Figura 4.12. – Placa obtida a partir de tecido de fibras de vidro e plastisol de PVC.

Como se pode observar, verificam-se alguns desalinhamentos das fibras e zonas de polímero que parecem mais bem transformadas do que outras.

4.3.1 Propriedades Mecânicas das Placas Transformadas por Compressão a Quente

As propriedades mecânicas das placas transformadas por compressão a quente, a partir de *towpregs* e de tecido de fibras de vidro impregnada com plastisol de PVC, foram determinadas de acordo com os procedimentos descritos no parágrafo 3.4.2 do capítulo III.

As placas fabricadas foram transformadas de acordo com o procedimento definido no parágrafo 3.4.1.1 do capítulo III usando as condições de processamento sumariadas na tabela 4.8.

Tabela 4.8 Condições de processamento das placas transformadas por compressão a quente.

Parâmetro	Unidade	*Towpreg*	Fibras de vidro/plastisol de PVC
Temperatura de compressão	º C	210	170
Tempo de estágio à temperatura e pressão de compressão	minuto	15	15
Pressão de compressão	MPa	15	3

4.3.1.1 Propriedades das Placas em Flexão

As propriedades mecânicas em flexão foram determinadas com base em ensaios de flexão em três pontos, de acordo com o procedimento descrito no parágrafo 3.4.2.1.1, submetendo 4 provetes de cada um dos tipos de placas transformadas nas condições definidas no parágrafo anterior. Estes ensaios foram efectuados numa máquina de ensaios universal Instron 4208, a uma velocidade 2 mm/min com uma distância entre apoios de 80 mm.

Os teores volúmicos de fibras nas placas foram determinados de acordo com o procedimento referido no parágrafo 3.4.2.3 do capítulo III.

Na Figura 4.13 estão representadas as curvas força/deflexão para os quatro provetes transformados a partir de *towpregs*, fabricados nas condições típicas referidas no parágrafo 4.2.1. Os resultados dos ensaios estão apresentados no Anexo III-1 (provetes com a referência TFlex).

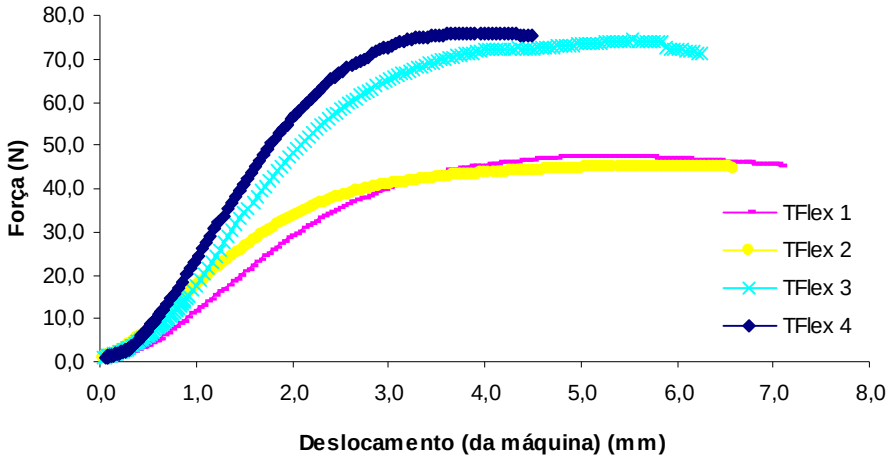


Figure 4.13 – Curvas do ensaio de flexão em três pontos para os provetes referência TFlex.

Na Figura 4.14 apresentam-se as mesmas curvas para os cinco provetes transformados a partir de tecido de fibra de vidro impregnada com plastisol de PVC. Os resultados dos ensaios estão apresentados no Anexo III-2 (provetes com a referência MFlex).

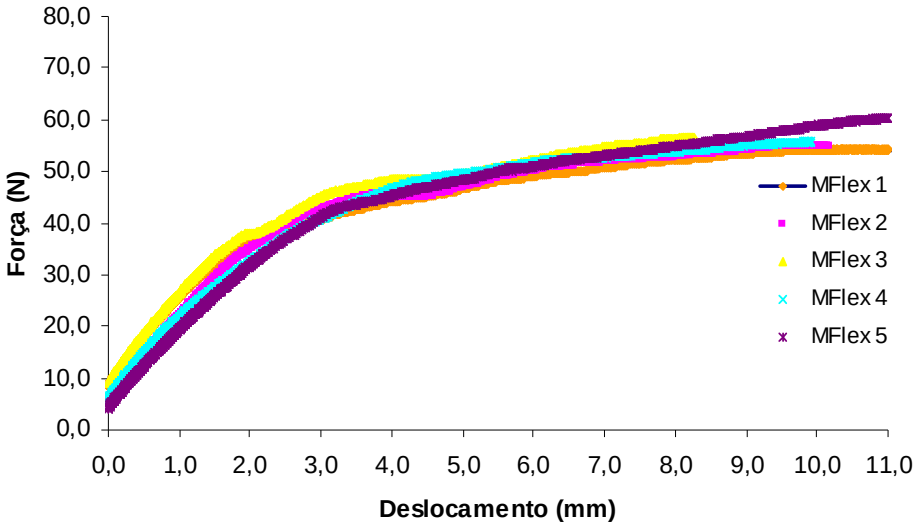


Figure 4.14 – Curvas do ensaio de flexão em três pontos para os provetes referência MFlex.

O módulo de elasticidade à flexão foi obtido através da Eq. (3.26) utilizando o declive da recta que pelo método dos mínimos quadrados melhor aproximava os resultados experimentais nesta zona linear da curva, onde se verifica uma dependência quase linear entre a força e a deflexão em todos os provetes ensaiados. A tensão de rotura foi obtida a partir da Eq. (3.24) utilizando o valor máximo da força obtido no ensaio.

Na Tabela 4.9 apresentam-se os resultados médios das propriedades mecânicas em flexão obtidos nos dois tipos de placas transformadas.

Tabela 4.9 Propriedades mecânicas em flexão das placas em compósito.

Pré-impregnado	**Propriedade**	
	Módulo de elasticidade em flexão E_1 (GPa)	**Tensão rotura X** (MPa)
Towpreg	8,7	51,6
Tecido FV/Plastisol de PVC	1,3	20,3

Os valores obtidos experimentalmente são inferiores aos valores teóricos esperados pelo facto de se verificar desalinhamento nas fibras, existirem vazios na matriz e pela

impregnação/consolidação não estarem optimizadas, nomeadamente, no caso das placas produzidas a partir de *towpregs*.

4.4 Consolidação dos Pré-Impregnados por Enrolamento Filamentar

Neste sub-capítulo, apresentam-se as condições de fabrico e um estudo do desempenho mecânico dos compósitos de matriz termoplástica tubulares produzidos directamente a partir de mechas de fibra de vidro e do PVC por enrolamento filamentar num equipamento convencional, utilizado correntemente para transformar compósitos de matriz termoendurecível.

4.4.1 Condições de Processamento

As mechas de fibras de vidro e o plastisol de PVC foram processados em tubos num equipamento de enrolamento filamentar, nas condições referidas no parágrafo 3.4.1.2 do capítulo III.

Os tubos foram fabricados com quatro camadas, obtendo-se uma espessura total da parede de, aproximadamente, 3 mm, empilhadas com as fibras na direcção circunferencial (≈ 89º). A consolidação foi feita com um soprador de ar quente direccionado para a superfície do tubo. Na Figura 4.15 apresenta-se uma fotografia de um dos tubos produzidos.

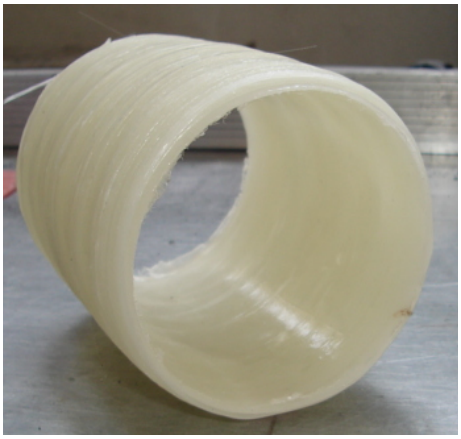


Figura 4.15 Tubo produzido por enrolamento filamentar a partir de fibra de vidro e plastisol de PVC.

Os limites de variação das condições de processamento usados no fabrico dos tubos de FV/PVC encontram-se sumariados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 Condições operatórias usadas durante enrolamento filamentar dos tubos

Parâmetro	Unidade	Valor
Velocidade de rotação do mandril	r.p.m.	3,3 - 12
Temperatura de consolidação	ºC	160 - 200
Tensão nas fibras	N	10
Temperatura do mandril	ºC	Ambiente

Para o fabrico dos tubos foi necessário acoplar ao carro responsável pelo movimento longitudinal de deposição um soprador de ar quente direccionado para a superfície do tubo a enrolar, para, deste modo se promover a reticulação do plastisol de PVC.

Para que este processo funcione bem, é muito importante controlar a viscosidade do termoplástico, uma vez que, se for pouco viscoso as fibras molham-se, mas transportam pouca quantidade do termoplástico e se, for muito viscosa, introduz uma tensão excessiva nas fibras que dificulta a sua 'molhagem'.

Outro factor importante a controlar prende-se com a distância entre o soprador e a superfície do tubo sujeita ao aquecimento. Se esta for muito reduzida, o sopro faz deslocar a "pasta" depositada criando irregularidades e aberturas na superfície. Se for excessiva, não se consegue consolidar convenientemente os componentes das primeiras camadas enroladas.

4.4.2 Determinação das Propriedades Mecânicas em Tracção Através de Ensaios de 'Split-Disk'

Este tipo de ensaio "split-disk" simula uma solicitação na parede dos provetes cilíndricos muito semelhante à que resulta da aplicação de uma solicitação de pressão interna ao tubo.

Os ensaios foram efectuados de acordo com a norma ASTM D2290 e o procedimento descrito no parágrafo 3.4.2.2.1 do capítulo III, numa máquina universal de ensaios Instron 4208, a uma velocidade de deslocamento entre amarras de 1 mm/min,

Para a realização dos ensaios foi utilizado um dispositivo (ver Fig.4.16) especialmente projectado para o efeito [5] tendo os provetes a ensaiar a forma de anéis tubulares, cortados transversalmente dos tubos produzidos, com uma largura de, aproximadamente, 6 mm.

Com os dados dos ensaios foi possível estabelecer curvas de força versus deslocamento, que permitiram determinar a tensão de rotura.



Figura 4.16 Dispositivo utilizado nos ensaios de split-disk.

A Figura 4.17 mostra uma curva típica de força versus deslocamento, obtida num dos ensaios efectuados.

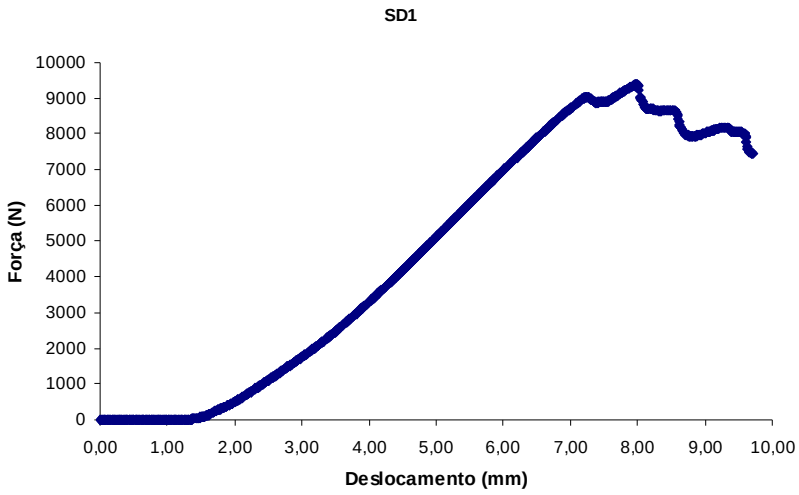


Figura 4.17 Curva típica obtida nos ensaios de split-disk.

Na fase inicial verificou-se um ajustamento entre a amarra do dispositivo de ensaio e o anel a ensaiar. Depois de eliminada essa folga, verificou-se um comportamento linear entre a carga e o deslocamento, até à fase da rotura.

De acordo com as Eq. (3.33) e Eq. (3.34) é possível determinar o módulo de elasticidade circunferencial e estabelecer-se uma relação directa entre a tensão circunferencial e a pressão interior que o tubo pode suportar (pressão de rebentamento), respectivamente. No Anexo IV-1 são apresentados os gráficos resultantes dos ensaios, bem como, os valores da pressão de rebentamento

correspondentes às tensões de rotura circunferencial obtidas em cada ensaio realizado (ver Tabela IV-1.1 do Anexo IV-1). A Tabela 4.11 resume os resultados obtidos com os cinco provetes ensaiados.

Tabela 4.11 Resultados obtidos nos ensaios de "split-disk".

Ref.	**Largura** (mm)	**Espessura** (mm)	**Carga de rotura** (kN)	**Tensão de rotura** (MPa)	**Módulo de elasticidade circunferencial** (GPa)	**Pressão de rebentamento** (MPa)
SD1	7,0	5,5	9,4	121,9	1,9	16,8
SD2	6,3	5,1	7,7	120,1	1,9	15,3
SD3	6,5	4,7	7,2	118,2	2,2	13,9
SD4	5,5	5,4	5,5	92,9	1,2	12,5
SD5	8,0	5,5	9,2	104,4	1,8	14,4
Média	**6,7**	**5,2**	**7,8**	**111,5**	**1,8**	**14,6**
Des. Pad.	**0,9**	**0,3**	**1,6**	**12,5**	**0,3**	**1,6**

A estimativa do valor médio da pressão de rebentamento obtido, de aproximadamente 15 MPa, permite concluir que, as tubagens em compósito de PVC reforçado com fibras de vidro, produzidas neste trabalho, apresentam uma resistência à pressão interior compatível com grande parte das aplicações de transporte de fluidos sob pressão.

4.4.3 Determinação da Resistência ao Corte Interlaminar

A resistência ao corte interlaminar foi determinada segundo os ensaios de corte interlaminar referidos no capítulo III, utilizando-se quatro amostras de tubos processados por enrolamento filamentar, de acordo com o definido no parágrafo 3.4.2.2.2 do capítulo III.

As amostras foram submetidas ao ensaio com uma velocidade de deslocamento do cabeçote da máquina de ensaios de 1 mm/min. Dada a configuração do dispositivo de ensaio, o deslocamento efectivo na amostra foi de cerca de 2 mm/min e, a força de corte aplicada metade da registada pela máquina de ensaios. Na Figura 4.18 está representada uma curva típica obtida durante um dos ensaios efectuados.

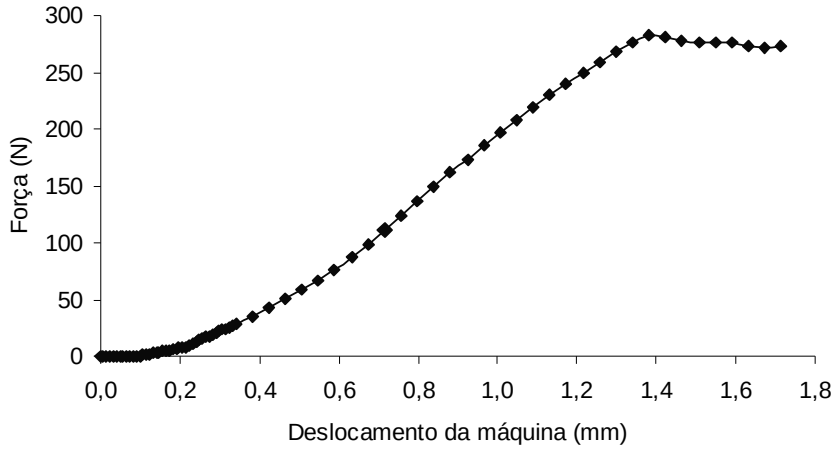


Figura 4.18 Curva típica força versus deslocamento, obtida nos ensaios de corte interlaminar.

A curva apresenta até aos 0,15 mm de deslocamento do cabeçote, aproximadamente, um patamar horizontal, que corresponde à folga existente entre o provete e o dispositivo de ensaio. Depois de eliminada esta folga, o provete é efectivamente solicitado em tracção, verificando-se a existência de uma relação aproximadamente linear entre a força e o deslocamento.

Dos ensaios obtiveram-se valores de carga de rotura, apresentados no Anexo IV-2, que, através da Eq.(3.35) do capítulo III, permitiram calcular a tensão de rotura ao corte interlaminar (ver Tabela IV-2.1 do Anexo IV-2). Com estes valores foram determinados os respectivos valores médios, resumidos na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 Resultados médios obtidos nos ensaios de corte interlaminar.

Largura (mm)		**Altura** (mm)		**Carga de rotura** (N)		**Tensão de rotura ao corte medida** (MPa)	
média	D. P.	média	D. P.	média	D. P.	média	D. P.
7,4	0,1	11,5	0,4	276,8	16,7	1,6	0,04

4.4.4 Observação ao Microscópio Electrónico de Varrimento de tubos em FV/PVC

Os tubos produzidos por enrolamento filamentar foram observados no microscópio electrónico de varrimento JEOL JSM-6301F, nas condições definidas no parágrafo 3.4.2.2.3 do capítulo III, utilizando-se amostras com, aproximadamente, 10×10 mm^2. As observações foram efectuadas nas superfícies exterior, interior e na secção transversal do tubo, podendo o resultado observar-se nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21.

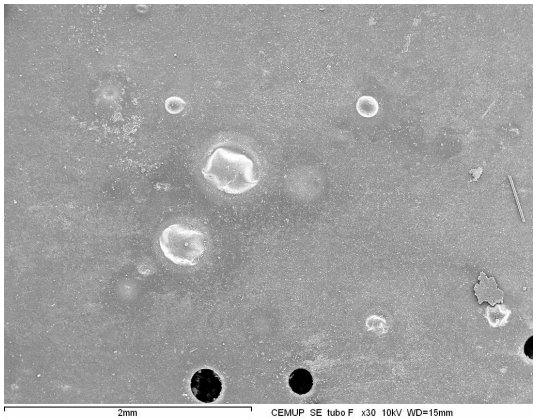
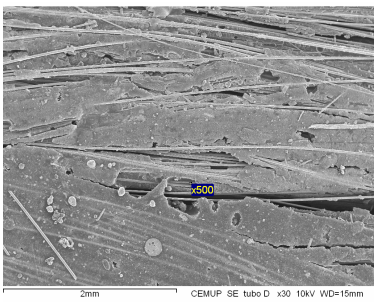
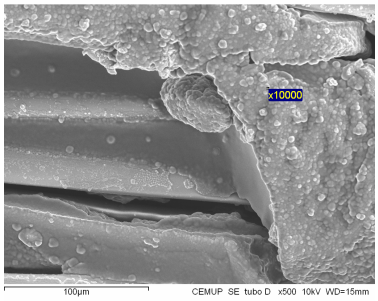


Figura 4.19 Observação da superfície exterior de um tubo no microscópio electrónico (×30).

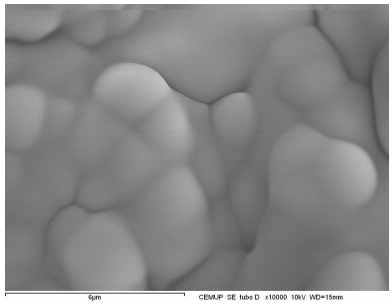
Da fotografia da figura anterior pode observar-se que a superfície exterior da amostra do tubo se encontra completamente preenchida pelo termoplástico. No entanto, observam-se manchas, que correspondem a vazios e bolhas à superfície da amostra do tubo produzido.



a) Ampliação 30×



b) Ampliação 500×



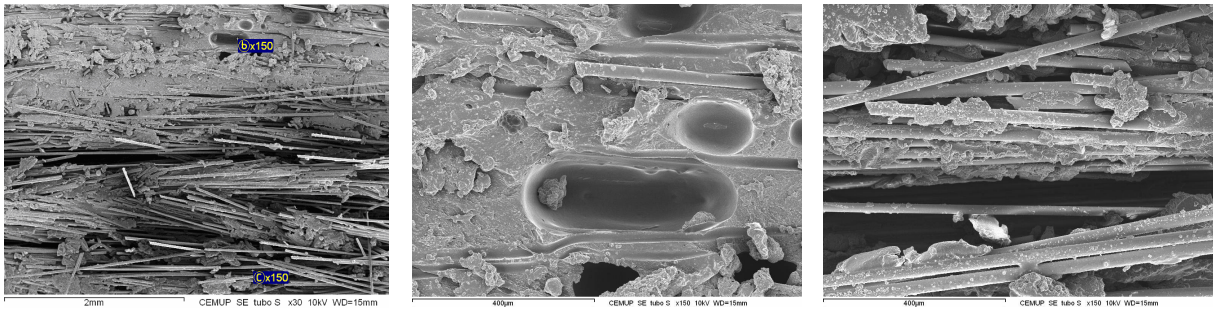
c) Ampliação 1000×

Figura 4.20 Observação da superfície interior de um tubo no microscópio electrónico.

Da observação da Figura 4.20 a) pode verificar-se que a superfície interior da amostra apresenta filamentos de fibra de vidro visíveis, o que permite concluir que, a ligeira tensão nas fibras é suficiente para que estas tendam a envolver a superfície do mandril, no início do enrolamento, esmagando o plastisol de PVC, que tende a ficar mais à superfície. Este comportamento poderá ser contrariado com a deposição de uma fina camada de plastisol de PVC sobre o mandril, antes de se iniciar o enrolamento.

A Figura 4.20 b) é uma fotografia com ampliação de uma zona escura, assinalada na fotografia anterior, onde se pode observar alguns ocos cavados na matriz devido ao desprendimento de algumas fibras.

A Figura 4.20 c) corresponde a uma ampliação da zona assinalada na fotografia 4.20 b), na qual é possível ver a matriz bem espalhada (sem vazios).



a) Ampliação 30× **b)** Ampliação 150× **c)** Ampliação 150×

Figura 4.21 Observação da secção transversal de um tubo no microscópio electrónico.

A Figura 4.21 mostra fotografias da secção transversal da amostra de tubo, sendo possível identificar duas zonas distintas. Na fotografia a) a parte inferior corresponde ao lado interior do tubo, onde se verifica um preenchimento da matriz menos eficaz, quando comparado com o da parte exterior do tubo, que apresenta a matriz bastante densa. Tal como referido atrás, isto deve-se ao facto de que, durante o enrolamento, a fibra de vidro tende a aproximar-se do mandril, mergulhando no plastisol de PVC, ficando este mais à superfície, conforme se pode observa pelas fotografias b) e c).

4.5 Reparação de Tubagens em PVC

4.5.1 Determinação da Pressão Interior em Tubagens de PVC

Sendo o estudo da reparação de tubagens em PVC um dos objectivos deste trabalho, procurou-se desenvolver uma solução expedita de reparação de tubagens de PVC. Como tal, decidiu-se utilizar o tecido de fibras de vidro impregnado com plastisol de PVC, por ter apresentado boas características no fabrico de tubagens por enrolamento filamentar, desenvolvido neste trabalho. Para além das indicações recolhidas anteriormente, a opção de utilizar estes materiais na reparação das tubagens vai também no sentido de eliminar o problema da falta de compatibilidade química entre o material da tubagem e o da reparação.

A viabilidade da solução estudada foi verificada através da realização de ensaios de pressão interior, realizados com tubagens sem dano e tubagens com dano reparadas e posterior comparação dos resultados encontrados.

Os resultados dos ensaios de pressão interior estão apresentados de seguida na Tabela 4.13, sendo que a designação PVC corresponde aos tubos sem qualquer dano e a designação PVC R, corresponde aos tubos com dano provocado e respectiva reparação.

Tabela 4.13 Resultados obtidos nos ensaios de pressão interior em tubagens de PVC.

Ref.	**Pressão de rebentamento** (MPa)	**Duração do ensaio** (s)
PVC 1	2,67 (26,7 bar)	80
PVC 2	2,51 (25,1 bar)	76
PVC 3	2,37 (23,7 bar)	74
PVC R1	1,30 (13,0 bar)	38
PVC R2	0,70 (7,0 bar)	3
PVC R3	2,29 (22,9 bar)	71

Através dos resultados constata-se que em dois dos tubos reparados (Ref. PVC R1 e PVC R2) a pressão máxima atingida no ensaio é muito inferior à dos restantes. Tal aconteceu pelo facto de ter havido descolamento do 'patch' de reparação, resultante de uma reparação mal consolidada com se pode observar na Figura 4.22.



Figura 4.22 Descolamento do 'patch' de reparação num tubo de PVC durante um ensaio de pressão interior.

O tubo com a designação PVC R3 rebentou a uma pressão similar à dos tubos sem dano ensaiados, mantendo a integridade na zona reparada no final do ensaio. Isto significa, que a reparação foi bem executada, garantindo-se assim a estanquicidade e conferindo-se uma resistência à zona reparada superior à resistência do tubo.

Ao analisar o tubo no final do ensaio, verificou-se que as fissuras apareceram em zonas distintas da reparada, conforme se pode observar pelas figuras 4.23 e 4.24.

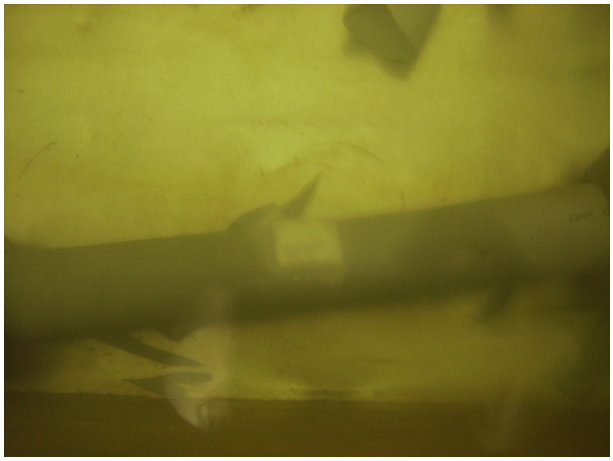


Figura 4.23 Ensaio de pressão interior a um tubo de PCV com dano, reparado com manta de FV impregnada com PVC.



Figura 4.24 Momento do rebentamento do tubo de PVC reparado, durante o ensaio de pressão interior (zona da reparação intacta).

Com base nestes resultados verifica-se que é possível aplicar este tipo de reparação a tubagens de PVC, embora seja necessário obviamente desenvolver e alargar este estudo a outras classes de pressão e dimensão de tubagens.

4.6 Comparação de Propriedades de Compósitos FV/PVC com as de Outros Materiais de Uso Corrente em Engenharia

Na Tabela 4.14 resumem-se as propriedades mecânicas já obtidas, experimentalmente, em compósitos produzidos por diferentes tecnologias de transformação a partir dos *towpregs* desenvolvidos neste trabalho.

Tabela 4.14 Propriedades mecânicas típicas obtidas em compósitos processados por diferentes técnicas a partir de *towpregs*.

Propriedade	**Unidades**	**Valores determinados**	
		Compressão (*Towpreg*)	**Enrolamento filamentar** (Tecido + Plastisol de PVC)
Resistência à tracção	MPa	-	111,5
Resistência à flexão	MPa	51,6	20,3
Módulo de elasticidade em flexão	GPa	8,7	1,30
Módulo de elasticidade circunferencial	GPa	-	1,81

Como se pode observar, os valores obtidos para as propriedades mecânicas são suficientemente interessantes para que os compósitos possam vir a ser utilizados em grande parte das aplicações de grande consumo.

Na tabela 4.15 comparam-se as propriedades mecânicas dos compósitos de matriz termoplástica transformados a partir dos *towpregs* com as de outros materiais de uso corrente. As propriedades específicas obtiveram-se dividindo o respectivo valor pela massa específica do material.

Tabela 4.15 Comparação das propriedades mecânicas de materiais de uso tradicional em engenharia e dos compósitos de matriz termoplástica transformados a partir de manta de FV/Plastisol de PVC.

Material	**Massa Específica**	**Resistência à Tracção**		**Módulo de elasticidade em tracção**		**Resistência à flexão**		**Módulo de elasticidade em flexão**	
	($kg.m^{-3}$)	valor (MPa)	valor específico (kN×m/kg)	valor (GPa)	valor específico (MN×m/kg)	valor (MPa)	valor específico (kN×m/kg)	valor (GPa)	valor específico (MN×m/kg)
Compósitos de FV/PVC (pastisol)	1030	111,5	108,3	-	-	20,3	19,7	1,3	1,26
Compósito de FV/PVC (*towpreg*)	2500	-	-	-	-	51,6	20,6	8,7	3,48
Aço ao carbono	7850	450	57,3	210	26,8	450	57,3	210	26,8
Aço Inoxidável	7850	980	124,8	185	23,6	980	124,8	185	23,6
Alumínio	2700	90	33,3	70	26,0	90	33,3	70	26,0
Alumínio (liga)	2810	500	177,9	71	25,3	500	177,9	71	25,3
Nylon 66 (PA)	1060	45	42,5	2,8	2,6	85	80,2	2,8	2,64
Poliéster	1200	65	54,2	3,2	2,7	90	75,0	2,3	1,92
Polipropileno	905	30	33,1	1,3	1,4	40	44,2	1,5	1,65
PEEK	1380	115	83,3	5,1	3,7	-	-	3,8	2,75

Como se pode observar o compósito de matriz termoplástica obtido a partir de plastisol de PVC reforçado com fibras de vidro apresenta valores específicos de resistência à tracção superiores aos dos polímeros indicados, bem como, aos do aço ao carbono e do alumínio. Relativamente à resistência à flexão, apresenta os valores específicos mais baixos do que dos restantes materiais, apresentados na tabela. O compósito termoplástico obtido a partir de *trowpregs* apresenta valores de resistência à flexão superiores aos do compósito termoplástico de plastisol de PVC, embora sejam ainda inferiores aos dos restantes materiais referidos na Tabela 4.15.

Numa fase intermédia deste trabalho optou-se por produzir os compósitos a partir de PVC sob a forma de plastisol, como matriz, uma vez que são mais fáceis de fabricar e utilizar na reparação e manutenção de tubagens, do que os compósitos obtidos a partir de *towpregs*. Por outro lado, surgiram dificuldades na impregnação e consolidação dos *towpregs*, cuja fracção volúmica de fibras é muito elevada (cerca de 67%). De acordo com [5], para os *towpregs* de PVC e fibras de vidro, o valor teórico máximo para a fracção volúmica de fibras, considerando a inexistência de vazios, deve ser de 75%. Como o resultado obtido para o teor volúmico de fibras é muito próximo do limite teórico, conclui-se que os respectivos compósitos poderão apresentar zonas com vazios (falta de polímero). Adicionalmente aos vazios, constatou-se que apresentavam desalinhamento das fibras, o que limita as suas propriedades mecânicas.

Embora com valores baixos de resistência à flexão, os compósitos produzidos a partir do plastisol de PVC reforçados com fibras de vidro, apresentam uma resistência à tracção bastante razoáveis quando comparados com outros materiais de uso comum em Engenharia.

5 Conclusões

Com este trabalho, pretendeu-se estudar e desenvolver tecnologias de fabrico e transformação de pré-impregnados de matriz termoplástica de baixo custo, que permitissem alargar o campo de aplicações dos termoplásticos reforçados com fibras longas aos mercados de grande consumo. Procurou-se também desenvolver tecnologias de reparação de estruturas em termoplástico por aplicação de termoplásticos reforçados com fibras.

Seleccionaram-se o policloreto de vinilo e as fibras de vidro como matérias-primas a utilizar no fabrico dos pré-impregnados, para se experimentar novas potencialidades destes materiais quando utilizados em conjunto.

Estudou-se a produção e a transformação final de pré-impregnados fabricados por deposição contínua do PVC em pó sobre as fibras de reforço. Para esse efeito, utilizou-se um equipamento protótipo, anteriormente patenteado, para produzir os pré-impregnados por deposição de PVC e, adaptou-se duas tecnologias convencionais para os transformar: a compressão a quente e o enrolamento filamentar.

Ao longo dos diferentes processos de fabrico procedeu-se à optimização das condições de produção e transformação dos pré-impregnados para que se obtivesse um melhor comportamento mecânico dos compósitos finais.

As principais conclusões resultantes do estudo efectuado são as seguintes:

i) A deposição a seco de termoplásticos em pó sobre as fibras é uma tecnologia que pode permitir fabricar, em contínuo, pré-impregnados de matriz termoplástica reforçada com fibras longas, devendo utilizar-se um ambiente controlado, bem como, optimizar-se os respectivos parâmetros de produção.

ii) Esta tecnologia pode ser usada com diferentes termoplásticos e fibras de reforço existentes no mercado, permitindo fabricar diferentes tipos de pré-impregnados com o teor fibra/polímero pretendido.

iii) A qualidade dos pré-impregnados fabricados está particularmente relacionada com a eficácia do espalhamento das fibras e da deposição do termoplástico em pó, sendo o espalhador das fibras e a câmara de deposição dois componentes muito importantes no desempenho do equipamento de produção.

iv) A qualidade dos compósitos termoplásticos produzidos por enrolamento filamentar, dependem de alguns parâmetros que devem ser bem ajustados e controlados neste processo, nomeadamente, a velocidade de rotação e a temperatura do mandril, a pressão e a temperatura de consolidação.

v) a medição do tamanho das partículas de polímero através de peneiros é uma técnica mais adequada do que a microscopia mesmo se associada a um analisador de imagem, tanto industrialmente como laboratorialmente, pois esta não permite a obtenção de resultados fidedignos em tempo útil.

vi) a utilização de um plastisol de PVC permite uma fácil impregnação de tecidos de fibras de vidro para a produção de estruturas em material compósito utilizando técnicas similares a moldação manual.

vii) a reparação de tubagens de PVC com reforço de FV impregnadas com plastisol de PVC é um método de reparação fácil e rápido de executar, permitindo diminuir o tempo de reparação e executar a reparação no local, sem necessidade de seccionar as tubagens. Obviamente que necessita de ser mais desenvolvido para se conseguir aplicar esta tecnologia a diferentes condições de serviço das tubagens.

6 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para além das conclusões sugere-se algumas sugestões de interesse para eventual trabalho futuro:

1. Optimização dos *towpregs* de PVC para produção de compósitos.
2. Optimização do fabrico de tubagens em compósito de FV/PVC por enrolamento filamentar e determinação das suas propriedades mecânicas.
3. Aplicação de *patch* em compósito de FV/PVC na reparação de tubagens de PVC com diferentes tipos de dano.
4. Aplicação de *patch* em compósito de FV/PVC na reparação de tubagens de PVC com diferentes diâmetros e classes de pressão.
5. Aplicação de *patch* na reparação de tubagens em diferentes compósitos.
6. Estudar a viabilidade económica da utilização da reparação de tubagens estruturais de PVC com plastisol reforçado com fibras de vidro.

NOTAÇÃO

a_1, a_2 distâncias indicadas na Figura 3.19, (mm)

A parâmetro da recta dos mínimos quadrados

b parâmetro de dispersão da distribuição de Weibull

B parâmetro da recta dos mínimos quadrados

d_{pvc} densidade do PVC

d_{med} mediana de uma função de distribuição

d_0 parâmetro da distribuição de Weibull, função do tamanho mínimo de partícula, (μm)

d_p tamanho das partículas de polímero, na distribuição de Weibull, (μm)

d_{tow} massa linear do towpreg, (g/m)

d_{lin} massa linear das fibras de vidro ou Tex, (2.4 g/m)

D diâmetro médio do anel tubular, (mm)

D_m flecha medida a meio vão no provete, (mm)

e espessura, (mm)

E módulo de elasticidade, (GPa)

E_f módulo de elasticidade das fibras, (GPa)

E_p módulo de elasticidade da matriz, (GPa)

E_1 módulo de elasticidade da camada na direcção das fibras, (GPa)

E_θ módulo de elasticidade circunferencial, (GPa)

$E_{1\%}$ módulo de elasticidade a 1% de deformação, (GPa)

f_{im} frequência mássica de partículas para a classe de tamanhos i

F força, (N)

l largura do provete, (mm)

L distância entre apoios, (mm)

h altura, (mm)

m_{apic} massa do picnómetro, (kg)

m_{bpic} massa do picnómetro com 100 ml de água destilada, (kg)

m_{cpic} massa do picnómetro com água destilada e a amostra de PVC, (kg)

m_d declive da curva linear carga-deflexão obtida do ensaio

m_i massa de partículas na classe i, (kg)

m_1 massa do cadinho, (kg)

m_2 massa do conjunto provete e cadinho, (kg)

m_3 massa do cadinho e do resíduo resultante da queima do provete, (kg)

M massa total de partículas, (kg)

n_i número de partículas na classe de tamanhos i

p_i pressão no interior de uma tubagem, (MPa)

N número total de partículas

P carga de rotura, (N)

r_e raio exterior de um tubo, (mm)

r_i raio interior de um tubo, (mm)

S_w função de distribuição de Weibull

V_i volume de cada partícula da classe de tamanhos i, (μm3)

v_f fracção volúmica de fibras

v_v teor de vazios

w_f fracção mássica de fibras

X tensão de rotura longitudinal, (MPa)

X_f resistência mecânica das fibras (tensão de rotura), (MPa)

X_p resistência mecânica da matriz (tensão de rotura), (MPa)

$\overline{X}$ média de uma função de distribuição

Y resistência mecânica transversal (tensão de rotura transversal), (MPa)

ΔF variação da carga de tracção, (N)

Δr variação do raio do anel tubular, (mm)

Δu variação da distância entre os dois meios discos do dispositivo de ensaio, (mm)

ε deformação

ε_{adq} deformação calculada

ε_l deformação correspondente à tensão limite de elasticidade

ε_θ deformação circunferencial dos anéis tubulares

Γ função gama

θ_w parâmetro de escala da distribuição de Weibull, (μm)

ρ_f massa específica da fibra de vidro, (2,56 Mg/m^3)

ρ_p massa específica do polipropileno, (0,905 Mg/m^3)

σ tensão normal, (MPa)

σ_o tensão residual, (MPa)

σ_{rot} tensão de rotura, (MPa)

σ_θ tensão circunferencial, (MPa)

σ^2 variância de uma função de distribuição

$\sigma_{1\%}$ tensão para 1% de deformação, (MPa)

σ_1 tensão desenvolvida na camada segundo a direcção 1, (MPa)

τ_r resistência ao corte interlaminar, (MPa)

REFERÊNCIAS

1. ASM Handbook. 2001. vol. 21 – Composites.

2. The research requirements of the transport sectors to facilitate an increased usage of composite materials. Part I – The composite materials research requirements of the aerospace industry. 2004. EADS Deutshland GmbH.

3. The research requirements of the transport sectors to facilitate an increased usage of composite materials. Part I – The composite materials research requirements of the automotive industry. 2004. Centro Ricerche Fiat.

4. Plastics Engineering Europe. Vol. 1, No 2. 2003.

5. J. F. Silva.Tese de Doutoramento "Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica: Fabrico e Transformação por Compressão a Quente e Enrolamento Filamentar". 2005.

6. F. Matthews, A. Marchant and A. Curtis. 1991. Designing Components from Composite Materials. Vol.-I, Imperial College of Science and Technology – Centre for Composite Materials, pp. 1-7.

7. D. Gay. 1991. Materiaux Composites, Hermes, 3eme edition.

8. M. Schwartz. 1984. Composite Materials Handbook. McGraw-Hill.

9. W. V. Titow and B. J. Lanham. 1975. Reinforced Thermoplastics. Applied Science Publishers Ltd.

10. M. F. S. F. de Moura, A. B. de Morais e A. G. Magalhães. 2005. Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico. Publindústria.

11. U.S. Fiber Economic Bureau, APFE, Owens Corning Global Industry Database. 2007.

12. Owens Corning 2005 Global Market Analysis.

13. Reinforced Plastics. February 2003. Elsevier Science Lda.

14. G. Chrétien et D. Hatat. 1986. Initiation aux Plastiques et aux Composites, Technique et documentation.

15. K. Edwards. 1998. 'A Designers Guide to Engineering Polymer Technology'. Materials & Design, 19, pp. 57-67.

16. A. Cervenka. 1998. 'Advantages and Disadvantages of Thermoset and Thermoplastic Matrices for Continuous Fibre Composites'. Mechanics of Composite Materials and Structures. Kluwer Academic Publishers, pp. 289-298.

17. Reinforced Plastics. October 1999. Elsevier Science Lda.

18. P. Antequera, L. Jimenez e A. Miravete. Los Materiales Compuestos de Fibra de Vidrio. 1992. Secretariado de Publicationes, Univ. Zaragoza, Espanha.

19. F. T. Wallenberger, J. C. Watson, and H. Li. Glass Fibers. PPG Industries, Inc. 2001.

20. Advanced Thermal Systems for Materials Processing. Harper International Corporation West Drullard Ave. Lancaster, New York. Disponível em: <http://www.harperintl.com>. Acesso em Jan. 2008.

21. B. Agarwal and L. Broutman. 1990. Analysis and Performance of Fiber Composites, 2nd edition, John Wiley & Sons.

22. R. P. Marques, J. A. Covas. Caracacterísticas de Processmanto de Compostos de PVC-U. 2002.

23. Propriedades Típicas do Policloreto de Vinilo. Disponível em: <http://www.ides.com/generics/PVC/PVC_typical_properties.htm>. Acesso em: Jul. 2008.

24. K. Gleich. 2002. 'New Developments in Long Fiber Reinforced Thermoplastic Composites'. ANTEC'02, 5-9 Maio, S. Francisco, California, USA.

25. R. C. Constable and L. N. Kattas. 2002. 'Long Glass Fiber Composites: Rapid Growth and Change'. ANTEC'02, 5-9 Maio, S. Francisco, California, USA.

26. A. Kelly and C. Zweben. 2000. Comprehensive Composite Materials, Volume 2 - Polymer Matrix Composites. Pergamon.

27. Saint-Gobain-Vetrotex. Processamento por moldação por compressão. Disponível em: <http://www.saint-gobain-vetrotex.com>. Acesso em Jan. 2008.

28. S. T. Peters, W. D. Humphrey and R. F. Foral. Filament Winding Composite Structure Fabrication. SAMPE.

29. S. G. Advani. 1994. Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing. Chapter 14 – Filament Winding, Elsevier Science.

30. H. Wittich and K. Friedrich. 1992. 'Tape-winding of High Performance Thermoplastic Matrix Composites'. Proceedings of ECCM 5, France, pp. 465-470.

31. Saint-Gobain-Vetrotex. Processamento por enrolamento filamentar. Disponível em: <http://www.saint-gobain-vetrotex.com>. Acesso em Jan. 2008.

32. Reinforced Plastics. October 2002. Elsevier Science Lda.

33. F. Haupert and K. Friedrich. 1995. 'Processing-related Consolidation of High Speed Filament-wound Continuous Fibre/Thermoplastic Composite Rings'. Composites Manufacturing, Vol. 6 No. 3-4, pp. 201-204.

34. B. Lauke, A. Schone and K. Friedrich. 1993. 'High Performance Thermoplastic Composites Fabricated by Filament Winding'. International Conference on Advanced Composite Materials, Australia, pp. 883-889.

35. G. J. Sweeney, P. F. Monaghan, M. T. Brogan and S. F. Cassidy. 1995. 'Reduction of Infra-red Heating Cycle Time in Processing of Thermoplastic Composites Using Computer Modelling'. Composites Manufacturing, Vol. 6 No. 3-4, pp. 255-262.

36. Strongwell. Processamento por pultrusão. Disponível em: <http:// http://www.strongwell.com>. Acesso em Jan. 2008.

37. L. E. Janson. 1995. Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal. Borealis.

38. Tuberías de PVC, Manual Técnico, Edição de 2006. AseTube, Aenorediciones.

39. Pipe Wrap, LLC. Soluções de reparação de tubagens. Disponível em: <http://www.piperepair.net>. Acesso em Fev. 2008.

40. N. Isidoro, Análise de Géneros Alimentícios – Métodos Físicos e Químicos, 1959, ed. autor, Lisboa.].

41. L. R. Pope and C. W. Ward. 1998. Manual on Test Sieving Methods. ASTM.

42. S. C. Fonseca. 2001. 'Caracterização de Interfaces em Compósitos de Matriz Termoplástica Reforçada com Fibras de Vidro Longas'. Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Portugal.

43. J. P. Nunes, J. F. Silva, A. T. Marques, N. Crainic and S. Cabral-Fonseca. 2003. 'Production of Powder Coated Towpregs and Composites'. Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 16, pp. 231-248.

44. J. F. Silva, J. P. Nunes, L. Silva, P. J. Novo e A. T. Marques. 2000. 'Máquina para Produção em Contínuo de Mechas de Fibras Pré-impregnadas com Termoplástico em Pó'. Patente Nacional Nº 102.494.

45. J. F. Silva, J. P. Nunes, L. Silva, and A. T. Marques. 2002. 'Equipment to Produce Continuously Powder Coated Thermoplastic Matrix Prepregs (Towpregs)'. Patente Internacional Nº WO 0206027.

46. J. W. Klett. 1991. 'Towpreg Formation for Carbon/Carbon Composites'. Master Thesis, Clemson University, Clemson, U. S. A.

47. J. P. Nunes. 1998. 'A Study of the Processing and Properties of Sheet Moulding Compounds and Unidirectional Carbon Fibre Towpregs'. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho, Portugal.

48. F. Haupert and K. Fredrich. 1994. 'Characterization of the Consolidation and Impregnation Quality of Thermoplastic Filament Wound Composite Rings'. ECCM 6, Hamburg, Germany, pp. 333-341.

49. B. Lauke, K. Schnider and K. Friedrich. 1992. 'Interlaminar Shear Strength Measurement of Thin Composite Rings Fabricated by Filament Winding'. Proceedings of ECCM 5, France, pp. 313-318.

50. J. P. Nunes, J. F. Silva, F. Van Hattum and A. T. Marques. 2004. 'Filament Winding Processing Conditions to Produce Thermoplastic Composites from Towpregs'. Proceedings of ANTEC04, Chicago, USA.

51. J. F. Silva, J. P. Nunes, L. Silva, A. S. Pouzada, e A. T. Marques. 1999. 'Fabrico de TOWPREGS', III Congreso Nacional de Materiales Compuestos, MATCOMP 99, Málaga, Espanha.

52. J. P. Nunes, A. S Pouzada, J. F. Silva, P. J. Novo e A. T. Marques. 2000. 'Development and Applications of Low Cost Thermoplastic Composites from Towpregs'. Lição convidada aos Fabricantes de Carroçarias para Automóveis Holandeses, TUD-TNO, 29 Setembro, Delft, Holanda.

53. J. P. Nunes, J. F. Silva, L. Silva and A. T. Marques. 2000. 'The Development of Dry Coating Process to Produce Glass Reinforced Thermoplastic Matrix Towpregs'. ECCM 9, Brighton, U. K.

54. M. Lootens. 2000. 'Development, Production and Analyse of Towpreg Products'. Relatório para obtenção da Licenciatura em Engenharia Industrial, INEGI-CEMACOM, Porto.

55. J. P. Nunes, F. W. Van Hattum, C. A. Bernardo, J. F. Silva and A. T. Marques. 2004. 'Advances in Thermoplastic Matrix Towpreg Processing'. Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 17, pp. 523-544.

56. N. Crainic, J. F. Silva, P. Vieira, J. P Nunes, e A. T. Marques. 2001. 'The Influence of Processing Parameters in the Production of Glass Reinforced Thermoplastic Matrix Towpregs'. Actas da 10ª Conferência Internacional da Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM), Coimbra, Portugal.

57. J. F Silva. 2002. 'A PCT Application: Equipment to Produce Continuouslly Low-cost Thermoplastic Matrix Prepregs'. Seminário – Growing and Realising the Value of Intellectual Property. – Reitoria da Universidade do Porto.

58. N. Crainic, J F M G Silva, J P L G Nunes, P J P Novo, P A Q S Vieira e A T Marques. 2002. 'The Influence of Processing Parameters in the Production of Glass Reinforced Thermoplastic Matrix Towpregs'. Key Engineering Materials, (CD).

59. J. P. Nunes, J. F. Silva, F. W. Van Hattum and C. A. Bernardo. 2002. 'Composite Engineering Structures from Thermoplastic Matrix Towpregs'. **Keynote**, Polymer Processing Society (PPS), Guimarães, Portugal.

60. J. P. Nunes, J. F. Silva, M. J. Oliveira and A. T. Marques. 2002. 'The Influence of Processing Conditions in the Production of Glass Reinforced Thermoplastic Matrix Towpregs'. ECCM 10, Brugge, Bélgica.

61. A. Z. Bragado. 2003. 'Improving Low-cost Continuous Fibre Thermoplastic Composite by Tailoring Fibre Matriz Adhesion'. Relatório para obtenção da Licenciatura em Engenharia Mecânica, INEGI-CEMACOM, Porto.

ANEXO I

PROPRIEDADES DAS MATÉRIAS-PRIMAS

ANEXO I-1

PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE VIDRO

Fibra de Vidro tipo E de 2400 Tex, refª 305E-TYPE 30 Direct Rovin

(Informação do produto fornecida pelo fabricante Owens Corning)

OWENS CORNING OCV™ Reinforcements

PRODUCT INFORMATION

Single-End Rovings (Type 30®)

OWENS CORNING IS THE PIONEER in both multi and single-End roving and has been making glass fiber roving products for more than 50 years. Owens Corning developed the Single-End Roving process and trademarked Type 30® over 30 years ago. Owens Corning manufactures Single-End Rovings globally with advanced equipment, innovative surface chemistry and a commitment to process control.

The result is a ready supply of products to meet the most exacting performance and cost requirements. Ongoing development work continues to refine the performance of Single-End Rovings with one customer benefit in mind, increased productivity.

PRODUCT FAMILY DESCRIPTION

Single-End Rovings are reinforcement products for filament winding, long-fiber thermoplastics, pultrusion, knitting and weaving applications with polyester (UP), vinylester (VE), epoxy (EP), phenolic (PN), polypropylene (PP), polyamide (PA) resin systems. Single-End Rovings are produced by pulling individual fibers directly from the bushing and winding them onto a roving package ready for shipment. The uniform distribution of a proprietary sizing system ensures an excellent resin-to-glass binding through uniform distribution of the binding agent.

GLOBAL QUALITY

Owens Corning continues to meet ongoing customer demands for higher productivity, higher value products and excellent support.

Single-End Rovings are produced with a global process, which ensures high quality and consistency in all regions of the world while meeting performance and cost requirements. The Owens Corning worldwide technical and marketing network provides our customers with products and services that continue to meet evolving needs.

ADVANTEX® AND SINGLE-END ROVINGS

In recent years, Owens Corning began making Single-End Rovings with the company's Advantex® glass fiber reinforcements.

Advantex® glass fiber reinforcements combine the electrical and mechanical properties of traditional E glass with the acid corrosion resistance of E-CR glass. Advantex® glass fiber reinforcements are compatible with all of the most widely used resin systems. Processability and production characteristics of Advantex® glass fiber reinforcements are comparable to traditional E glass and E-CR glass formulations.



FEATURES	PRODUCT BENEFITS
Superior processing	. Optimized to maximize equipment uptime
Fast wet-out	. Increased productivity
Optimum package and pallet weight	. Better productivity, less storage space, fewer pallet changes
Excellent laminate mechanical properties	. Meets or exceeds physical properties requirements for a broad range of applications
Excellent packaging run out and transfer	. More complete glass utilization and reduced labor costs

OCV Reinforcements

Single-End Rovings (Type 30®)

GLOBAL RANGE FOR THERMOSET RESINS

Product	Region				Resin compatibility				Process			
	NA	LA	EMEA	AP	UP	VE	EP	PN	Fil Winding	Pultrusion	Weaving	Nuffler Filling
111A		●	●	●	●	●	●			●	●	
SE1200	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
SE1500	●	●	●	●			●	●	●	●	●	
366	●			●	●	●	●		●	●		
399	●		●	●	●	●	●			●		
699		●		●				●		●		
SE8400LS	●		●		●	●	●			●		
R25H		●	●	●	●	●	●		●	●		
158B	●	●		●			●	●				
SE2348	●			●			●		●			
SE2350	●			●			●		●			
FW300				●	●				●			
FW35				●					●			
117A			●						●		●	
202			●						●			
ST2070			●	●								●
ST1048			●	●								●
ST2000	●											●

NA : North America, LA : Latin America, EMEA : Europe Middle East Africa, AP : Asia Pacific

PACKAGING

Rovings are available in a single-end internal-pull package. Each pallet weighed about 1 tonne. Pallets are stretch wrapped for load stability. All doffs are wrapped with Tack-Pak® or shrinkable film for protection during transport. Full doffs are available in weights between 20 kg (45 lb.) and 40 kg (88 lb.), and they can be packaged in bulk or Creel-Pak® format.

STORAGE

Unless otherwise specified, it is recommended to store glass fiber products in a cool, dry area. The packaging is not waterproof. Be sure to protect the product from the weather and other sources of water. The glass fiber products must remain in their original packaging material until the point of usage. If these conditions are maintained, the glass fiber product should not undergo significant changes when stored for one year. Beyond one year after delivery, the product might evolve, specifically if stored outside the recommended conditions.

The best storage conditions are :

- Temperatures between 22°C and 23°C
- Humidity between 60% and 65%.

The product should be stored in the workshop, within its original packaging, 48 hours prior to its utilization.



© Jean-Luc Sprang - Studio Pignède (F) - CELTTE - Pierre Papin Installation Eco-Efficace (Vivian Reynolds)

OCV Reinforcements

OWENS CORNING
COMPOSITE MATERIALS, LLC
ONE OWENS CORNING PARKWAY
TOLEDO, OHIO 43659
1.800.GET.PINK™
www.owenscorning.com
www.owenscorning.com/composites
Contact :
SingleEndRovings.ocvamericas@owenscorning.com

OWENS CORNING
FIBERGLAS, SPRL.
166, CHAUSSÉE DE LA HULPE
B-1170 BRUSSELS - BELGIUM
+32.2.674.82.11
Contact :
SingleEndRovings.ocvmea@owenscorning.com

OWENS CORNING - OCV ASIA PACIFIC
SHANGHAI REGIONAL HEADQUARTERS
2F OLIVE LVO MANSION
620 HUA SHAN ROAD
SHANGHAI CHINA 200040
+86.21.62489922
Contact :
SingleEndRovings.ocvap@owenscorning.com

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this publication shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law, safety code or insurance regulation.

Owens Corning reserves the right to modify this document without prior notice. ©2008 Owens Corning.

Single-EndRovings_Range_WW_06-2008_Rev0

Tabela I-1.1 Resultados dos ensaios de tracção de monofilamentos de fibras de vidro.
(retirado de: Susana-Cabral da Fonseca – Tese de Mestrado, Universidade do Minho, 2001)

Nº de fibras testado	Comprimento de referência (mm)	Tensão de rotura à tracção (GPa)	Módulo à tracção (GPa)
43	20	1,7±0,5	62,5±13
48	40	1,4±0,5	62,5±13
42	60	1,3±0,5	62,5±13

ANEXO I-2

POLICLORETO DE VINILO (PVC)

ANEXO I-2.1

PROPRIEDADES DO POLICLORETO DE VINILO (PVC)

Tabela I-2.1 Características do granulado de Policloreto de Vinilo (PVC) com a referência GM 267 (Código 374), fornecidas pelo fabricante CIRES Portugal (Previnil).

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS	**MÉTODOS**	**UNIDADES**	**VALORES MÉDIOS**
Apresentação	-	-	Gránulos
Massa volúmica aparente	02/P.ME/95	g/cm³	0,77
Massa volúmica produto final	02/P.ME/95	g/cm³	1,34
Matérias voláteis	03/P.ME/95	%	0,2
Temperatura de amolecimento VICAT (50N)	ISO R 306	ºC	77
Dureza SHORE D	31/P.ME/95	D	79
Resistência à ruptura em tracção	32/P.ME/95	N/mm²	45
Alongamento à ruptura	32/P.ME/95	%	160
Resistência IZOD (provete entalhado a	25/P.ME/95	J/m	60
23ºC)	ISO R 179	KJ/m²	8
Resistência CHARPY (provete entalhado a	ISO R 178	N/mm²	3200
23ºC)	ASTM D 1434	m³ mm	1,6
Módulo de elasticidade em flexão a 23ºC	ASTM D 1434	24h.bar	8,8
Permeabilidade O2 at 20ºC - 60% R.H.	DIN 53122	g.mm	0,8
CO2 at 20ºC - 60%		m² 24h	

Plastisol de Policloreto de Vinilo (PVC)

(Informação do produto fornecida pelo fabricante CIRES Portugal)



CIRES

VICIR E 1270P

Descrição

VICIR E 1270P é um homopolímero de cloreto de vinilo obtido pelo processo de polimerização em emulsão e destinado à produção de plastisóis e organosóis.

Aplicações

A resina VICIR E 1270P é particularmente indicada para a produção de telas de impermeabilização, em rotomoldação no fabrico de bolas, bóias e brinquedos e na produção de bases de alcatifas.

É ainda indicada a sua utilização na produção de camadas compactas em couro artificial.

Propriedades

Com a resina VICIR E 1270P obtêm-se plastisóis de baixa viscosidade, com um comportamento reológico ligeiramente dilatante, na zona das médias velocidades de corte, o que proporciona uma fácil eliminação das linhas de fluxo que eventualmente ocorram.

O fenómeno usualmente conhecido por plate - out resultante da deposição do plastisol na passagem pelos rolos não se verifica.

Os produtos fabricados apresentam transparência e brilho elevados e baixo índice de absorção de água.

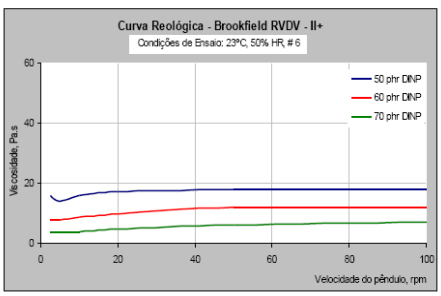
Tabela I-2.2 Propriedades do Plastisol de Policloreto de Vinilo (PVC) com a referência VICIR E1270P, fornecidas pelo fabricante CIRES Portugal.

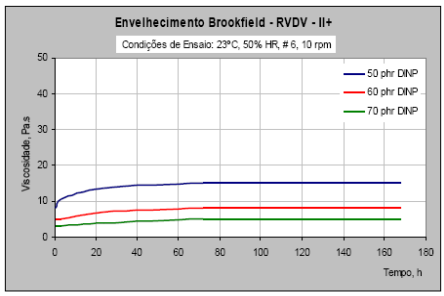
VALORES TÍPICOS

Propriedade	Unidade	Método de Referência	Valor*
Valor K	-	ISO 1628-2	70
Granulometria < 63µm	%	ISO 1624	Min. 99,8
Matérias Voláteis	%	ISO 1269	Máx. 0,3
Comportamento Reológico	-		Ligeiramente dilatante
Gama de Plastificante	-	50 phr ⟷	70 phr

* Os valores indicados tipificam as médias obtidas, no âmbito do controlo de qualidade, a partir de um número elevado de resultados individuais, com uma distribuição estatística dentro das tolerâncias normais de produção.

Propriedades Reológicas Típicas





A viscosidade foi lida 24h após ter sido feita a pasta a 23ºC e 50% de humidade relativa.

ANEXO I-2.2

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

Tabela I-2.2 Resultados médios dos ensaios com peneiros do Policloreto de Vinilo (PVC).

Peneiros: recipiente/230/170/120/100/80/60

Nº do peneiro	**Abertura**	**Diâmetro médio de partícula**	**Massa de partículas retida (Média)**	**Frequência mássica relativa (Média)**	**Frequência mássica acumulada**	**Nº de Partículas**	**Frequência relativa de partículas**	**Frequência acumulada de partículas**
-	µm	µm	g	%	%	(x10³)	%	%
Recipiente	0	31,50	0,16	0,16	0,16	7292,06	14,33	14,33
230	63	76,50	1,51	1,54	1,70	4909,66	9,65	23,98
170	90	107,50	6,06	6,19	7,88	7110,20	13,97	37,95
120	125	137,50	25,89	26,41	34,30	14517,52	28,53	66,48
100	150	165,00	42,95	43,77	78,07	13937,80	27,39	93,87
80	180	215,00	21,04	21,44	99,51	3086,31	6,06	99,93
60	250	275,00	0,48	0,49	100,00	33,74	0,07	100,00

ANEXO I-2.3

PROGRAMA CNC PARA MAQUINAGEM DOS PROVETES PARA O ENSAIO DE TRACÇÃO

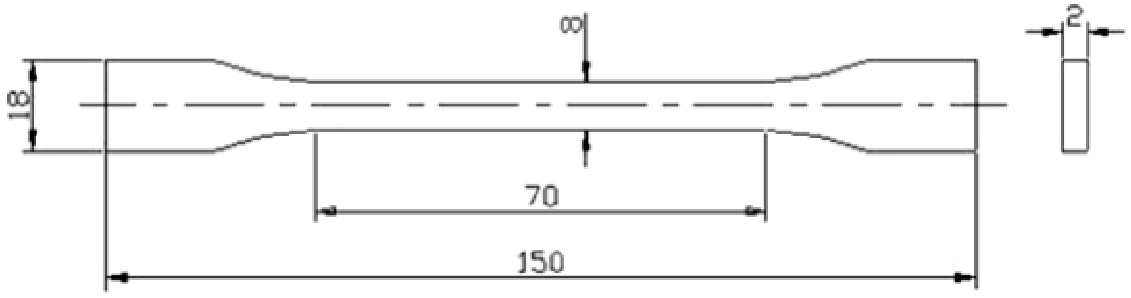


Fig.I-2.3 Desenho do provete para o ensaio de tracção

Programa CNC para maquinagem do Perfil dos provetes para o ensaio de tracção

```
@018%
:0002
G21G40G49G80G17
G91G28Z0
G28X0Y0
G92X-65.850Y136.050Z332.07
T04
G97S1500M03
G94F160
G90G00X-30Y-30
Z10
G01Z-2.5
G90G01G42Y0D13
X-2
X40
G02X54Y5R30F80
G01X126
G02X140Y0R30
G01X180F160
Y18
X140
G02X126Y13R30F80
G01X54
G02X40Y18R30
G01X0F160
Y-25
G01G40X-30Y-30
G91G49G28Z0
G28X0Y0
M30
%
```

Programa CNC para maquinagem do Topo dos provetes para o ensaio de tracção

```
@018%
:0003
G21G40G49G80G17
G91G28Z0
G28X0Y0
G92X-65.850Y136.050Z331.970
T04
G97M03S1600
G94F140
G90G00X-30Y-30
Z10
X24
G01Z1.5
Y20F100
Y9
X155.5
Y-2
Y30
Z0
Y-2
Y9
X24
Y-2
Y30
G91G49G28Z0
G28X0Y0
M30%
```

Tabela I-2.3 Dimensões dos provetes de tracção.

Ref. do Provete	**Espessura** (mm)	**Largura** (mm)	**Secção** (mm^2)
PVC 1	1,95	8,00	15,60
PVC 2	1,80	7,95	14,31
PVC 3	1,95	8,00	15,60
PVC 4	1,65	7,9	13,04
PVC 5	1,60	8,00	12,80

ANEXO I-2.4

ENSAIOS DE TRACÇÃO DO POLICLORETO DE VINILO

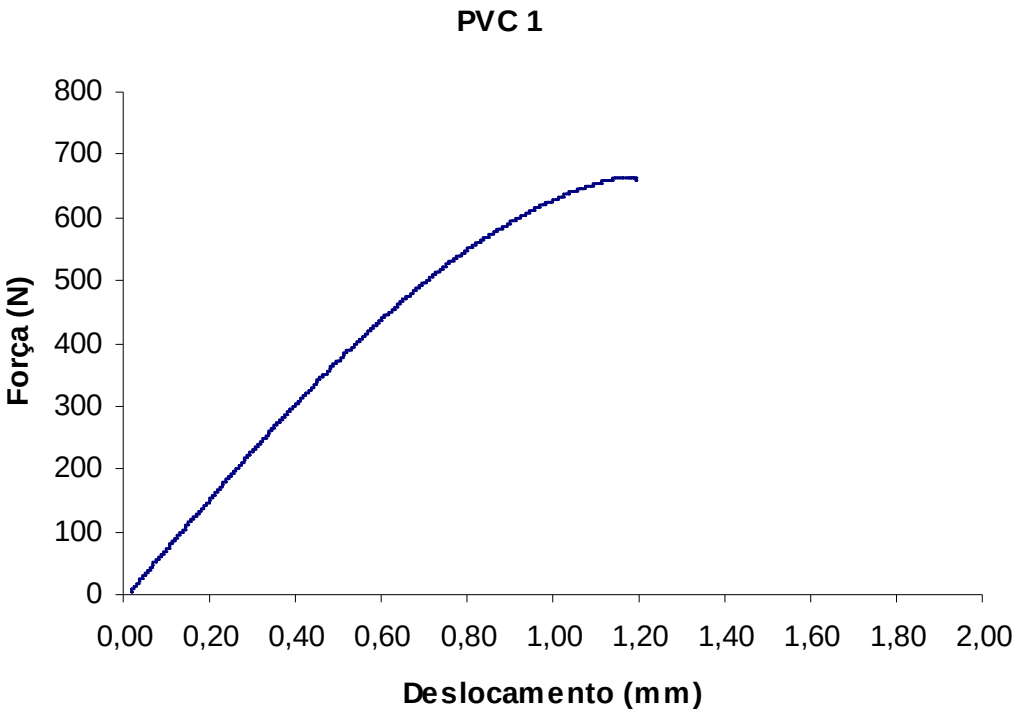


Figura I-2.4.1 Ensaio de tracção do provete PVC 1 com extensómetro.

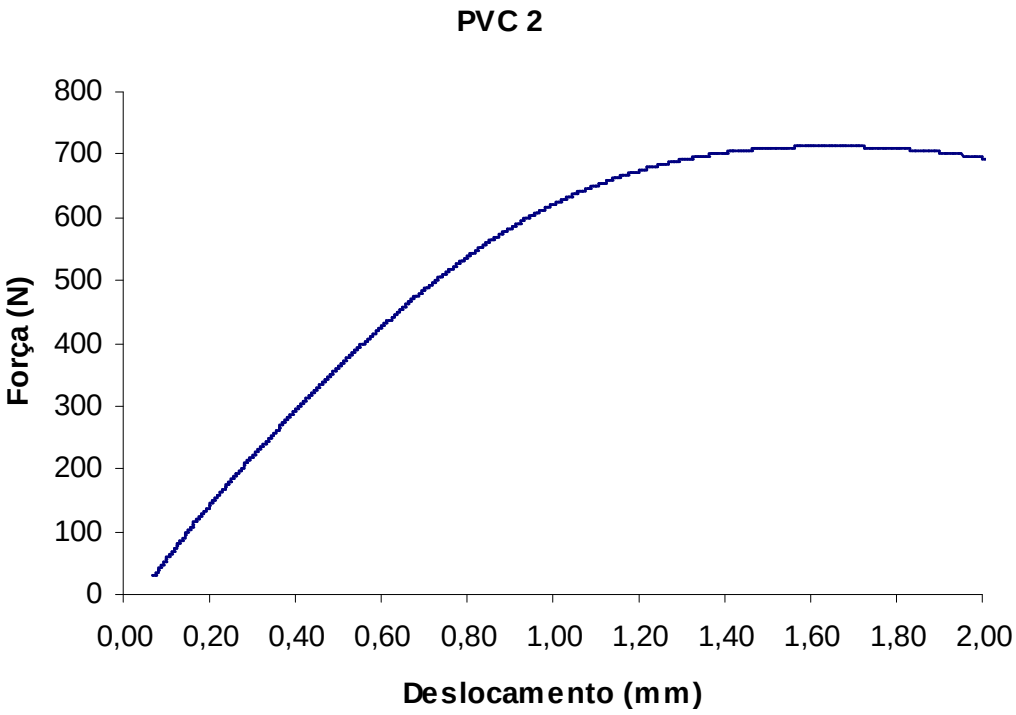


Figura I-2.4.2 Ensaio de tracção do provete PVC 2 com extensómetro.

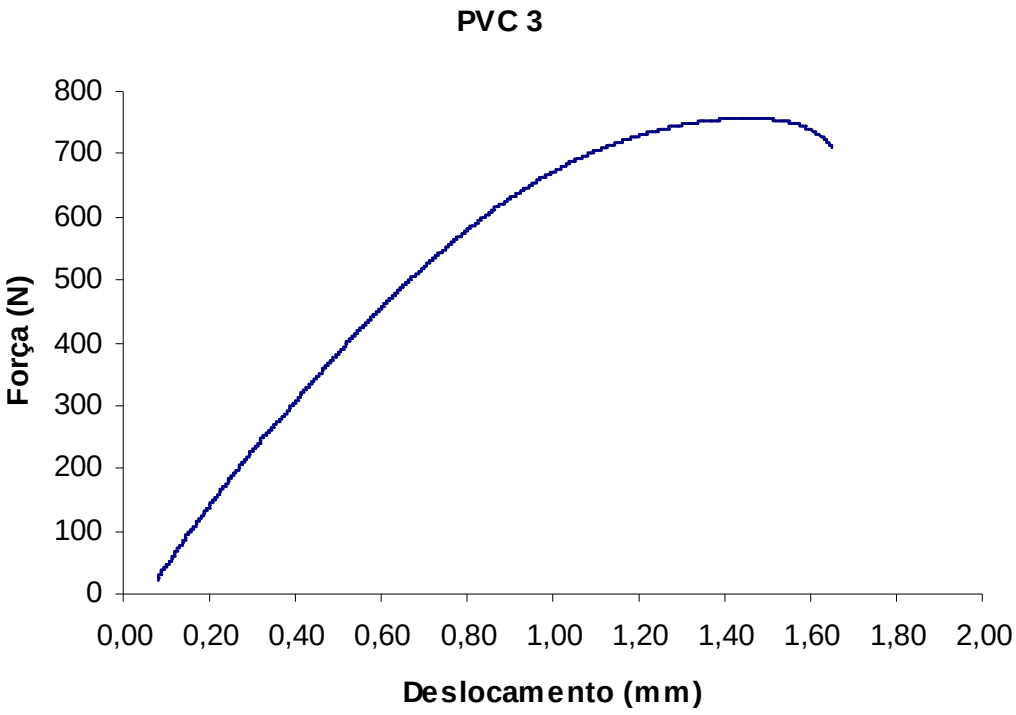


Figura I-2.4.3 Ensaio de tracção do provete PVC 3 com extensómetro.

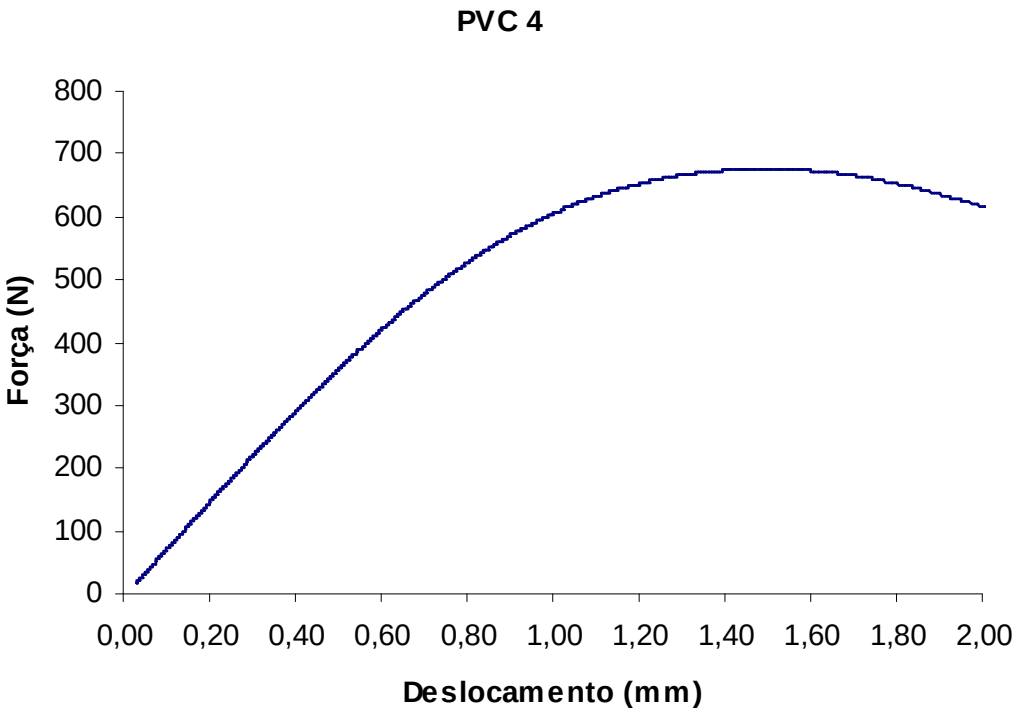


Figura I-2.4.4 Ensaio de tracção do provete PVC 4 com extensómetro.

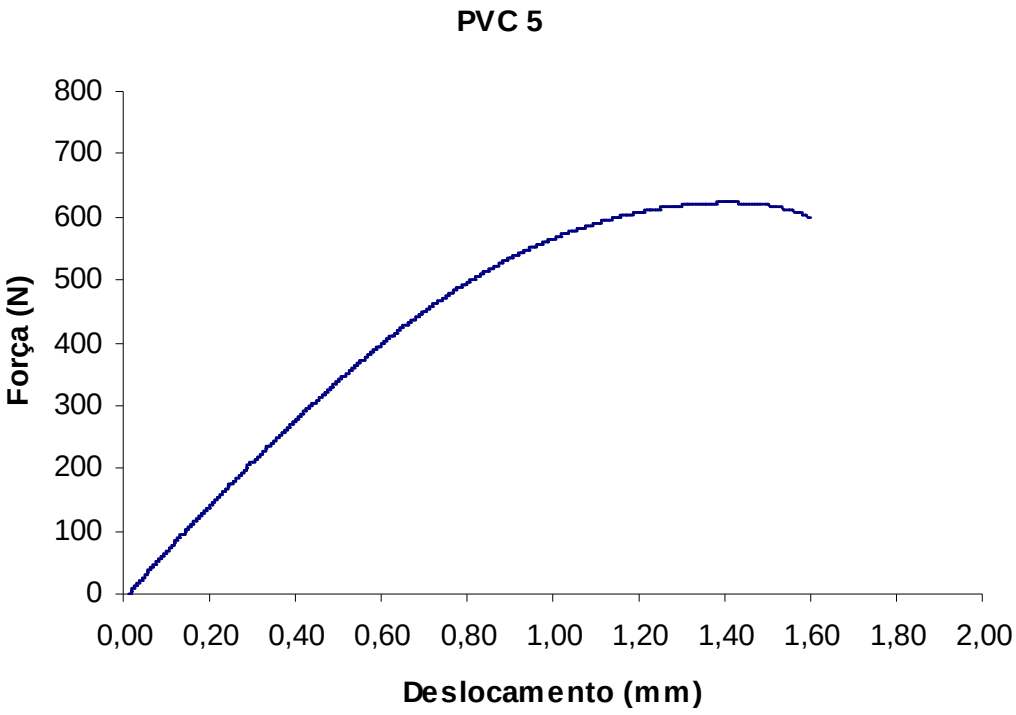


Figura I-2.4.5 Ensaio de tracção do provete PVC 5 com extensómetro.

ANEXO I-2.5

RESULTADOS DO ENSAIO DE TERMOGRAVIMETRIA

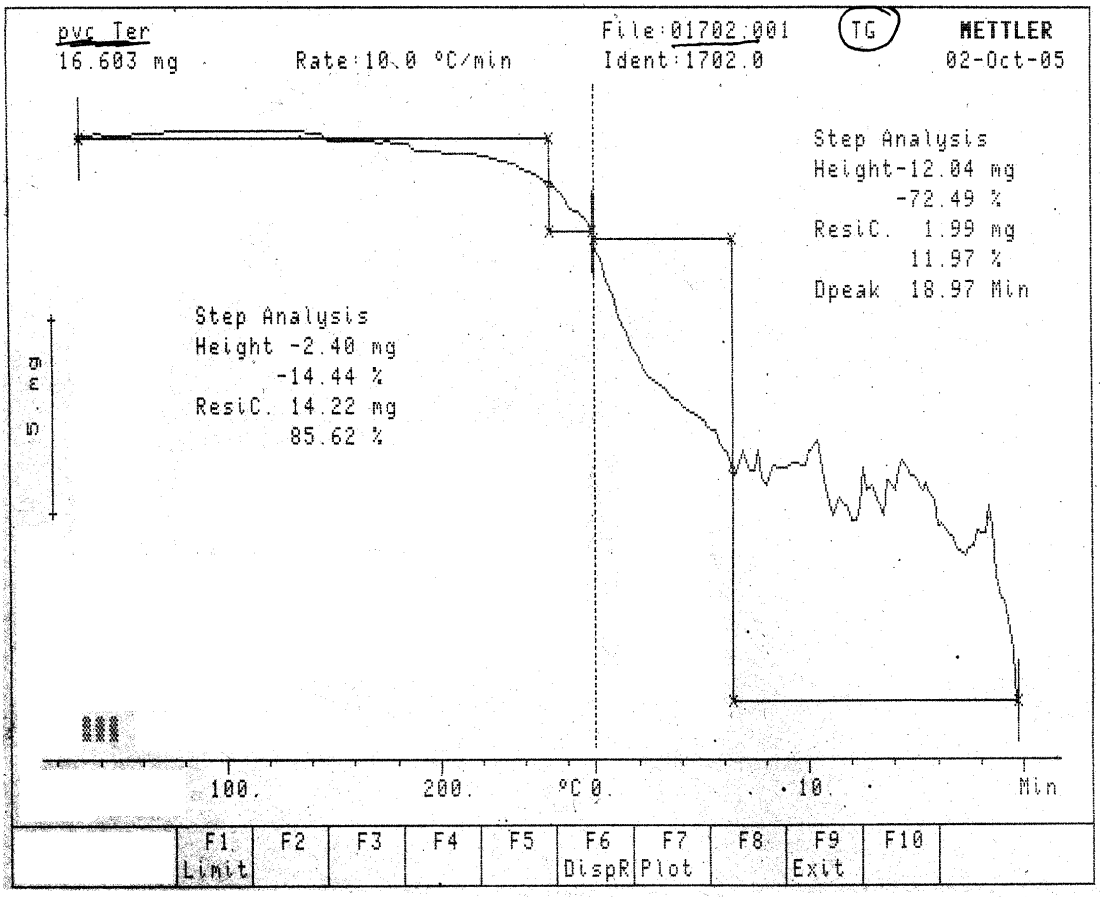


Figura I-2.5.1 Termograma resultante do ensaio de termogravimetria do PVC (em pó) utilizado para o fabrico de *towpregs*.

ANEXO II

PROPRIEDADES DOS PRÉ-IMPREGNADOS DE FV/PVC

Tabela II.1 Determinação do teor ponderal de polímero em *towpregs* de FV/PVC produzidos de acordo com as condições de processamento 1.

Condições de Processamento 1	
Condições de deposição	Sem unidade de humificação
Temperatura do forno (ºc)	250
Velocidade linear da fibra (m/min)	0,5

Nº da amostra	**Massa** g	**Massa linear de FV/PVC** d_{tow} g/m	**Fracção mássica de fibra** W_f %	**Fracção volúmica de fibra** V_f %
1.1	5,43	2,72	88,38	79,55
1.2	5,49	2,75	87,38	77,98
1.3	5,69	2,84	84,41	73,47
1.4	5,41	2,71	88,64	79,98
1.5	5,37	2,69	89,33	81,07
1.6	5,57	2,78	86,25	76,25
1.7	5,24	2,62	91,61	84,82
1.8	5,51	2,76	87,04	77,46
1.9	5,59	2,80	85,81	75,58
1.10	5,36	2,68	89,61	81,53
1.11	5,41	2,70	88,80	80,22
1.12	5,41	2,70	88,73	80,12
1.13	5,42	2,71	88,50	79,74
1.14	5,84	2,92	82,21	70,28
1.15	5,58	2,79	86,07	75,97
Média W_f (%)		**Desvio padrão W_f (%)**		
87,52		**2,32**		

Nota: o comprimento de cada amostra é de 2 m.

Tabela II.2 Determinação do teor ponderal de polímero em *towpregs* de FV/PVC produzidos de acordo com as condições de processamento 2.

Condições de Processamento 2	
Condições de deposição	Sem unidade de humificação
Temperatura do forno (ºc)	280
Velocidade linear da fibra (m/min)	0,5

Nº da amostra	**Massa** g	**Massa linear de FV/PVC** d_{tow} g/m	**Fracção mássica de fibra** W_f %	**Fracção volúmica de fibra** V_f %
2.1	5,48	2,74	87,62	78,36
2.2	5,36	2,68	89,60	81,52
2.3	5,49	2,74	87,44	78,09
2.4	5,40	2,70	88,97	80,49
2.5	5,66	2,83	84,80	74,06
2.6	5,66	2,83	84,75	73,98
2.7	5,54	2,77	86,61	76,80
2.8	5,31	2,66	90,34	82,71
2.9	5,58	2,79	86,07	75,97
2.10	5,74	2,87	83,66	72,38
2.11	5,57	2,78	86,21	76,18
2.12	5,78	2,89	82,98	71,39
2.13	5,43	2,72	88,32	79,47
2.14	5,63	2,81	85,32	74,83
2.15	5,41	2,70	88,75	80,15
2.16	5,28	2,64	90,84	83,53
2.17	5,53	2,76	86,87	77,20
Média W_f (%)		**Desvio padrão W_f (%)**		
87,01		**2,29**		

Nota: o comprimento de cada amostra é de 2 m.

Tabela II.3 Determinação do teor ponderal de polímero em *towpregs* de FV/PVC produzidos de acordo com as condições de processamento 3.

Condições de Processamento 3	
Condições de deposição	Sem unidade de humificação
Temperatura do forno (ºc)	280
Velocidade linear da fibra (m/min)	0,3

Nº da amostra	**Massa** g	**Massa linear de FV/PVC** d_{tow} g/m	**Fracção mássica de fibra** W_f %	**Fracção volúmica de fibra** V_f %
3.1	6,22	3,11	77,11	63,29
3.2	6,15	3,08	78,02	64,49
3.3	5,79	2,90	82,85	71,20
3.4	5,89	2,95	81,47	69,23
3.5	6,12	3,06	78,38	64,98
3.6	5,91	2,95	81,28	68,96
3.7	5,98	2,99	80,32	67,62
3.8	6,53	3,26	73,53	58,71
3.9	6,30	3,15	76,23	62,14
3.10	5,82	2,91	82,52	70,73
3.11	6,17	3,09	77,78	64,18
3.12	5,83	2,91	82,40	70,55
3.13	6,37	3,18	75,39	61,05
3.14	6,25	3,13	76,74	62,80
3.15	5,84	2,92	82,13	70,17
3.16	6,39	3,20	75,08	60,66
3.17	6,01	3,00	79,88	67,01
3.18	5,59	2,80	85,79	75,55
3.19	5,79	2,90	82,84	71,19
Média W_f (%)		**Desvio padrão W_f (%)**		
79,46		**3,31**		

Nota: o comprimento de cada amostra é de 2 m.

Tabela II.4 Determinação do teor ponderal de polímero em *towpregs* de FV/PVC produzidos de acordo com as condições de processamento 4.

Condições de Processamento 4	
Condições de deposição	Com unidade de humificação
Temperatura do forno (ºc)	250
Velocidade linear da fibra (m/min)	0,3

Nº da amostra	**Massa** g	**Massa linear de FV/PVC** d_{tow} g/m	**Fracção mássica de fibra** W_f %	**Fracção volúmica de fibra** V_f %
4.1	5,43	2,72	88,35	79,51
4.2	5,94	2,97	80,75	68,22
4.3	6,09	3,04	78,86	65,62
4.4	5,27	2,64	91,08	83,94
4.5	6,60	3,30	72,72	57,70
4.6	5,22	2,61	91,99	85,46
4.7	6,57	3,28	73,07	58,13
4.8	5,14	2,57	93,35	87,78
4.9	5,03	2,51	95,45	91,47
4.10	5,46	2,73	87,85	78,72
4.11	5,35	2,68	89,69	81,65
4.12	5,82	2,91	82,52	70,72
4.13	5,55	2,78	86,46	76,56
4.14	5,61	2,80	85,58	75,22
4.15	5,52	2,76	87,02	77,43
Média W_f (%)		**Desvio padrão W_f (%)**		
85,65		**6,87**		

Nota: o comprimento de cada amostra é de 2 m.

Tabela II.5 Determinação do teor ponderal de polímero em *towpregs* de FV/PVC produzidos de acordo com as condições de processamento 5.

Condições de Processamento 5	
Condições de deposição	Com unidade de humificação
Temperatura do forno (ºc)	280
Velocidade linear da fibra (m/min)	0,3

Nº da amostra	**Massa** g	**Massa linear de FV/PVC** d_{tow} g/m	**Fracção mássica de fibra** W_f %	**Fracção volúmica de fibra** V_f %
5.1	5,89	2,94	81,55	69,35
5.2	6,39	3,19	75,17	60,77
5.3	6,71	3,35	71,54	56,26
5.4	6,25	3,13	76,76	62,83
5.5	6,04	3,02	79,43	66,39
5.6	6,20	3,10	77,44	63,73
5.7	6,98	3,49	68,74	52,95
5.8	6,35	3,18	75,53	61,24
5.9	6,89	3,45	69,65	54,00
5.10	5,49	2,74	87,50	78,18
5.11	6,40	3,20	75,03	60,60
5.12	6,30	3,15	76,22	62,13
5.13	6,64	3,32	72,31	57,19
5.14	6,92	3,46	69,35	53,66
5.15	6,31	3,15	76,12	61,99
5.16	6,80	3,40	70,60	55,13
5.17	6,44	3,22	74,51	59,93
5.18	6,70	3,35	71,66	56,41
5.19	6,65	3,32	72,20	57,06
5.20	5,90	2,95	81,40	69,13
5.21	6,14	3,07	78,18	64,71
5.22	7,12	3,56	67,46	51,47
5.23	6,71	3,35	71,57	56,30
5.24	6,11	3,05	78,59	65,26
5.25	7,31	3,66	65,63	49,42
5.26	6,89	3,45	69,64	54,00
Média W_f (%)		**Desvio padrão W_f (%)**		
74,38		**5,01**		

Nota: o comprimento de cada amostra é de 2 m.

ANEXO III

COMPRESSÃO A QUENTE

ANEXO III-1

ENSAIOS DE FLEXÃO DAS PLACAS DE COMPÓSITO CONSOLIDADAS A PARTIR DE *TOWPREG*

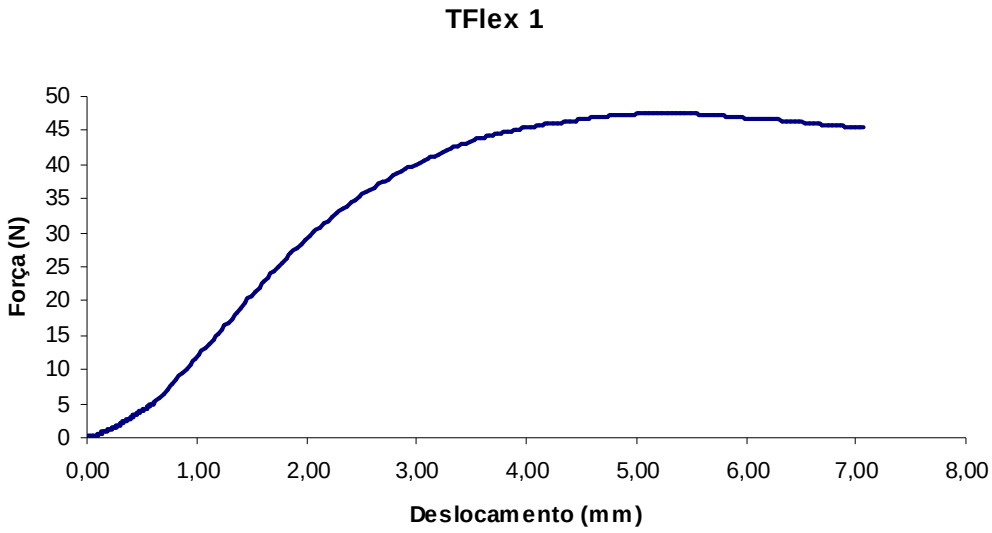


Figura III-1.1 Ensaio de flexão do provete TFlex 1.

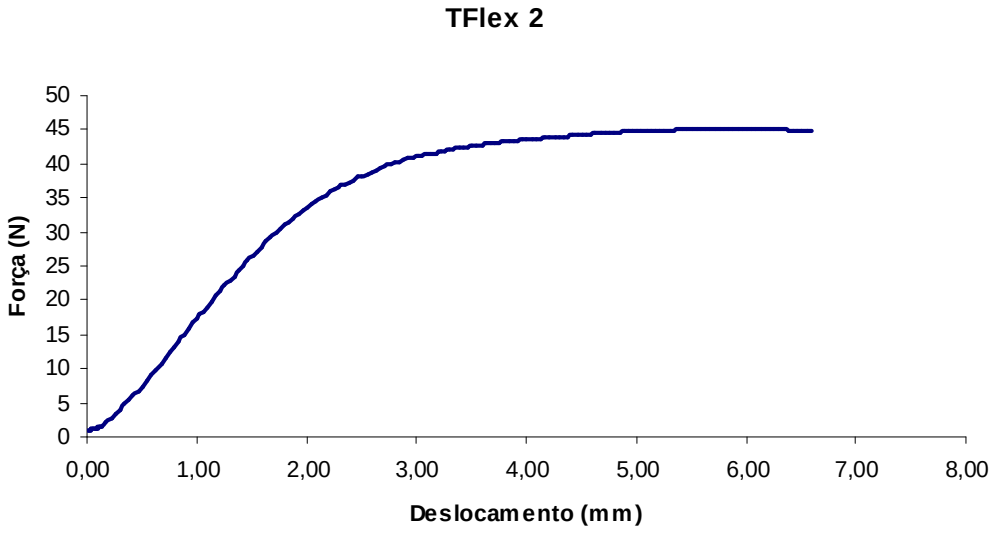


Figura III-1.2 Ensaio de flexão do provete TFlex 2.

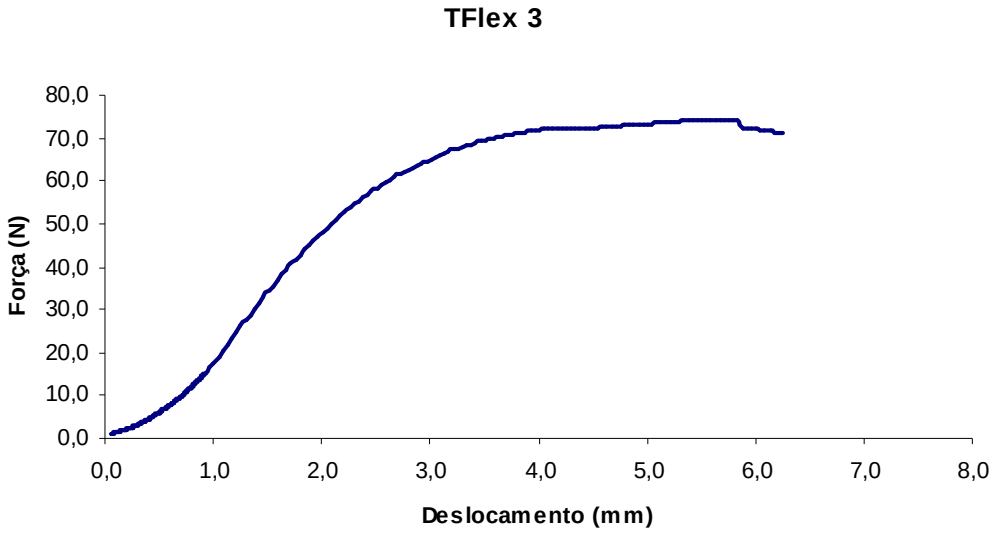


Figura III-1.3 Ensaio de flexão do provete TFlex 3.

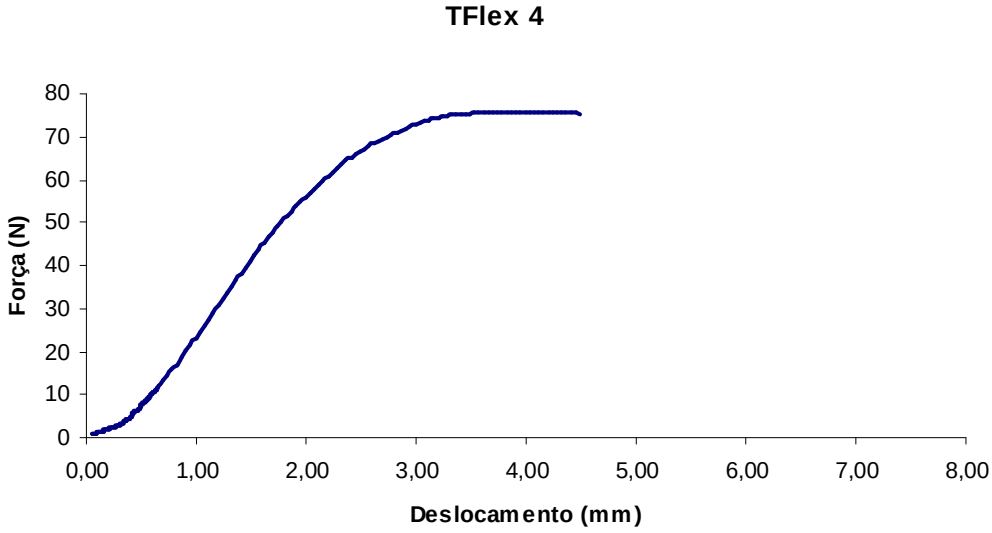


Figura III-1.4 Ensaio de flexão do provete TFlex 4.

Tabela III-1.1 Resultados dos ensaios de flexão de amostras de placas fabricadas a partir de *towpregs* de FV/PVC por compressão a quente.

Ref. do Provete	**Largura**	**Espessura**	**Força Max.**	**Propriedades**	
				Módulo em Flexão	**Tensão de rotura**
	(mm)	(mm)	(N)	(GPa)	(MPa)
TFlex1	22,0	2,8	47,5	4,7	33,1
TFlex2	21,0	2,5	45,2	6,4	41,3
TFlex3	21,2	2,5	74,3	12,0	67,3
TFlex4	22,5	2,5	75,9	12,0	64,8
Média	**21,7**	**2,6**	**60,7**	**8,7**	**51,6**
Des. Pad.	**0,7**	**0,1**	**16,6**	**3,8**	**17,0**

ANEXO III-2

ENSAIOS DE FLEXÃO DAS PLACAS DE COMPÓSITO CONSOLIDADAS A PARTIR DE MANTA DE FIBRAS DE VIDRO IMPREGNADA COM PLASTISOL DE PVC

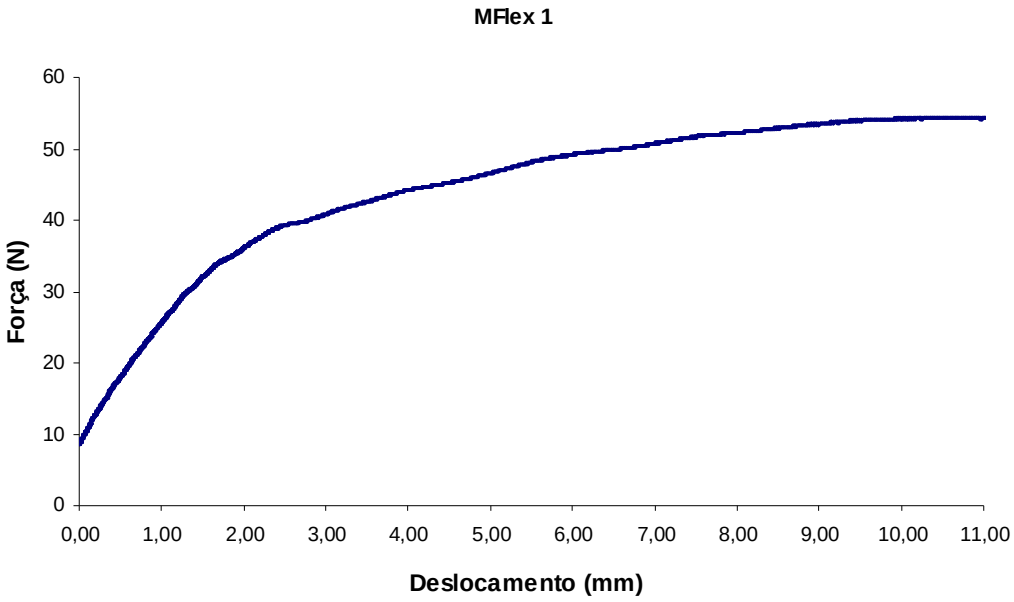


Figura III-2.1 Ensaio de flexão do provete MFlex 1.

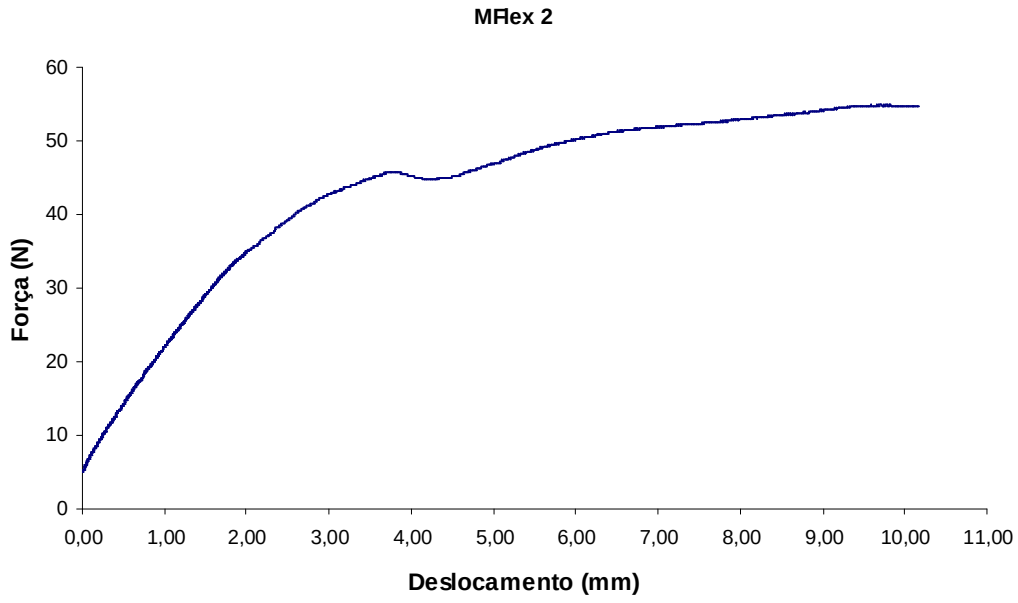


Figura III-2.2 Ensaio de flexão do provete MFlex 2.

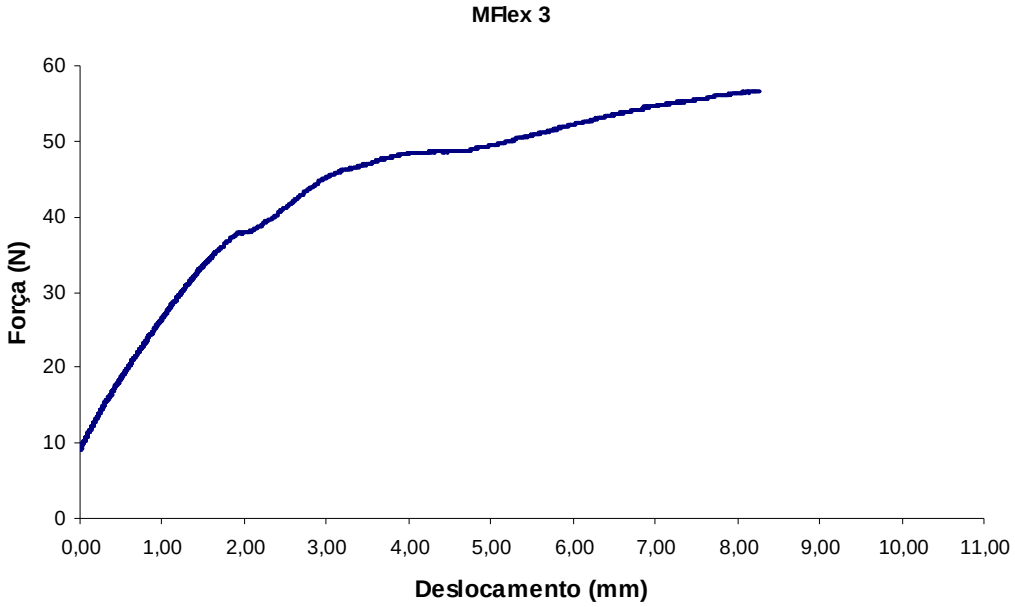


Figura III-2.3 Ensaio de flexão do provete MFlex 3.

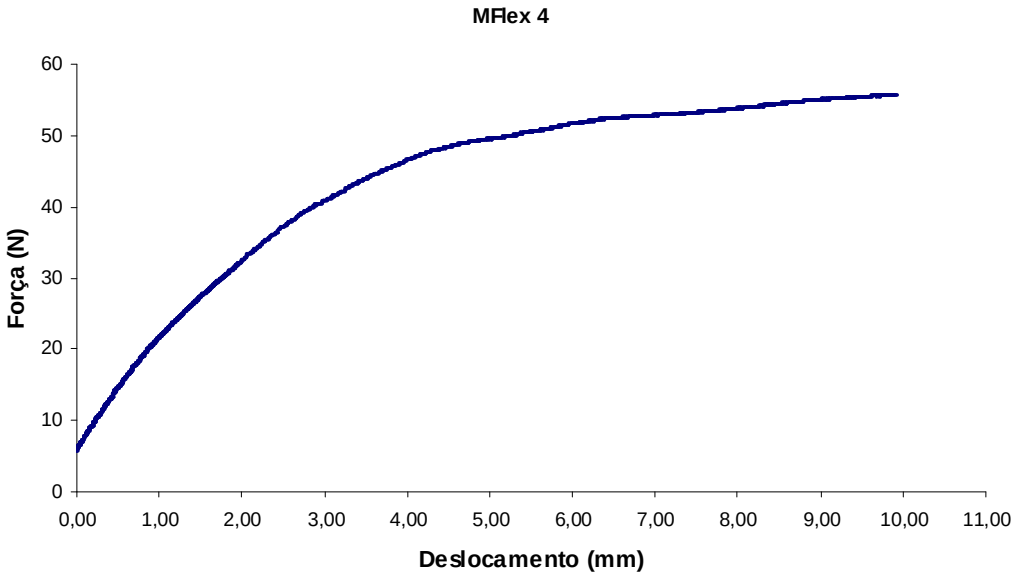


Figura III-2.4 Ensaio de flexão do provete MFlex 4.

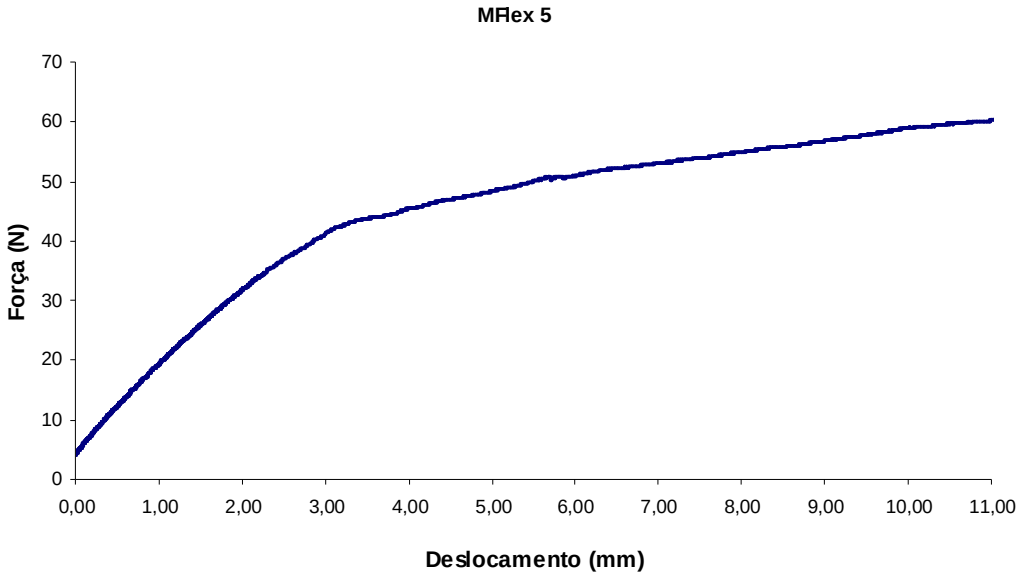


Figura III-2.5 Ensaio de flexão do provete MFlex 5.

Tabela III-2.1 Resultados dos ensaios de flexão de amostras de placas fabricadas a partir de tecido de fibras de vidro e plastisol de PVC por compressão a quente.

Ref. do Provete	**Largura**	**Espessura**	**Força Max.**	**Propriedades**	
				Módulo em Flexão	**Tensão de rotura**
	(mm)	(mm)	(N)	(GPa)	(MPa)
MFlex1	21,4	4,0	56,6	1,3	19,9
MFlex2	20,6	4,0	54,9	1,4	20,0
MFlex3	21,0	4,0	56,6	1,4	20,2
MFlex4	20,8	4,1	55,8	1,2	19,6
MFlex5	20,9	4,0	60,5	1,3	21,8
Média	**41,2**	**4,9**	**56,9**	**1,3**	**20,3**
Desvio Padrão	**0,3**	**0,02**	**2,2**	**0,1**	**0,9**

ANEXO IV

ENROLAMENTO FILAMENTAR

ANEXO IV-1

ENSAIOS DE SPLIT-DISK
EM ANÉIS FABRICADOS POR ENROLAMENTO FILAMENTAR A PARTIR DE FV IMPREGNADA COM PLASTISOL DE PVC

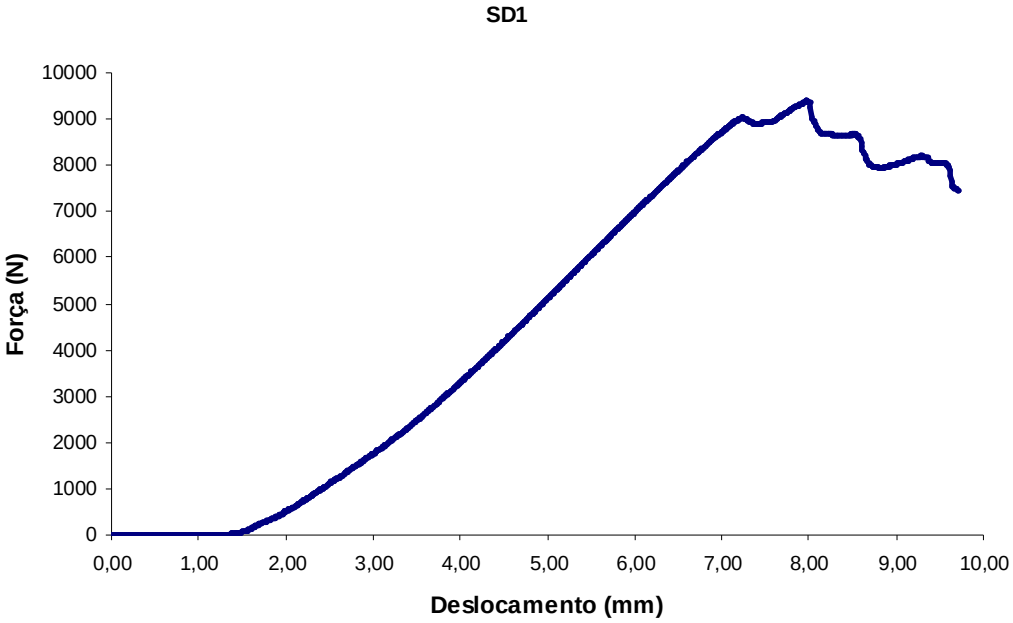


Figura IV-1.1 Ensaio de Split-Disk do anel cilíndrico SD1.

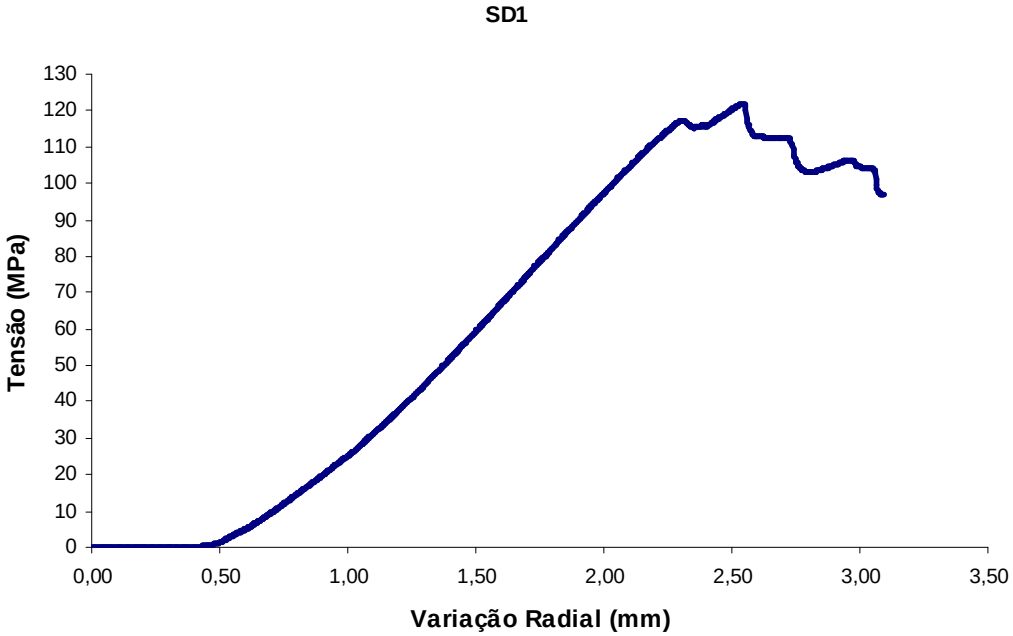


Figura IV-1.2 Variação radial do anel cilíndrico SD1 durante o ensaio de Split-Disk.

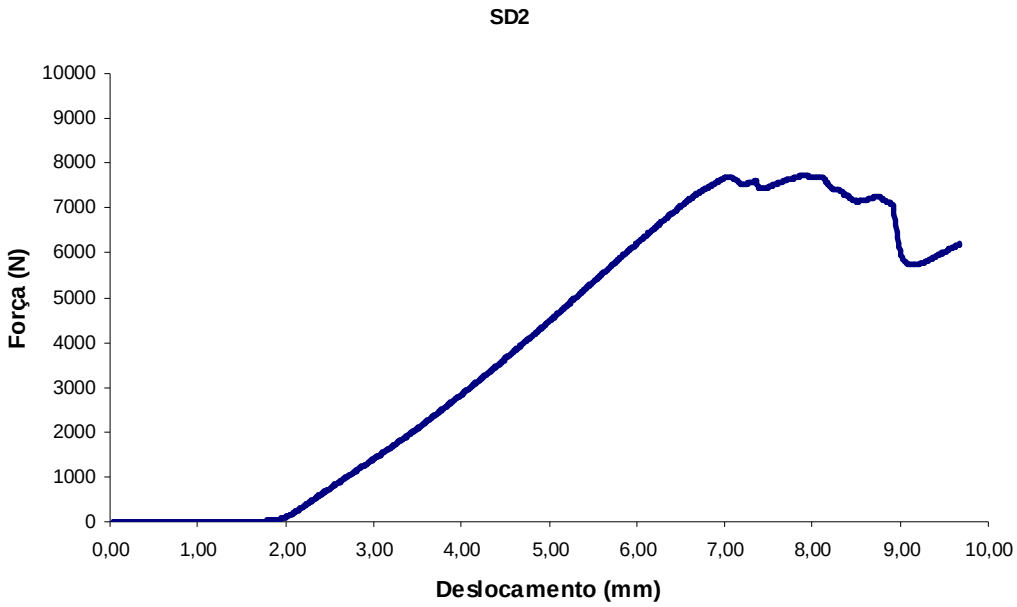


Figura IV-1.3 Ensaio de Split-Disk do anel cilíndrico SD2.

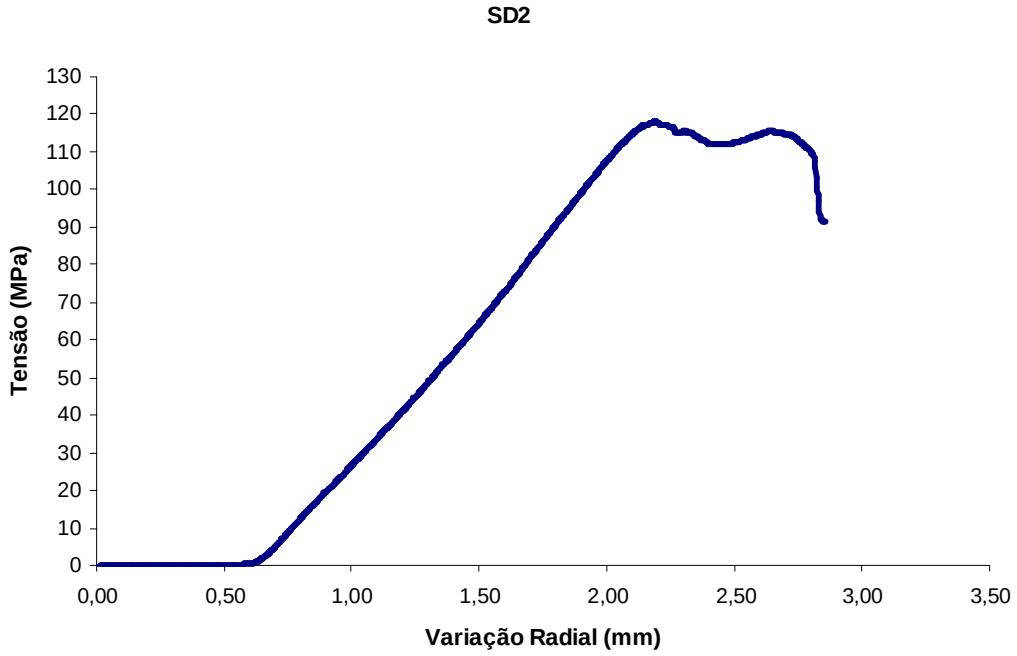


Figura IV-1.4 Variação radial do anel cilíndrico SD2 durante o ensaio de Split-Disk.

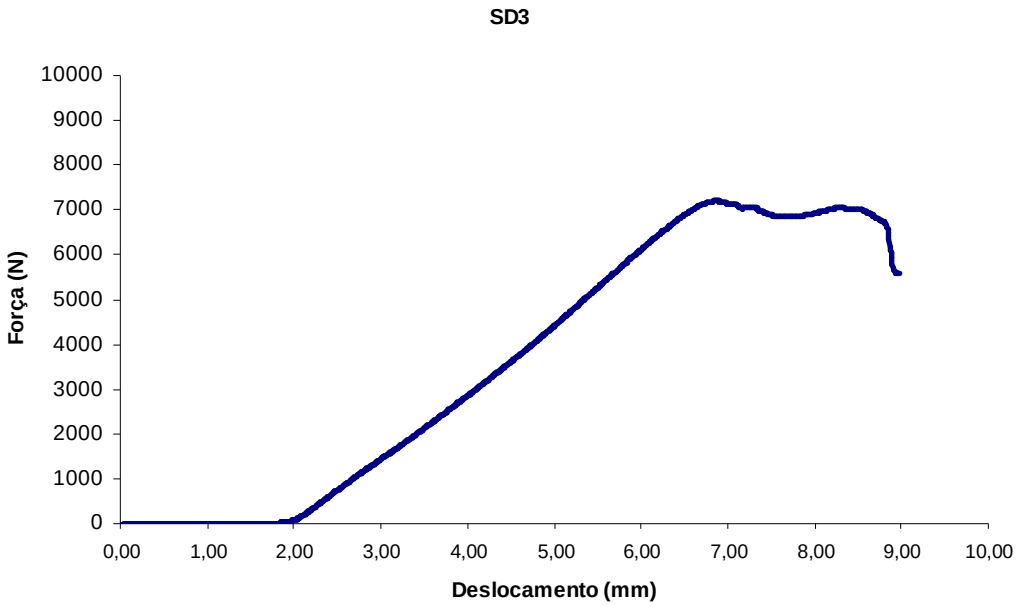


Figura IV-1.5 Ensaio de Split-Disk do anel cilíndrico SD3.

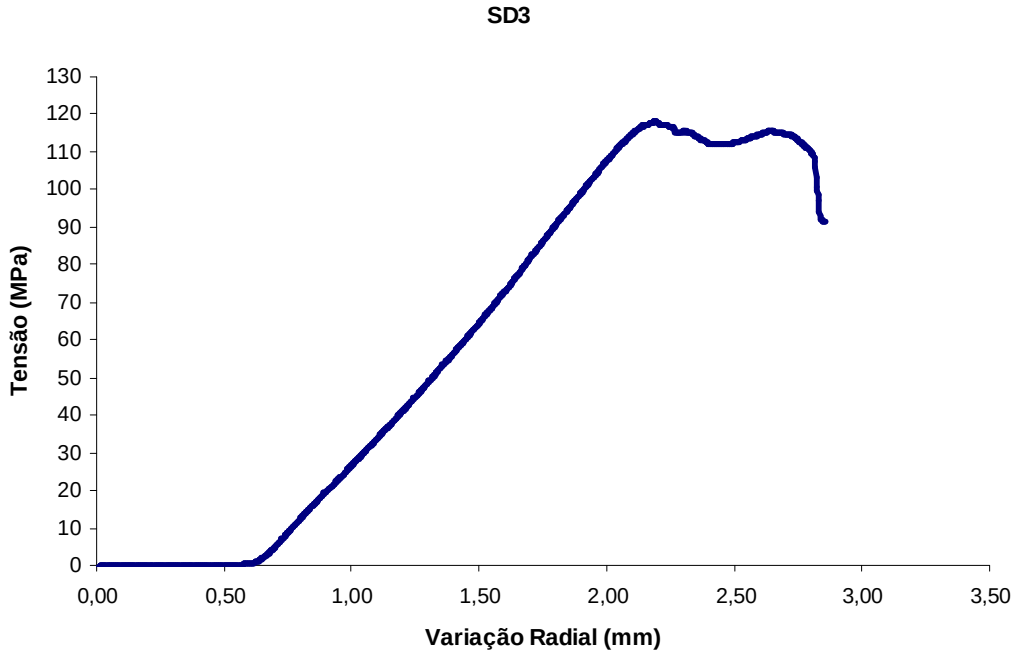


Figura IV-1.6 Variação radial do anel cilíndrico SD3 durante o ensaio de Split-Disk.

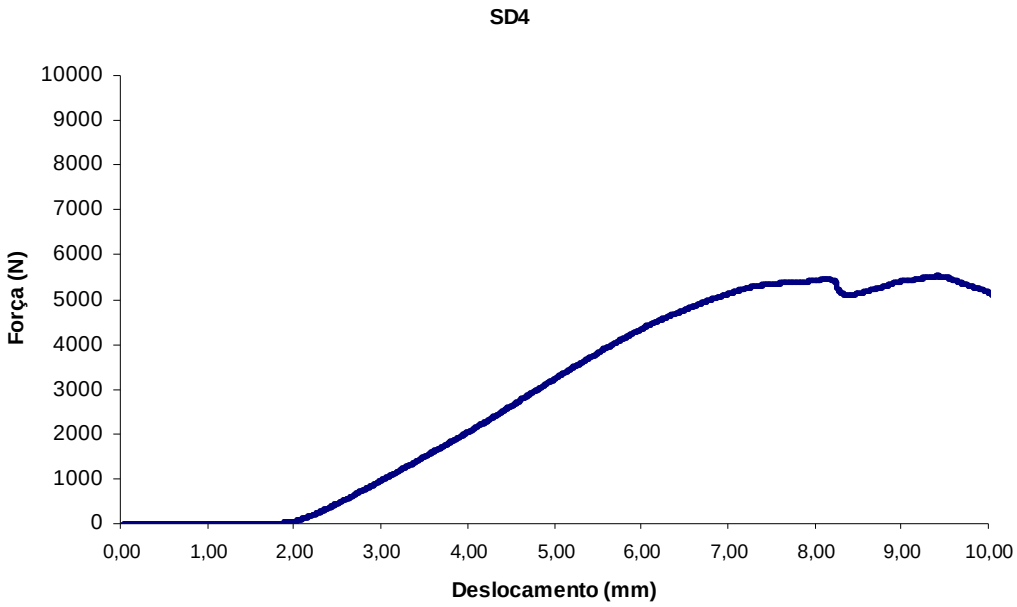


Figura IV-1.7 Ensaio de Split-Disk do anel cilíndrico SD4.

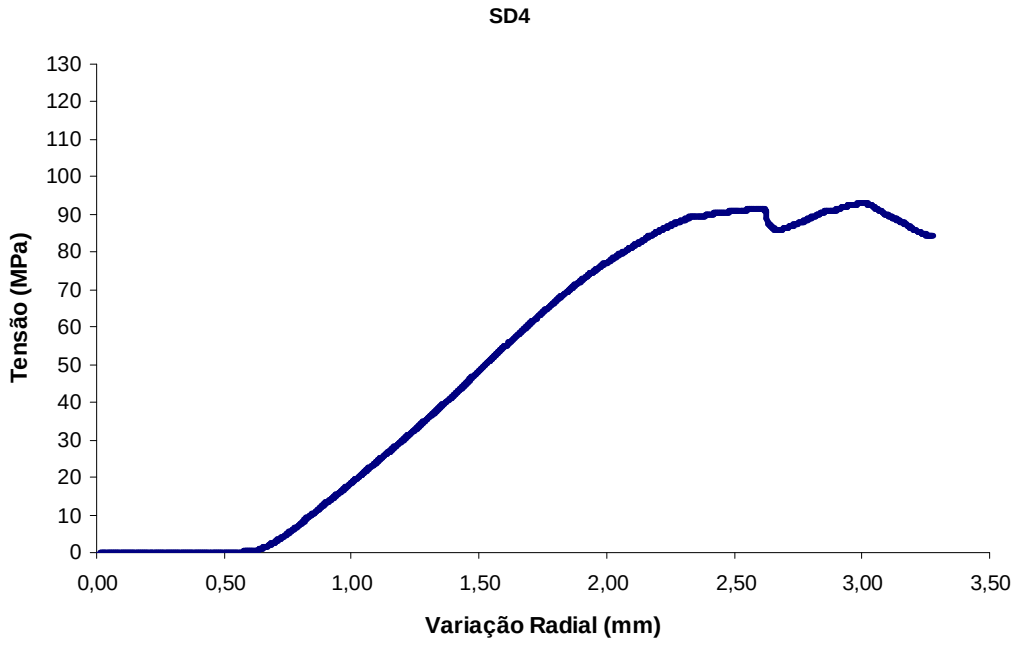


Figura IV-1.8 Variação radial do anel cilíndrico SD4 durante o ensaio de Split-Disk.

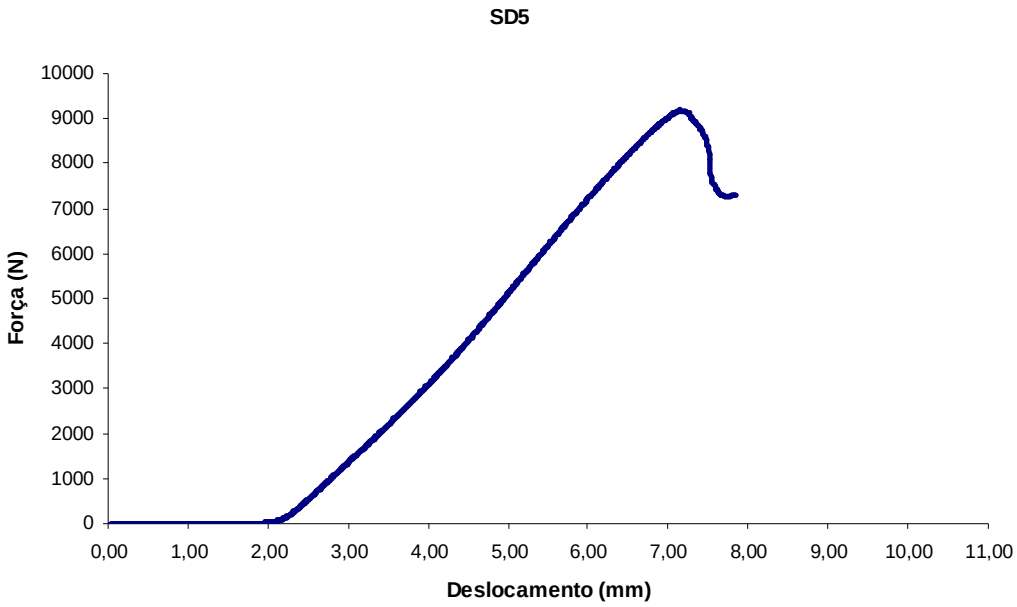


Figura IV-1.9 Ensaio de Split-Disk do anel cilíndrico SD5.

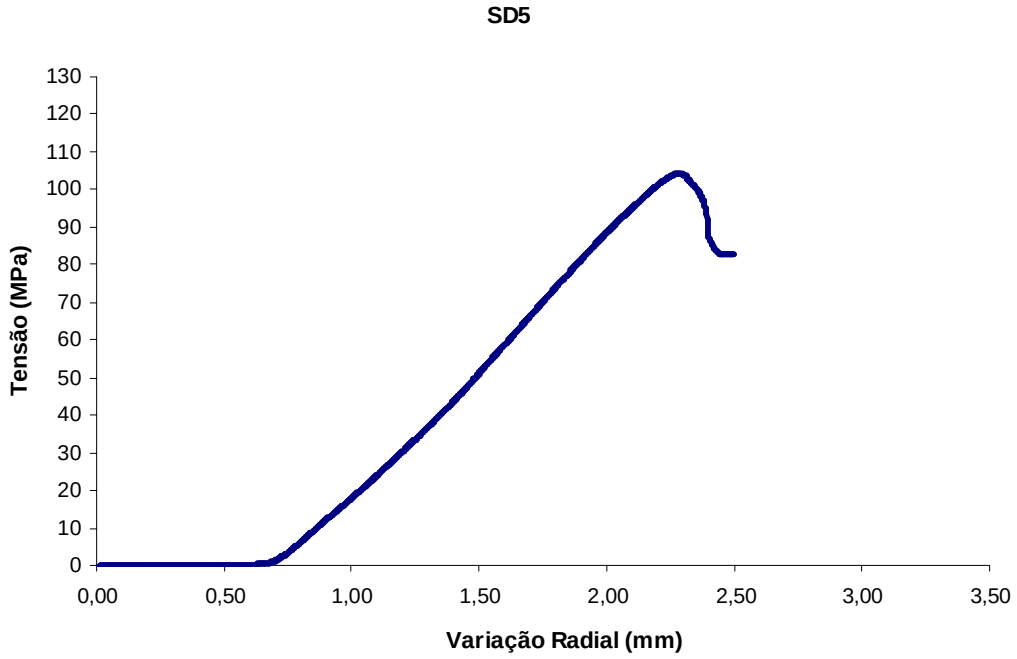


Figura IV-1.10 Variação radial do anel cilíndrico SD5 durante o ensaio de Split-Disk.

Tabela IV-1.1 Resultados dos ensaios de 'split-disk' realizados em anéis fabricados por enrolamento filamentar a partir de FV impregnada com PVC em pasta.

Ref. do Provete	**Largura** (mm)	**Espessura** (mm)	**Carga de rotura** (kN)	**Tensão de rotura** (MPa)	**Raio interior** (mm)	**Raio exterior** (mm)	**Pressão de rebentamento** (MPa)
SD1	7,0	5,5	9,4	121,9	40,0	45,5	16,8
SD2	6,3	5,1	7,7	120,1	40,0	45,1	15,3
SD3	6,5	4,7	7,2	118,2	40,0	44,7	13,9
SD4	5,5	5,4	5,5	92,9	40,0	45,4	12,5
SD5	8,0	5,5	9,2	104,4	40,0	45,5	14,4
Média	**6,7**	**5,2**	**7,8**	**111,5**	**40,0**	**45,2**	**14,6**
Des. Pad.	**0,9**	**0,3**	**1,6**	**12,5**	**-**	**0,3**	**1,6**

ANEXO IV-2

ENSAIOS DE CORTE INTERLAMINAR EM PROVETES FABRICADOS POR ENROLAMENTO FILAMENTAR A PARTIR DE FV IMPREGNADA COM PVC EM PASTA

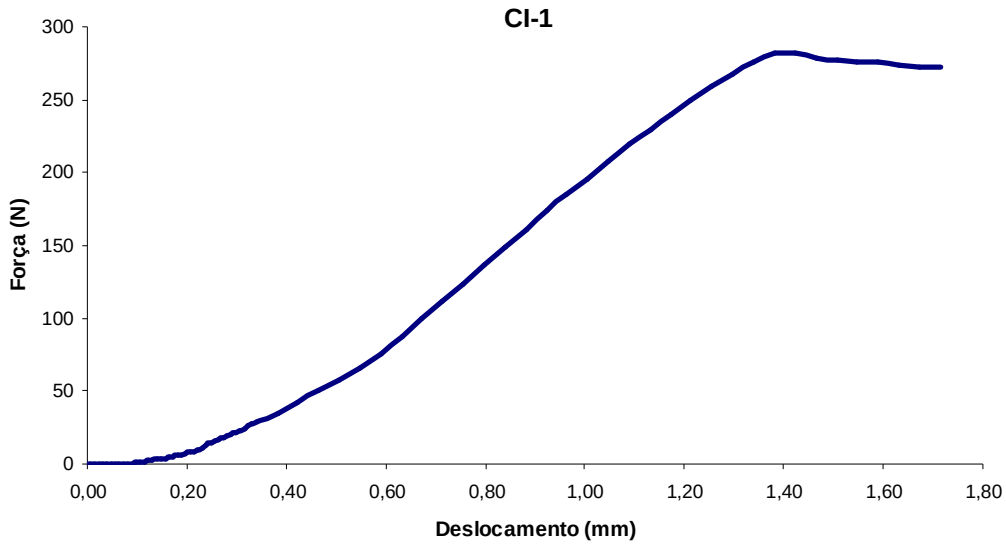


Figura IV-2.1 Ensaio de resistência ao corte interlaminar do provete CI-1.

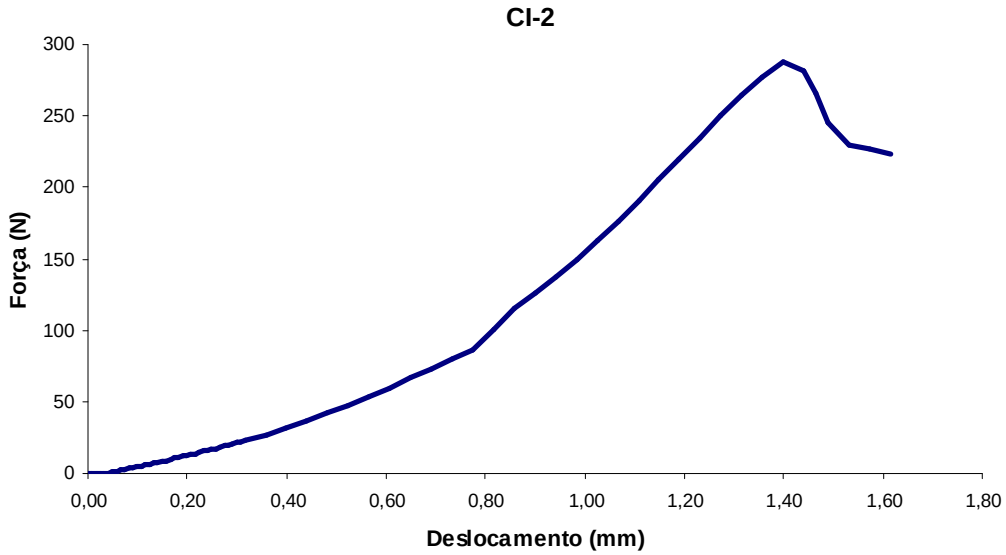


Figura IV-2.2 Ensaio de resistência ao corte interlaminar do provete CI-2.

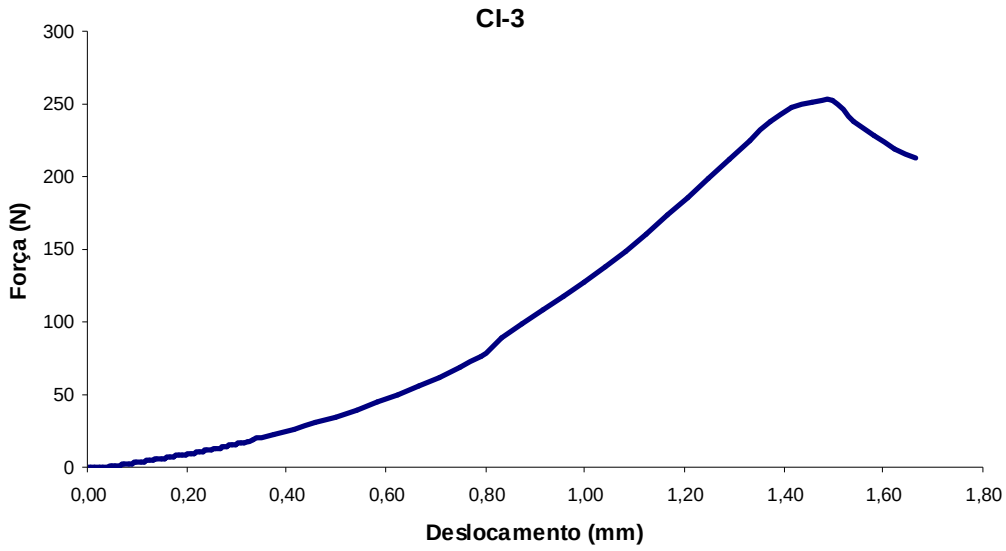


Figura IV-2.3 Ensaio de resistência ao corte interlaminar do provete CI-3.

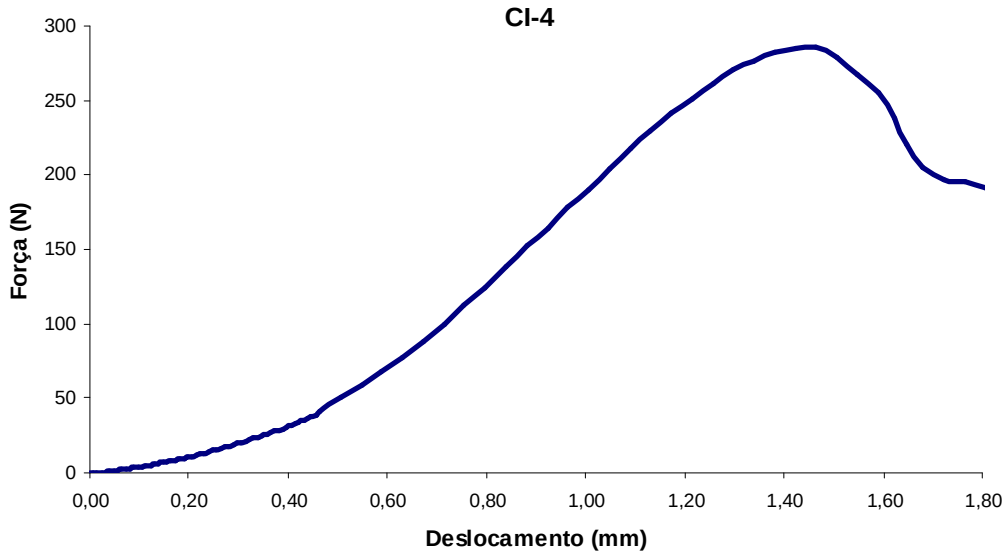


Figura IV-2.4 Ensaio de resistência ao corte interlaminar do provete CI-4.

Tabela IV-2.1 Resultados dos ensaios de resistência ao corte interlaminar de amostras fabricadas por enrolamento filamentar.

Ref. do Provete	**Largura** (mm)	**Altura** (mm)	**Carga de rotura** (N)	**Tensão de rotura ao corte** (MPa)
CI-1	7,3	11,5	281,9	1,68
CI-2	7,4	11,8	287,9	1,65
CI-3	7,3	10,9	252,1	1,58
CI-4	7,4	11,6	285,5	1,66
Média	**7,4**	**11,5**	**276,8**	**1,64**
Des. pad.	**0,1**	**0,4**	**16,7**	**0,04**