SensEFil: Monitorização de Reservatórios Produzidos por Enrolamento Filamentar Usando Sensores Ópticos Embebidos no Compósito



Gilmar Ferreira Pereira

060504060

Relatório de Dissertação do Mestrado Integrado Engenharia Mecânica

Orientador na FEUP: Prof. Dr. António Torres Marques

Orientador no INEGI: Eng.º. Hugo Faria, Dr. Clara Frias



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho 2011

Dissertação escrita segundo o novo acordo ortográfico da língua Portuguesa.

©Gilmar Pereira,2011

Aos meus pais, irmã e namorada.

Resumo

Os reservatórios em material compósito, fabricados por enrolamento filamentar, apresentam-se como sendo a tecnologia mais promissora para armazenamento de fluidos a altas pressões. Atualmente, estes produtos já se estabeleceram nos mercados da baixa e média pressão, antevendo-se um grande crescimento das aplicações nos próximos anos.

No entanto, a falta de modelos de comportamento mecânico de curto e longo prazo consolidados confere alguma incerteza e receio na sua aplicação imediata para altas pressões.

Neste relatório será apresentada, desenvolvida e testada uma metodologia para a monitorização inteligente deste tipo de reservatórios, tal permitirá o acesso em tempo real ao estado de deformação/tensão dos reservatórios, assim como o estudo e caracterização do comportamento mecânico dos mesmos.

Para isso, foi estudada a eficiência dos sensores óticos embebidos no compósito, bem como a forma ideal de implementação, de acordo com diferentes variáveis presentes no processo de enrolamento filamentar, como a pré-tensão na fibra, a compressão radial, diferentes materiais, várias camadas de compósito, etc.

Todo este trabalho foi acompanhado por ensaios experimentais e de validação numérica, para que numa fase final e aplicando todo o conhecimento adquirido culmina-se no projeto de um reservatório com a melhor solução de monitorização possível. Por sua vez, este reservatório com sensores embebidos foi sujeito a um conjunto de ensaios de pressão interna e fadiga, para que fosse estudada a evolução do estado estrutural do mesmo.

Com este trabalho, verificou-se que a utilização de sensores FBG embebidos no material compósito, surge como um dos melhores métodos para o estudo da integridade estrutural do reservatório, devido principalmente à sua presença não ter influência na resistência estrutural. Contudo, foi necessário proceder-se a um conjunto de etapas que permitiram calibrar o sensor, para uma correta obtenção de valores relativamente ao estado estrutural do reservatório.

Abstract

Pressure vessels made of composite material, manufactured by filament winding, are the most promising technology for storage fluids at high pressures. Currently, these products have already established themselves in the market for low and medium pressure, but in the future is predicted a tremendous growth of this applications.

However, the lack of models of mechanical behavior of short and long term gives some uncertainty and fear in its immediate application to high pressure.

In this work will be presented, developed and tested a methodology for intelligent monitoring of pressure vessels, it will allow real time access to the deformation / strain state of pressure vessels, as well as the study and characterization of the mechanical behavior of them.

Will be studied and tested the efficiency of optical sensors embedded in the composite, as well as the ideal method of implementation according to different variables present in the filament winding process, as the pre-tension, compression, different materials, multilayered composite, etc.

All this work was been followed by experimental and numerical validation, so that in a final stage and applying all the knowledge acquired culminates in the design of a vessel with the best solution for monitoring possible. Otherwise, this container with embedded sensors was tested with internal pressure and fatigue, with the aim to study the evolution of the structural condition in the structure.

With this work, concludes that the use of FBG sensors embedded in the composite material, is one of the best methods for studying the structural integrity of the pressure vessel, mainly because of their presence did not affect the structural strength. However, it was necessary to calibrate the sensor for obtaining the correct values for the structural state of the vessel.

Agradecimentos

Agradeço toda a orientação neste projeto ao Eng.º. Hugo Faria e a Dr. Clara Frias, onde demonstraram total disponibilidade na resolução de questões e problemas que fui colocando.

Agradeço ao meu Orientador Professor Doutor António Torres Marques pela disponibilidade e apoio demostrado.

Agradeço ao Instituto de Engenharia e Gestão Industrial (INEGI), em particular à Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas (UMEC) por disponibilizar todos os recursos necessários para a realização deste projeto, bem como ao apoio dado por todos os colegas desta unidade.

Agradeço ao INESC "Porto", pela produção de todos os sensores óticos utilizados neste projeto e por todo o apoio dado, principalmente ao Dr. Orlando Frazão.

Agradeço à Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia pelo apoio financeiro ao projeto PTDC/EME-PME/102806/2008.

Finalmente quero prestar o especial agradecimento, aos meus pais, irmã e namorada, que foram aqueles que mais me apoiaram nesta etapa do meu percurso académico, e aos quais fui obter a motivação necessária para a realização de todo este trabalho.

Índice

Resumo ..... *vii*

Abstract ..... *ix*

Agradecimentos ..... *xi*

Índice ..... *xiii*

Lista de Figuras ..... *xvii*

Lista de Tabelas ..... *xix*

Abreviaturas, Acrónimos e Sinónimos ..... *xxi*

Capítulo 1 ..... *1*

1.1. Enquadramento e Motivação **1**

1.1.1. Objetivos da monitorização 2

1.1.2. Materiais compósitos monitorizados/inteligentes 3

1.1.3. Monitorização e inspeção não destrutiva 4

1.1.4. Embebimento de sensores 4

Capítulo 2 ..... *5*

2.1. Materiais Compósitos **5**

2.1.1. Função da fibra e da matriz 7

2.1.2. Características especiais dos compósitos: 8

2.2.3. Aplicações de compósitos e seus mercados 10

2.2.4. Desvantagens e barreiras nos mercados dos compósitos 14

2.2. Reforço **14**

2.2.1. Fibra de vidro 14

2.2.2. Fibra de carbono 15

2.2.3. Fibras aramídicas 16

2.2.4. Outros tipos de reforço 17

2.2.5. Formas que podem apresentar os reforços 17

2.3. Matrizes **18**

2.3.1. Matrizes termoendurecíveis 18

2.3.2. Resinas Termoplásticas 19

2.4. Semi-Produtos **21**

2.4.1. Pré forma 21

2.4.2. Compostos de moldação 21

2.4.3. Pré impregnados 22

Capítulo 3 ..... *23*

3.1. Enrolamento Filamentar **23**

3.1.1. Enrolamento de compósito termoplástico 24

3.1.1.1. Matéria-prima básica de resina termoplástica 25

3.1.2. Enrolamento de compósito termoendurecível 25

3.2. Modelação do Processo **26**

3.2.1. Enrolamento filamentar de compósitos termoendurecíveis 26

3.2.2. Enrolamento de compósitos termoplásticos 27

3.2.3. *Software* de apoio ao enrolamento filamentar 29

Capítulo 4 ..... *31*

4.1. Sensores e Medição Experimental **31**

4.1.1. Análise experimental de tensões 31

4.1.2. Métodos de análise experimental 32

4.1.3. Métodos experimentais não destrutivos 32

4.1.4. Métodos experimentais para a monitorização de reservatórios 33

4.2. Sensores de Bragg em fibra ótica **36**

4.2.1. Sensores em fibra ótica 36

4.2.2. Redes de Bragg 36

4.2.3. Refletividade da rede de Bragg 38

4.2.3.1. Sensibilidade à temperatura dos sensores de Bragg 39

4.2.3.2. Sensibilidade à tensão mecânica dos sensores de Bragg 40

4.2.3.3. Multifuncionalidade e multiplexagem 41

4.2.4. Tipos de redes de Bragg 41

4.2.5. Produção dos sensores 42

4.2.6. Fibras óticas poliméricas 43

Capítulo 5 ..... *45*

5.1. Calibração e Validação dos sensores **45**

5.1.1. Projeto e Construção de mecanismo para a produção de provetes 46

5.1.1.1. Requisitos e exigências do “set-up” 46

5.1.1.2. Desenho do “set-up” 47

5.1.1.3. Escolha das Molas 49

5.1.1.4. “Set-up” final após produção 50

5.1.2. Calibração das Molas 50

5.1.3. Método de produção de provetes e realização de testes 51

5.1.3.1. Preparação dos sensores óticos com rede de Bragg 51

5.1.3.2. Preparação dos provetes 52

5.1.3.3. Processo de cura 54

5.1.3.4. Desmontagem e preparação dos provetes para ensaio de tração 55

5.1.3.5. Ensaio de tração 56

5.1.3.5.1. Cálculo de deformação do provete 57

5.1.3.5.2. Conversão da variação do comprimento de onda em deformação 60

5.1.4. Plano de trabalho 61

5.2. Resultados e Discussão da Validação e Calibração dos Sensores 62
5.2.1. Força Longitudinal e Pressão radial 62
5.2.2. Acomodamento e forma de solicitação do sensor 66
5.2.3. Relação do valor de deformação teórico/real com a deformação medida pelo FBG em diferentes materiais. 69
5.2.4. Resistência do sensor à deformação 72
5.2.5. Geometria do provete e disposição do sensor 74
5.2.6. Conclusões da validação e calibração dos sensores 76
Capítulo 6 77
6.1. Fabrico de Reservatório com Embebimento de Sensores 77
6.1.1. Simulação numérica 77
6.1.1.1. Resultados 81
6.1.2. Localização dos sensores 82
6.1.3. Produção do reservatório para verificação do programa CNC 84
6.1.4. Reservatório com sensores FBG embebidos no compósito 85
Capítulo 7 89
7.1. Conclusões e Trabalhos Futuros 89
Referências e Bibliografia 91
Anexos 95
Anexo A-Processamento de Materiais Compósitos 95
Anexo B-Desenhos de Definição do "Set-up De Ensaio" 105
Anexo C-Comparação entre metodologias de cálculo de deformação 113
Anexo D-Norma D4018-99- Standard Test Methods for Properties of Continuous Filament Carbon and Graphite Fiber Tows 117
Anexo E-Materiais Utilizados 123
Anexo F-Resultados da Simulação por Elementos Finitos do Reservatório (COPV) 127

Lista de Figuras

Figura 2.1- *Formação de um material compósito.* 6
Figura 2.2- *Propriedades de impacto de diversos materiais de engenharia* 9
Figura 2.3- *Vista explodida da aeronave EMB-170, descrevendo os componentes fabricados em compósito polimérico avançado.* 11
Figura 2.4- *Protótipo de carro híbrido em material compósito.* 11
Figura 2.5- *Bicicleta em material compósito.* 12
Figura 2.6- *Reservatório de alta pressão em material compósito.* 13
Figura 2.7- *Esquema de produção PAN e PITCH* 15
Figura 2.8- *Estrutura química do Kevlar* 16
Figura 2.9- *Fabrico de pré-forma* 21
Figura 2.10- *Produção de fita pré-impregnada unidirecional* 22
Figura 3.1- *Demonstração da operação de enrolamento filamentar* 23
Figura 3.2- *Esquema do enrolamento de fita termoplástica* 24
Figura 3.3- *Condições limite para o processo de enrolamento filamentar.* 26
Figura 3.4- *Diagrama esquemático de um processo de enrolamento de fita* 27
Figura 3.5- *Condições térmicas durante um processo de enrolamento* 28
Figura 3.6- *Software "CADwind"* 29
Figura 4.1- *Exemplo de corrente de EDDY.* 33
Figura 4.2- *Condutividade elétrica de material compósito.* 34
Figura 4.3- *a) Ilustração geométrica representativa de uma rede de Bragg b) ilustração geométrica de uma fibra de período longo* 37
Figura 4.4- *Representação esquemática de uma rede de Bragg em fibra ótica.* 38
Figura 4.5 *Sensibilidade à temperatura dos sensores de Bragg* 39
Figura 4.6- *Sensibilidade à tensão mecânica da fibra de Bragg [13].* 40
Figura 4.7- *Multifuncionalidade e Multiplexagem.* 41
Figura 4.8- *Fabricação da rede de Bragg* 43
Figura 4.9- *Composição de uma fibra ótica (esquerda) e representação das dimensões de uma fibra ótica polimérica (centro) e uma fibra ótica monomodo (à direita* 44
Figura 5.1- *Processo de enrolamento filamentar.* 46
Figura 5.2- *Set-up de ensaio.* 47
Figura 5.3- *Componente de tração do "Set-up".* 48
Figura 5.4- *Mola WH27-100.* 49
Figura 5.5- *Mola WH22-100.* 49
Figura 5.6- *"Set-up" após produção.* 50
Figura 5.7- *Calibração das molas.* 50
Figura 5.8- *Equipamento de fusão da fibra ótica.* 51
Figura 5.9- *Estrutura do provete.* 52

Figura 5.10- *Embebimento de sensor ótico no compósito.*.....52
Figura 5.11- *Aplicação de força longitudinal e compressão axial no provete.*.....53
Figura 5.12- *Colocação do material compósito e do sensor ótico no "set-up".*.....53
Figura 5.13- *Monitorização do processo de cura dos provetes.* 54
Figura 5.14- *Provete após ser retirado do "set-up".* 55
Figura 5.15- *Ensaio de tração com monitorização do sensor ótico.*.....56
Figura 5.16-*Evolução da tensão no processo de cura com diferentes condições de força longitudinal.*.....62
Figura 5.17- *Variação do comprimento de onda durante todo o processo de fabrico dos provetes.*.....63
Figura 5.18- *Ensaio de tração em provetes produzidos com diferentes forças longitudinais.*.....64
Figura 5.19- *Efeito da Birrefringência da fibra ótica: (a) sem compressão, (b) compressão* 64
Figura 5.20- *Espetro de reflexão durante uma compressão de 0.5 N/mm^2 num FBG de 10 mm.* 65
Figura 5.21- *Tipos de ensaio de tração realizados aos provetes.* 66
Figura 5.22- *Ensaio de Ciclos para estudo do acomodamento do sensor.* 67
Figura 5.23- *Ensaio de tração em patamar e contínuo até à rotura.*.....68
Figura 5.24- *Resposta do FBG durante um ensaio de tração.* 69
Figura 5.25- *Rácio deformação no ensaio de tração de pré-impregnado de material compósito em fibra de carbono.*.....70
Figura 5.26- *Correção ao fator de sensibilidade do FBG para o pré-impregnado de Fibra de Carbono.*.....71
Figura 5.27- *Rácio deformação no ensaio de tração de pré-impregnado de material compósito em fibra de vidro.*.....72
Figura 5.28- *a) Ensaio de tração do provete TCR-AC2-3; b) Foto do provete após rotura.*.....73
Figura 5.29- *Ensaio de tração do provete Fv-7V-03*.....73
Figura 5.30- *Geometria do provete TCR-ML* 74
Figura 5.31- *Provete TCR-CR* 75
Figura 5.32- E*nsaio de tração do provete TCR-CR* 75
Figura 6.1- *Modelo do reservatório produzido por enrolamento filamentar*.....78
Figura 6.2- *Modelo 3D do reservatório produzido por enrolamento filamentar*.....79
Figura 6.3- *Carregamento do reservatório com pressão interna.*.....80
Figura 6.4- *Critério de Von Misses ao longo do eixo do reservatório*.....81
Figura 6.5- *Esquema de cada fibra multiplexada com sensores de Bragg* 82
Figura 6.6- *Disposição dos sensores no "linner" metálico.* 83
Figura 6.7- *Enrolamento filamentar do reservatório teste.*.....84
Figura 6.8- *Corte transversal do reservatório em material compósito.*.....84
Figura 6.9- *Colocação dos sensores FBG S1 e S2 no mandril metálico.*.....85
Figura 6.10- *Início do enrolamento da camada circular.* 86
Figura 6.11- *Alinhamento do sensor S3 com a camada circular.* 86
Figura 6.12- *Enrolamento da camada helicoidal.*.....87
Figura 6.13- *Colocação do sensor FBG S4 na camada helicoidal.* 87

Lista de Tabelas

Tabela 1- Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça..... 6
Tabela 2- Funções dos diferentes constituintes dos materiais compósitos. 7
Tabela 3- Componentes de Compósito em Aplicações Aeronáuticas..... 10
Tabela 4- Propriedade de alguns tipos de fibra de vidro..... 15
Tabela 5- Propriedades de alguns tipos de fibra de carbono..... 16
Tabela 6- Propriedades típicas de uma resina termoendurecível. 19
Tabela 7- Propriedades Típicas dos Termoplásticos..... 20
Tabela 8- Propriedades e Características de Processamento de Resinas Termoplásticas. 25
Tabela 9- Sensibilidade do sensor em relação a forma de solicitação. 68
Tabela 10 - Propriedades do material das camadas compósitas inseridas no modelo de elementos finitos. 79
Tabela 11- Características do ensaio e dos provetes..... 115

Abreviaturas, Acrónimos e Sinónimos

FBG – "Fiber Bragg Grating", Sensor ótico com rede de Bragg.

Gratting- Local onde é inscrita a rede de Bragg.

COPV- "Composite Overwrapped Pressure Vessel", Reservatório de pressão produzido por enrolamento filamentar.

UV- Ultra Violeta.

2D- Duas dimensões.

σ- Tensão, unidade SI- MPa.

E- Rigidez, unidade SI- GPa.

ν – Coeficiente de Poisson.

T- Temperatura, unidade SI-Kelvin (K).

t- tempo, unidade SI- segundos (s).

r- Distância em relação ao eixo do mandril, milímetros (mm).

R- Raio do mandril, milímetros (mm).

λ- Comprimento de onda, nanómetros (nm).

Λ- Período espacial da rede, nanómetros (nm).

n_{efc}- Índice efetivo do núcleo.

$\Delta\lambda$- Variação do comprimento de onda, nanómetros (nm).

α – Coeficiente de expansão térmica, K^{-1}.

ξ – Coeficiente termo-ótico, K^{-1}.

pe – Constante fotoelástica.

ε – Deformação.

ΔL_{max}- Extensão máxima, milímetros (mm).

F_{max} – Força máxima, unidade Si- N (Newton).

D_e – Diâmetro exterior, milímetros (mm).

K – Constante de rigidez da mola, N/mm.

V_f – Fração volúmica de fibra.

A_s – Secção resistente, mm^2.

MUL- Peso de fibra por metro, (g/m).

ρ_f – Densidade da fibra, (g/cm^3).

G_ε – Fator de sensibilidade à deformação, nm/με.

r- Rácio de deformação real/ deformação medida por FBG.

T_c - Temperatura na superfície exterior do cilindro compósito, Kelvin (K).

T_m - Temperatura na superfície interior do mandril, Kelvin (K).

T_L - Temperatura limite esquerdo no cilindro compósito, Kelvin (K).

T_R - Temperatura limite direita no cilindro compósito, Kelvin (K).

R_{mi} - Raio interior do mandril, milímetros (mm).

R_{mo} - Raio exterior do mandril, milímetros (mm).

Capítulo 1

1.1. Enquadramento e Motivação

O uso de materiais compósitos, como reservatórios de combustível e gás, tanto industrialmente, como em aplicações aeroespaciais, está a aumentar devido às excelentes características mecânicas conseguidas por este material, tal como a resistência específica, o baixo peso ou a resistência a corrosão.

A competição no mercado industrial tem forçado os fabricantes/projetistas de estruturas em materiais compósitos, a procurarem novos métodos de reduzir custos e aumentar os lucros. Para um produto ser capaz de liderar o mercado, a solução poderá passar pela inserção de metodologias de monitorização e previsão de dano, como também pelo aumento da eficiência dos processos de fabrico.

Existe a necessidade da utilização de reservatórios monitorizados, por motivos de segurança, de análise e previsão do tempo de vida e futura substituição do reservatório. Tal, deve-se ao nível de confiança de uma estrutura em material compósito é menor que em aço, devido ao mecanismo de fratura e fadiga ser mais complexo.

Por outro lado, existem fenómenos durante o processo do enrolamento filamentar, que ainda estão relativamente pouco estudados e descritos, que irão criar variações nas características das diferentes camadas de compósito do reservatório, facto muito dificilmente previsto ou calculado.

Surge então a necessidade de criar um reservatório monitorizado com sensores capazes de detetar e localizar falhas, bem como prever futuros problemas na sua estrutura. Tornando um reservatório em material compósito tão seguro como o seu congénere em metal.

A monitorização em tempo real desde o processo de fabrico de uma estrutura, e não só durante o seu funcionamento, permitirá otimizar os processos de fabrico, ter-se há um maior conhecimento sobre os fenómenos e tensões geradas pelo mesmo, bem como a deteção de zonas onde será requerida uma maior atenção.

O comportamento a longo prazo das estruturas compósitas pode ser previsto através de modelos numéricos ou experimentais. No entanto, assegurar a sua integridade durante todo o seu tempo de vida torna-se necessário, requerendo técnicas de avaliação não destrutivas. Logo, neste trabalho é proposto o acoplamento de um sistema de sensores de baixo custo para que seja possível registar a integridade estrutural do reservatório, a cada ciclo de trabalho ou a cada atividade de manutenção.

1.1.1. Objetivos da monitorização

Este trabalho tem como principal objetivo a conceção de um reservatório, em material compósito produzido por enrolamento filamentar, em que se monitoriza o seu estado estrutural. Para isso, foram estudadas, desenvolvidas e implementadas soluções com a utilização de fibra ótica com redes de Bragg embebida no compósito. Foi dada ênfase ao conhecimento da interação entre a fibra ótica e o compósito, para que seja possível otimizar o embebimento no processo de fabrico com diferentes materiais.

Em termos de objetivos, podemos dividir deste trabalho de em duas componentes:

- Validação e calibração de sensores de fibra ótica.
- Fabrico de protótipos (reservatórios inteligentes) com embebimento de Sensores.

Numa primeira fase, foi feita a calibração de sensores para a verificação da sua exatidão e eficiência. Para isso foi realizado na primeira fase de monitorização:

- Conceção de um mecanismo que irá simular as condições no compósito do processo de enrolamento filamentar.
- Teste e calibração do sensor de fibra ótica em diferentes materiais compósitos e com diferentes condições de tração e/ou compressão.
- Estudo da variação das características durante o processo de cura.
- Estudo da perda de sinal, devido a compressão da fibra ótica.

Após a primeira etapa, segue-se a monitorização do reservatório, primeiro passo para se criar uma estrutura inteligente. Foi necessário definir todas as grandezas a medir experimentalmente, para que seja possível aferir o estado de tensão/deformação do reservatório, bem como possíveis falhas e sua localização.

Segunda fase do projeto:

- Simulação do processo de enrolamento filamentar, através de *software* de Elementos finitos.
- Análise de zonas críticas.
- Determinação da melhor estratégia de sensorização, bem como o número e tipo ideal de sensores.
- Estudo do modo de implementação dos sensores no processo de produção e sua calibração.
- Teste de pressão interna para validação.

1.1.2. Materiais compósitos monitorizados/inteligentes

Cada vez mais há aplicações estruturais que operam muito próximo do limite. Contudo o ideal para estas aplicações serão estruturas que possam transmitir aos engenheiros de manutenção relatórios completos do histórico de funcionamento, bem como a localização de qualquer falha que possa ter ocorrido ou venha a ocorrer na estrutura, que atuem sobre situações que ponham em risco a integridade estrutural, como deformações excessivas ou vibrações excessivas, ou mesmo realizar um processo de autorreparação.

Portanto, com a utilização deste tipo de estruturas ou materiais, estamos a caminhar no sentido da criação de estruturas inteligentes com a capacidade de monitorização e de atuarem sobre o seu estado estrutural autonomamente.

Mesmo sendo um conceito inovador, o conceito de materiais e estruturas inteligentes surgiu no início dos anos 80 [1]. Este conceito surge inspirado pelos mecanismos da natureza. A partir dessa altura os engenheiros e cientistas têm criado novos materiais cujo comportamento se assemelha muito com o dos seres vivos.

1.1.3. Monitorização e inspeção não destrutiva

O sistema de monitorização da integridade estrutural consiste num conjunto de sensores, onde serão processados parâmetros relevantes, tais como tensão e deformação, necessárias para a determinação exata do estado de vida da estrutura.

O sistema de monitorização deve ser estável, durável e fiável durante todo o tempo de vida da estrutura, sendo a fiabilidade crucial, pois pretende-se substituir um sistema de inspeção humano por um automático. Outra questão que se prende aos sistemas de monitorização é o custo de instalação, que deverá ser menor do que a inspeção manual equivalente.

1.1.4. Embebimento de sensores

Para a monitorização de reservatórios em material compósito, serão utilizados sensores embebidos, devendo alguns aspetos serem tomados em conta. Um dos aspetos mais importantes é o próprio embebimento da fibra ótica e como será o seu relacionamento com o meio envolvente, ou seja, a situação de interface entre a fibra ótica e o material, devendo-se assegurar que existe uma total “ancoragem” da fibra.

Outro aspeto importante é a integridade do sensor, nomeadamente a capacidade de transmissão de sinal. Poderá estar em jogo a resistência mecânica da fibra ótica quando comparada com a resistência do material que o envolve. Várias são as situações em que podem ocorrer perturbações no percurso da luz na fibra ótica, desde o processo de produção, que pode originar situações de estrangulamento, devido a microcurvas que a fibra possa apresentar, ou mesmo a situações de pressão devido aos processos de fabrico.

Com isto, foram estudadas todas as diferentes variáveis, para a obtenção de uma solução ótima de implementação do embebimento das fibras.

Capítulo 2

2.1. Materiais Compósitos

O que é um material compósito?

Um Material diz-se compósito quando resulta da ligação de dois ou mais materiais distintos, obtendo-se uma combinação das características de ambos os materiais.

Esta definição é genérica, podendo incluir as ligas metálicas, co-polimeros, minerais e madeira. No âmbito deste trabalho, e como exemplo clássico foram utilizados compósitos fibrosos, isto é, que resultam da dispersão de fibras num material aglomerante, a matriz.

Esta incorporação de fibras para melhorar as propriedades dos materiais tradicionais começou nos primórdios da história da humanidade, quando os tijolos de argila eram reforçados com fibras de palha. Hoje em dia, o grupo de materiais que se definem como compósitos é muito vasto, desde o vulgar betão armado até aos compósitos de elevado desempenho.

Uma das razões principais para as excelentes propriedades dos compósitos resulta do facto de as fibras apresentarem propriedades mecânicas muito superiores às dos materiais idênticos na forma maciça. Isto foi demonstrado por *Griffith* [3], que constatou que, na forma maciça, o vidro possuía tensões de rotura de cerca de 170MPa, enquanto que o mesmo material em fibra de cerca de 20µm de diâmetro alcançava tensões de rotura de 3500MPa.

Tabela 1- *Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça* **[5].**

Material	***Módulo de elasticidade*** *E(GPa)*	***Resistência à tração*** α_u*(GPa)*	***Densidade*** *(g/cm^3)*	***Módulo específico***	***Resistência específica***
Fibras:					
Vidro E	72	3,5	2,54	28,5	1,38
Vidro S	87	4,3	2,49	35,0	1,70
Carbono(pitch)	690	2,2	2,15	321	1,00
Carbono(PAN)	345	2,3	1,85	186	1,24
Sílica	72,4	5,8	2,19	33	2,65
Tungsténio	414	4,2	19,3	21	0,71
Kevlar®49	131	3,6	1,45	90	2,48
Materiais convencionais:					
Aço	210	0,34-2,1	7,8	26,9	0,043-0,27
Ligas de Al	70	0,14-0,62	2,7	25,9	0,052-0,23
Vidro	70	0,7-2,1	2,5	28	0,28-0,84
Tungsténio	350	1,1-4,1	19,3	18,1	0,057-0,21

Os Reforços podem ser fibras, partículas, ou filamentos microscópicos, podem ser feitos de polímeros, cerâmicos ou metais, sendo estas fibras contínuas, longas ou curtas. Por sua vez os materiais que compõem a matriz podem ser metais, plásticos ou cerâmicos.

Contudo, o material compósito mais comum é formado por um reforço de fibras numa matriz de resina, como mostra a figura 2.1.

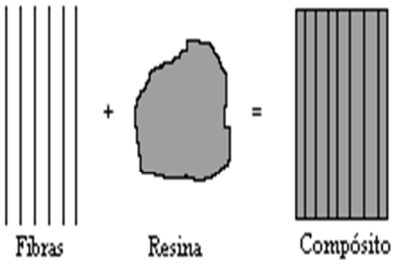


Figura 2.1 – *Formação de um material compósito.*

2.1.1. Função da fibra e da matriz

A fibra, apesar do papel fundamental no desempenho dos compósitos, não pode ser diretamente utilizada em aplicações estruturais de engenharia, devido à pequena secção resistente. De facto, cabe à matriz as funções de dar forma estável ao compósito, de assegurar a distribuição eficiente de carga pelas fibras e de proteger as superfícies de agentes exteriores.

Na tabela 2 são apresentadas as principais características e funções dos diferentes constituintes dos materiais compósitos.

Tabela 2- *Funções dos diferentes constituintes dos materiais compósitos [7].*

	Fibra	***Interface***	***Matriz***
Fabrico	-Manuseamento; -Processamento; -Formas disponíveis; -% Volúmica de fibra; -Constituinte com maior custo;	-Molhagem; -Adesão;	-Viscosidade; -Tendência para adesão; -Temp. Processamento; -Cura exotérmica; -Tensões internas; -Contração na cura;
Projeto e Serviço	-Rigidez, curto e longo prazo; -Resistência; -Resistência à humidade; -Peso específico; -Deformação na rotura a curta, longo prazo; -Coeficiente de Poisson; -Coeficiente de dilatação térmico linear; -Impacto; -Comportamento ao fogo; -Retenção da resistência mecânica;	-Transferência da carga; -Inibição da propagação de fenda; -Aumento da tenacidade; -Resistência à humidade; -Comportamento a curto e a longo prazo;	-Tolerância ao dano; -Propriedades fora do eixo (direção da fibra); -Resistência ao corte; -Compressão longitudinal; -Tensão transversal; -Peso específico; -Deformação na rotura; -Coeficiente de Poisson; -Coeficiente dilatação térmico linear; -Compressão após impacto; -Comportamento longo prazo; -Comportamento ao fogo e fumo; -Fadiga; -Fluência;

2.1.2. Características especiais dos compósitos:

Os Materiais compósitos de matriz polimérica possuem um grupo de características que os diferenciam dos outros materiais [5].

- Os materiais compósitos fornecem uma alternativa aos vários materiais metálicos.
- Têm uma elevada rigidez específica.
- A resistência específica (relação resistência/densidade) de um material compósito é muito elevada (3 a 5 vezes mais elevada que nos aços).
- Possuem uma elevada resistência à fadiga (as ligas de aço e alumínio possuem boa resistência à fadiga, até cerca de 50% da sua resistência estática, mas os compósitos unidirecionais de carbono/epóxido têm uma resistência à fadiga até quase 90% da sua resistência estática).
- Pelo facto de o material compósito ter uma matriz plástica, esta oferece uma maior resistência a corrosão e ao ataque químico.
- Os materiais compósitos oferecem também uma maior flexibilidade a nível de projeto. Por exemplo, uma seleção adequada de materiais e sequência de empilhamento permite levar o coeficiente de dilatação térmica (CTE - *Coefficient of Thermal Expansion*) das estruturas compósitas a zero, conferindo-lhes boa estabilidade dimensional.
- Estes materiais permitem a produção de componentes acabados ou semi-acabados, eliminando diversas operações de maquinagem e reduzindo, assim, o tempo de ciclo e o custo global do processo.
- A utilização de materiais compósitos permite obter componentes complexos sem que seja necessário soldar ou rebitar os componentes individuais, reduzindo assim os tempos de produção e aumentando a fiabilidade e viabilidade desta.
- Boas propriedades de resistência ao impacto, comparativamente com outros materiais, como mostram a figura 2.2.

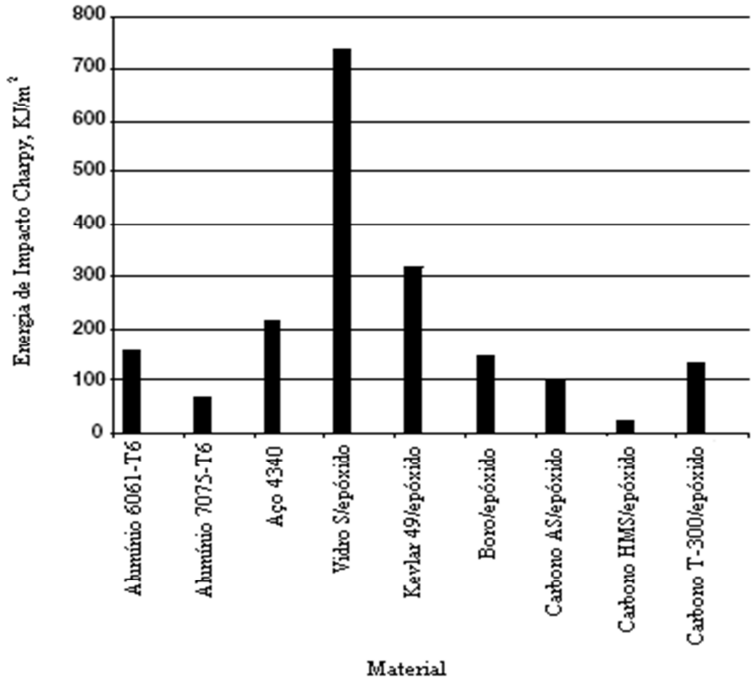


Figura 2.2- *Propriedades de impacto de diversos materiais de engenharia [5].*

- Melhores características em termos de ruído e vibração.
- Permitem uma maior liberdade de projeto, uma vez que é possível alterar a orientação e tipo de fibras, bem como a resina utilizada, indo de encontro às propriedades pretendidas.
- Os compósitos fenólicos reforçados por fibra de vidro ou de Aramida satisfazem os requisitos de reduzido fumo e toxicidade impostos pela FAA ("*Federal Aviation Administration"* - Administração Federal de Aviação) e pela JAR ("*Joint Aviation Requirements"* – Normas Comuns de Aviação), obrigatório para interiores de aeronaves e cozinhas de navios e aviões.
- Em termos de ferramentas, o custo de processamento de compósitos é menor comparativamente com os metais.

Isto provoca uma disseminação dos materiais compósitos por diferentes áreas de atividade que incluem indústrias de grande exigência e visibilidade tecnológica, como a aeronáutica e a indústria espacial e da defesa, os transportes (em especial a industria automóvel), artigos desportivos, componentes elétricos e eletrónicos [6].

2.2.3. Aplicações de compósitos e seus mercados

Hoje em dia, é difícil encontrar uma indústria que não utilize os benefícios dos materiais compósitos.

A Indústria Aeroespacial e Aeronáutico

A utilização de compósitos poliméricos avançados em partes estruturais de aeronaves cresce a cada ano, devido às excelentes propriedades mecânicas que estes materiais conferem ao componente que está sendo projetado e por permitir flexibilidade no projeto de peças complexas e com propriedades locais específicas.

Tabela 3-*Componentes de Compósito em Aplicações Aeronáuticas*

	Componentes Compósitos Utilizados em Diversos Modelos de Aeronaves
F-14	Portas, caudas horizontais, carenagens, revestimentos estabilizadores
F-15	Estabilizadores, lemes de direção, caudas verticais e horizontais, travões aerodinâmicos, revestimentos estabilizadores
F-16	Caudas verticais e horizontais, bordo de ataque do estabilizador, revestimentos na caixa de estabilizador vertical
B-1	Portas, caudas verticais e horizontais, flaps, slats, entradas
AV-8B	Portas, lemes de direção, caudas verticais e horizontais, ailerons, flaps, caixa de estabilizador, carenagens
Boeing 737	Spoilers, estabilizadores horizontais, asas
Boeing 757	Portas, lemes de direção, ailerons, spoilers, flaps, carenagens
Boeing 767	Portas, lemes de direção, ailerons, spoilers, carenagens

O crescente uso de polímeros reforçados com fibras de carbono no setor aeronáutico, como mostra a figura 2.3, deve-se, ao constante desafio que esta indústria encontra na obtenção de componentes que exibam os maiores valores de resistência mecânica e de rigidez específicas entre os materiais disponíveis. A substituição do alumínio por compósitos poliméricos estruturais, por exemplo, permite uma redução de peso de 20 a 30%, além de 25% na redução do custo final de obtenção das peças.

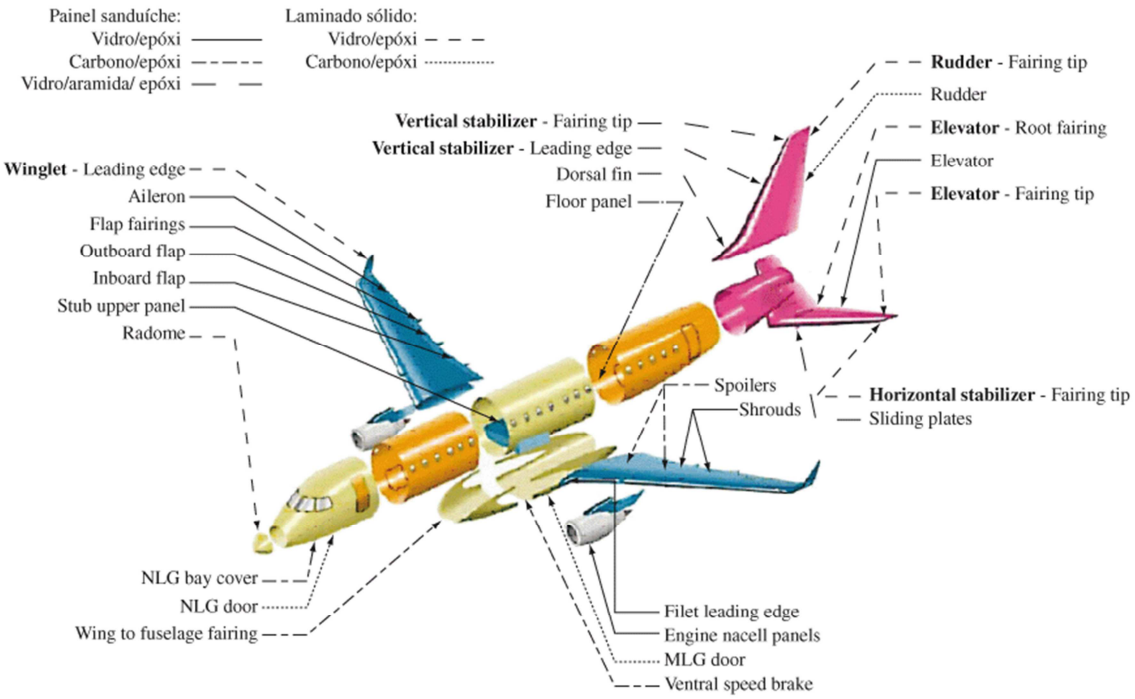


Figura 2.3 - *Vista explodida da aeronave EMB-170, descrevendo os componentes fabricados em compósito polimérico avançado[7].*

A Indústria Automóvel

A tendência mundial mostra que a indústria automóvel a médio e longo prazo será a maior utilizadora dos compósitos poliméricos. No entanto, esta lucrativa oportunidade só se consolidará quando os compósitos reforçados com fibras de vidro e carbono apresentarem preço competitivo com o alumínio e o aço.



Figura 2.4- *Protótipo de carro híbrido em material compósito.*

A Indústria de Artigos de Desporto

A indústria de artigos de desporto, tem investido na utilização de produtos em material compósito, permitindo optimizar a performance dos mesmos e diminuindo o seu peso. Na figura 2.5 vemos uma bicicleta em material compósito, conseguindo-se obter um peso menor, comparativamente à mesma bicicleta em aço ou alumínio.



Figura 2.5- *Bicicleta em material compósito.*

Aplicações Náuticas

Os materiais compósitos são usados numa variedade de aplicações náuticas, como "ferries" de passageiros, barcos a motor, boias, etc., devido à sua resistência à corrosão e leveza, que se traduzem em eficiência de combustível, maior velocidade de cruzeiro e portabilidade. Bem como em barcos de competição, devido ao baixo peso e resistência específica que os materiais compósitos possuem.

Construção e Estruturas Civis

As indústrias de construção civil são as segundas maiores utilizadoras de materiais compósitos. São utilizados para a reabilitação de edifícios e infraestruturas, materiais compósitos reforçados com fibra de vidro, devido aos baixos custos de instalação, manuseamento, reparação, bem como à durabilidade e melhorada resistência à corrosão.

O uso de compósitos em operações de recuperação após terramotos e sismos está também em grande expansão, sendo que as colunas revestidas de vidro/epóxido, carbono/epóxido revelam grande potencial para estas aplicações.

Aplicações Industriais

O uso de materiais compósitos na indústria está com um forte crescimento, pois os processos de fabrico estão a melhorar obtendo-se maior rentabilidade e cadência de produção, bem como produtos com melhores características mecânicas.

Dentro do âmbito deste trabalho, os reservatórios em material compósito, fabricados por enrolamento filamentar, apresentam-se como sendo a tecnologia mais promissora para armazenamento de fluidos a altas pressões. Atualmente, estes produtos já se estabeleceram nos mercados da baixa e média pressão, antevendo-se um grande crescimento das aplicações nos próximos anos.



1- Bocal;
2- Acabamento interno inerte;
3- Mandril metálico;
4- Enrolamento filamentar de Carbono de alta performance em resina epoxy;
5- Enrolamento filamentar de fibra de vidro em resina epoxy;
6- Acabamento “gel-coat”

Figura 2.6 - *Reservatório de alta pressão em material compósito [adaptado de LUXFER].*

2.2.4. Desvantagens e barreiras nos mercados dos compósitos

A grande desvantagem da utilização de materiais compósitos por parte da indústria, é o elevado custo inicial, quando comparado com outros materiais tradicionais. De uma forma geral, o preço de produção de compósitos é elevado, especialmente no processo de moldação manual. Aqui, os custos de matéria-prima representam uma pequena fração do custo total de um produto acabado, principalmente com o uso de fibra de vidro como reforço.

A reciclagem dos materiais compósitos representa também um problema quando se trata de um mercado de grandes dimensões como a indústria automóvel, em que o volume de produção é na ordem dos milhões de componentes por ano. Com os novos regulamentos governamentais e a crescente consciência ambiental, aumenta o desafio de desenvolver novas metodologias de reciclagem nos materiais compósitos.

2.2. Reforço

O reforço num material compósito, é o constituinte que promoverá rigidez e resistência à peça.

2.2.1. Fibra de vidro

A fibra de vidro constitui o tipo de reforço mais utilizado, devido ao seu baixo custo de produção. Contudo as propriedades da fibra depende do modo como esta é produzida.

As matérias-primas mais comuns para a produção da fibra de vidro E são: areia siliciosa, carbonato de cálcio, espatoflúor, ácido bórico e argila, sendo que a sílica preenche mais de 50% do total de ingredientes [5].

Segundo estudos [6], o teor alcalino é o principal responsável pela resistência ao envelhecimento, ou seja, fibras com alto teor alcalino apresentam no decorrer do tempo fortes indícios de alterações das suas propriedades mecânicas, pois sofrem ataques por parte de agentes atmosféricos e químicos mais facilmente. Assim, a fibra tipo A, fortemente alcalina, entrou em desuso, sendo substituída por fibras tipo E.

Atualmente as fibras mais produzidas sob a forma de fio, são do tipo E, S e R. As duas últimas são produzidas a partir de vidros de alta resistência e são muito aplicadas nas indústrias mais exigentes como a indústria aeronáutica.

Na tabela 4 são apresentadas algumas propriedades que se podem encontrar nas principais fibras de vidro.

Tabela 4-*Propriedade de alguns tipos de fibra de vidro [7].*

Propriedades	***Vidro E***	***Vidro S***	***Vidro R***
Densidade (g/cm^3)	2,6	2,49	2,55
Módulo de Young	73	85,5	86,0
Tensão de rotura(MPa)	3400	4580	4400
Deformação na rotura	4,4	5,3	5,2
Coeficiente de expansão térmica (10-6/ºC)	5,0	2,9	4,0

2.2.2. Fibra de carbono

Pode-se agrupar as fibras em dois grupos: as fibras de carbono propriamente ditas, com percentagens de carbono entre 80 e 95%, e as fibras de grafite onde a percentagem de carbono chega aos 99%, estas aplicadas em compósitos de elevado desempenho mecânico.

Os processos de produção mais recentes para a produção de fibras de carbono centram-se na decomposição térmica de vários percursores orgânicos: a celulose, que dá origem às chamadas “rayon fibers”, o poliacrilonitrilo (PAN) e o alcatrão (“Pitch”).

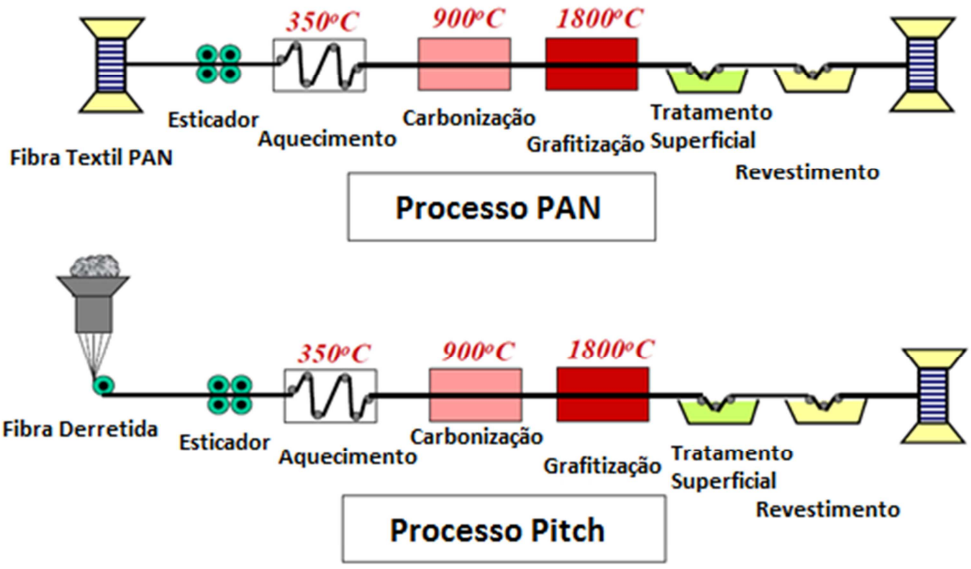


Figura 2.7 - *Esquema de produção PAN e PITCH [7].*

As fibras de carbono apresentam uma particularidade importante: no sentido longitudinal têm um coeficiente de dilatação negativo ou quase nulo. Associadas a materiais com coeficiente de dilatação positivo consegue-se fabricar materiais compósitos com coeficiente de dilatação nulo.

Tabela 5-*Propriedades de alguns tipos de fibra de carbono [8].*

Propriedades	***PAN***	***Alcatrão "Pitch"***	***"Rayon fibers"***
Densidade (g/cm^3)	1,8	2,0	1,7
Módulo de Young	200-400	300-700	415-680
Tensão de rotura (MPa)	2480-5600	1900-2200	2070-2760
Deformação na rotura	0,6-1,2	1-1,5	0,5-0,6
Coeficiente de expansão térmica axial (10^{-6}/ºC)	-0,7	-1,6 a -0,9	-

2.2.3. Fibras aramídicas

As fibras aramídicas são produzidas a partir de poliamidas aromáticas, onde a estrutura química pode ser vista na figura 2.8.

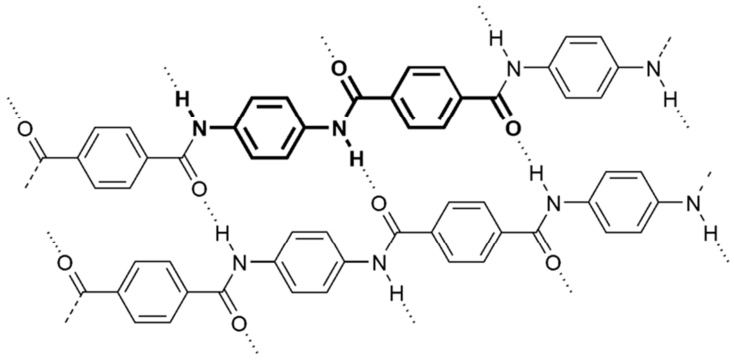


Figura 2.8 - *Estrutura química do Kevlar [34].*

Atualmente existem dois tipos principais de produtos: As fibras standard, tipo Kevlar®29, e as fibras de elevado módulo, tipo Kevlar®49.

Estas fibras apresentam como principais características, excelente resistência química, mecânica e boa resistência ao e impacto e à fadiga.

2.2.4. Outros tipos de reforço

Existem outros tipos de fibras com características próprias como:

- Fibras de Boro: Módulo de Elasticidade cinco vezes superior em relação às fibras de vidro.
- Amianto: Incombustibilidade.
- Sisal.
- Poliamidas: Baixo módulo de Elasticidade.
- Poliésteres.

2.2.5. Formas que podem apresentar os reforços

As fibras podem se apresentar sobre diversas formas, entre elas:

- Roving.
- Mantas.
- Tecidos 2D.
- Tecidos quase unidirecionais.
- Tecidos híbridos.
- Malhas.
- Tecidos 3D.
- Entrançados.
- Pré-formas.

2.3. Matrizes

Os materiais compósitos podem classificar-se segundo vários critérios, sendo precisamente o tipo de matriz um dos mais relevantes. Podemos então distinguir compósitos de matriz polimérica, metálica, cerâmica e cimentosa. A facilidade de processamento, as boas características mecânicas e a baixa densidade, fazem com que os materiais compósitos de matriz polimérica sejam, atualmente, os mais importantes em termos de desempenho e de campo de aplicação, dentro dos materiais compósitos. As matrizes de natureza polimérica podem então ser divididas em duas categorias: termoplásticas e termoendurecíveis.

2.3.1. Matrizes termoendurecíveis

Os materiais termoendurecíveis, uma vez curados, não podem voltar a ser fundidos ou moldados. Este polímero é normalmente fornecido sob a forma de uma mistura de dois (resina, acelerador) ou três componentes: resina, acelerador e catalisador. Quando estes materiais são misturados dá-se um processo designado por "cura", onde em alguns tipos de resina é necessário a aplicação de calor e pressão, enquanto em outras a cura dá-se à temperatura ambiente e pressão atmosférica.

Uma das principais vantagens das resinas termoendurecíveis é a maior facilidade de impregnação no reforço, dado que antes da cura apresenta uma viscosidade inferior, quando comparada com a resina termoplástica.

As resinas termoendurecíveis mais utilizadas são [5]:

- Epóxido.
- Poliéster não-saturado.
- Vinilester.
- Fenólicos.
- Ésteres de cianeto.
- Bismaleimidas.
- Poliamidas.

Tabela 6- *Propriedades típicas de uma resina termoendurecível.*

Material da Resina	**Densidade** (g/cm^3)	**Módulo de Tração** GPa (10^6psi)	**Resistência à Tração** MPa (10^3 psi)
Epóxido	1,2-1,4	2,5-5,0 (0,36-0,72)	50-110 (7,2-16)
Fenólico	1,2-1,4	2,7-4,1 (0,4-0,6)	35-60 (5-9)
Poliéster	1,1-1,4	1,6-4,1 (0,23-0,6)	35-95 (5,0-13,8)

Epóxido

O epóxido é um sistema de resina muito versátil, permitindo um vasto leque de propriedades e possibilidades de processamento. Apresenta baixa contração, bem como uma excelente adesão a uma variedade de materiais substratos

Fenólicos

Os fenólicos vão de encontro aos requisitos de fumo e toxicidade impostos pela FAA (“*Federal Aviation Administration”* - Administração Federal de Aviação) e pela JAR (“*Joint Aviation Requirements”* – Normas Comuns de Aviação), sendo usados no interior de aeronaves e cozinhas de navios, assim como noutros mercados comerciais que exigem produtos de baixo custo, resistentes às chamas e que libertem pouco fumo.

Poliésteres

Os poliésteres são sistemas de resina de baixo custo que oferecem uma excelente resistência à corrosão e cuja temperatura de serviço é mais baixa que para epóxidos. Tem como desvantagem o facto de emitir estireno que se pode tornar bastante tóxico.

2.3.2. Resinas Termoplásticas

As matrizes termoplásticas são constituídas maioritariamente pelos designados plásticos técnicos. Quando se aquece um polímero termoplástico, as ligações moleculares são temporariamente quebradas e passa a existir mobilidade molecular que permite a reconformação. Com o arrefecimento as partículas “congelam” nas posições por elas alcançadas.

Os compósitos termoplásticos, tipicamente, requerem temperaturas e pressões de moldação mais elevadas que os termoendurecíveis.

Contudo têm a vantagem de apresentarem maior resistência ao impacto, maior tenacidade e bastante menor higroscopicidade[1] e podem ser reprocessados.

[1] Higroscopia é a propriedade que certos materiais possuem de absorver água.

Os materiais de resina mais utilizados nos compósitos termoendurecíveis são [5]:

- **Poliamidas (PA)**

As poliamidas são usadas para fazer coletores de admissão, cárteres, engrenagens, rolamentos, fieiras, rodas dentadas, etc.

As poliamidas proporcionam uma boa aparência superficial e baixo coeficiente de atrito.

- **Polipropileno (PP)**

O polipropileno (PP) é um plástico versátil, de baixo custo, baixa densidade, sendo de todos os termoplásticos, o que tem a menor densidade (0.9 g/cm^3) e oferece uma boa rigidez e resistência, nomeadamente a químicos e à fadiga.

- **Polieteretercetona (PEEK)**

O PEEK é um termoplástico de nova geração que pode ser utilizado a altas temperaturas de serviço. Os compósitos PEEK com reforço de carbono já demonstraram a sua utilidade em fuselagens, componentes de satélites e outras estruturas aeroespaciais, podendo ser usados continuamente a 250ºC. Dada a sua maior tolerância ao dano, melhor resistência a solventes e possibilidade de serem usados a altas temperaturas, os compósitos termoplásticos de PEEK/carbono têm suscitado um interesse significativo entre investigadores, assim como na indústria aeronáutica.

O PEEK-carbono é processado a cerca de 380-400ºC para processos de autoclave, enquanto que para a operação de enrolamento filamentar é a uma temperatura superior a 500ºC, para uma melhor consolidação das intercamadas.

- **Sulfeto de p-fenileno (PPS)**

O PPS é um termoplástico de engenharia com um máximo de 65% de cristalinidade e que proporciona temperaturas de funcionamento elevadas, podendo ser usado continuamente a 225ºC.

Tabela 7-*Propriedades Típicas dos Termoplásticos [5].*

Material da Resina	***Densidade*** *(g/cm^3)*	***Módulo de Tração*** *GPa (10^{6}psi)*	***Resistência à Tração*** *MPa (10^3 psi)*
PA	1,1	1,3-3,5 (0,2-0,5)	55-90 (8-13)
PEEK	1,3-1,35	3,5-4,4 (0,5-0,6)	100 (14,5)
PPS	1,3-1,4	3,4 (0,49)	80 (11,6)
Poliéster	1,3-1,4	2,1-2,8 (0,3-0,4)	55-60 (8-8,7)
Policarbonato	1,2	2,1-3,5 (0,3-0,5)	55-70 (8-10)
Acetal	1,4	3,5 (0,5)	70 (10)
Polietileno	0,9-1,0	0,7-1,4 (0,1-0,2)	20-35 (2,9-5)
Teflon	2,1-2,3	-	10-35 1,5-5,0)

2.4. Semi-Produtos

Os semi-produtos são combinações de fibras e matrizes que serão processados posteriormente para a obtenção do compósito final.

2.4.1. Pré forma

Para o fabrico da pré-forma o reforço em forma de fibras uni, bi ou tridimensional, é colocado num molde e posteriormente é injetada a resina de forma a obter-se o material compósito.

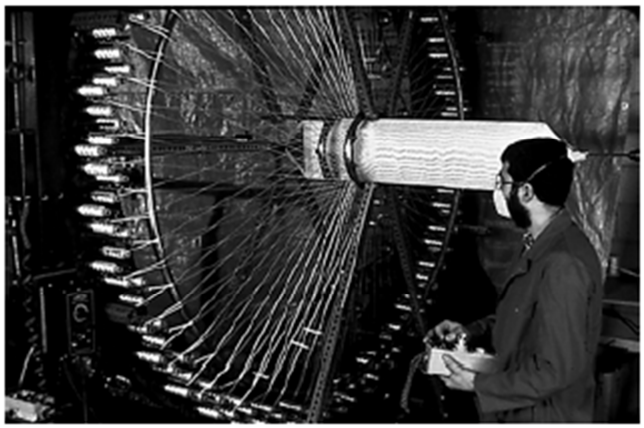


Figura 2.9 - *Fabrico de pré-forma [9].*

2.4.2. Compostos de moldação

Os compostos de moldação são produzidos a partir de fibras curtas ou longas impregnados com resina. Geralmente são utilizados para a moldação por injeção ou moldação por compressão.

Tipos de compostos de moldação:

- Composto de moldação em Placa (SMC).
- Composto de moldação Espessa (TMC).
- Composto de moldação em Massa (BMC).
- Compostos moldáveis por Injeção.

2.4.3. Pré impregnados

Um pré-impregnado é uma mistura de fibra e resina para posterior consolidação. Os reforços podem ser à base de vidro, carbono ou aramida na forma de fibras contínuas unidirecionais ou tecidos. Os rovings pré-impregnados são usados principalmente em aplicações de enrolamento filamentar.



Figura 2.10 - *Produção de fita pré-impregnada unidirecional [10].*

Nos pré-impregnados termoendurecíveis, a resina mais utilizada é o epóxido, sendo introduzidos inibidores que impedem que a cura se dê antes do processamento, desde que este seja armazenado nas condições certas. Estes materiais fornecem uma mistura fibra/resina consistente, assim como uma impregnação completa e eliminam a necessidade de pesar e misturar resina e catalisador.

Por outro lado, os pré-impregnados termoplásticos têm um tempo de validade ilimitado à temperatura ambiente e têm como principais vantagens:

- Reciclabilidade e reprocessamento.
- Boa resistência a solventes e químicos.
- Tempo de ciclo reduzido.
- Maior resistência (incluindo ao impacto).
- Maior flexibilidade para ligação e montagem por ligação por fusão e consolidação in situ.
- Melhor potencial de reparabilidade.

A desvantagem dos pré-impregnados termoplásticos prende-se ao facto de requererem temperaturas e pressões de processamento mais elevadas.

Capítulo 3

3.1. Enrolamento Filamentar

Para o processamento de materiais compósitos, existem diversos processos, descritos em Anexo A, contudo no âmbito deste trabalho será dada especial atenção ao processo de enrolamento filamentar, responsável pela produção dos reservatórios de pressão em estudo.

O enrolamento filamentar é um processo em que fibras em forma de "roving" previamente impregnadas são depositadas num mandril, na amplitude desejada.

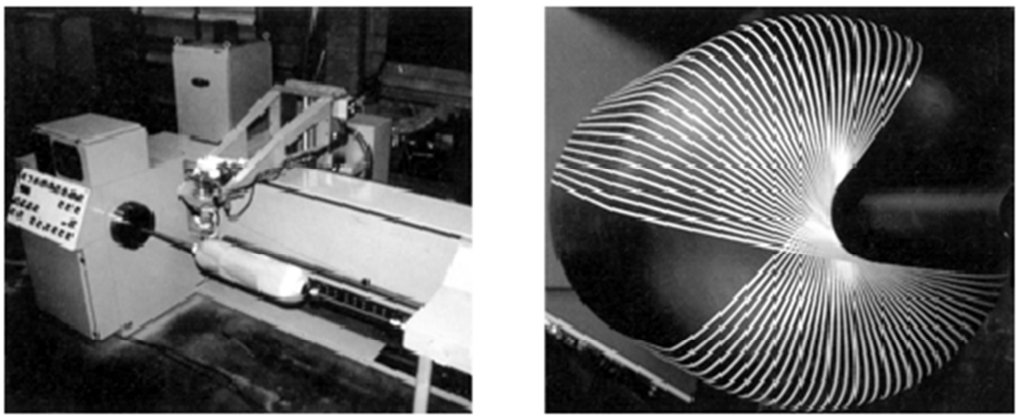


Figura 3.1 - *Demonstração da operação de enrolamento filamentar [5].*

Através de sistemas de guiamento, o reforço é desenrolado sob condições controladas, sendo a única tecnologia adequada para a produção de certas estruturas especializadas, como recipientes sob pressão.

O uso de uma tensão controlada na fase de enrolamento permite dar união às fibras e boas características mecânicas às peças obtidas.

Vantagens:

- Simplicidade.
- Automatização.
- Volume de fibras elevado.
- Possibilidade de orientação do reforço.
- Produção de peças com dimensões elevadas.

Desvantagens:

- Limitações na forma da peça.
- Grande Investimento inicial.
- Requer a presença de operador qualificado.

As resinas mais utilizadas são as resinas termoendurecíveis de poliéster não-saturado, fenolíticos e epoxídicas, após o enrolamento procede-se à polimerização em forno ou através de luzes infravermelhas. Contudo o enrolamento filamentar também pode ser realizado com resinas termoplásticas, utilizando uma fita termoplástica pré-impregnada, que é enrolada enquanto se aplica calor e pressão para se dar a fusão e consolidação do plástico. As combinações mais comuns são carbono/PEEK, carbono/nylon ou carbono/pps.

3.1.1. Enrolamento de compósito termoplástico

Neste processo, uma fita de pré-impregnado termoplástico é enrolada no mandril, sendo aplicado calor e pressão no ponto de contacto do rolo e do mandril, para a fusão e consolidação do termoplástico. A deposição, fusão e consolidação são obtidas num único passo, que evita assim a fase de cura, que é necessária com os termoendurecíveis.

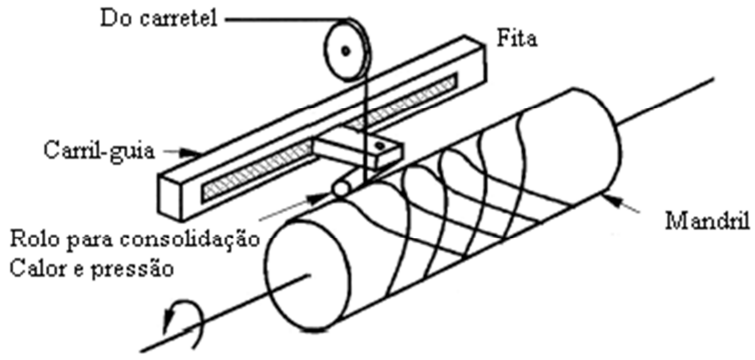


Figura 3.2 - *Esquema do enrolamento de fita termoplástica [5].*

3.1.1.1. Matéria-prima básica de resina termoplástica

Tabela 8-*Propriedades e Características de Processamento de Resinas Termoplásticas.*

Propriedades	PEEK	PPS	Nylon	PEI	PP	PMMA
Temperatura de serviço	250ºC (480ºF)	220ºC (430ºF)	70ºC (160ºF)	170ºC (340ºF)	55ºC (130ºF)	65ºC (150ºF)
Densidade (g/cm^3)	1,32	1,35	1,15	1,27	0,91	1,19
Temperatura de processamento	385ºC (725ºF)	330ºC (625ºF)	275ºC (525ºF)	315ºC (600ºF)	175ºC (350ºF)	205ºC (400ºF)
Absorção de humidade	Muito baixa	Muito baixa	Elevada	Média	Baixa	Muito baixa
Características de ligação	Fracas	Fracas	Fracas	Boas	Fracas	Boas

Durante o processo de enrolamento de fita termoplástica, a fusão localizada provoca uma grande velocidade de aquecimento e arrefecimento que requer condições de processamento diferentes. Os três parâmetros importantes: a intensidade de calor, a velocidade da fita ou do enrolamento, e força de consolidação, têm um efeito significativo na qualidade do componente enrolado. Os parâmetros de processo ótimos têm de ser determinados para se obter um bom componente consolidado.

3.1.2. Enrolamento de compósito termoendurecível

No processo de enrolamento filamentar com termoendurecível, a fibra seca passa por um banho de resina, previamente preparada, após estar completamente impregnada esta é enrolada no mandril, posteriormente irá curar ao ar livre ou em estufa. Com a utilização de pré-impregnados termoendurecíveis, a etapa do banho de impregnação não é realizada e a fibra é enrolada diretamente no mandril, dando-se de seguida a consolidação em estufa

.

3.2. Modelação do Processo

3.2.1. Enrolamento filamentar de compósitos termoendurecíveis

As condições iniciais, como a temperatura T_0 e o grau de cura α_0 a que as fibras impregnadas de resina são depositadas no mandril, podem ser definidas como:

$$T = T_0 \; ; \qquad \alpha = \alpha_0 \; ; \qquad t = t_0 \tag{3.2.1}$$

Contudo, durante o processo de enrolamento filamentar, o tempo t_0 é diferente para cada camada, visto o enrolamento filamentar ser um processo contínuo e a espessura é construída gradualmente.

Logo as condições limite de temperatura para $t > t_0$, são :

$$T = T_L \quad para \quad r = R_{max} + h \; ; \quad 0 \leq z \leq L$$
$$T = T_R \quad para \quad r = R_{mi} \; ; \quad 0 \leq z \leq L \tag{3.2.2}$$

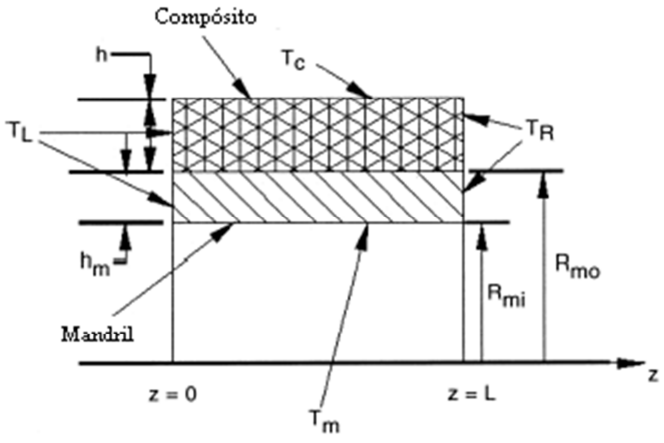


Figura 3.3 - *Condições limite para o processo de enrolamento filamentar [5].*

$$T = T_L \quad para\ z = 0 \; ; \quad R_{mi} \leq r \leq R_{mo} + h$$
$$T = T_R \quad para\ z = L \; ; \quad R_{mi} \leq r \leq R_{mo} + h \tag{3.2.3}$$

Sendo r a distância ao eixo do mandril, T_c e T_m são as temperaturas na superfície exterior do cilindro compósito e na superfície interior do mandril, respetivamente; R_{mi} e R_{mo} são os raios interiores e exteriores do mandril, e "h" que varia com o tempo, é a espessura do compósito. T_L e T_R são as temperaturas nos limites esquerdo e direito do cilindro compósito, respetivamente.

3.2.2. Enrolamento de compósitos termoplásticos

No processo de enrolamento de um compósito termoplástico, o calor é fornecido no ponto de contacto da fita e laminado pré-consolidado, para fundir a resina, e é aplicada uma pressão P usando um rolo para consolidação. As condições térmicas são mostradas na Figura 3.5. [3]

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(K_r . r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(K_\theta r \frac{\partial T}{\partial \theta}\right) + \rho \dot{Q} \tag{3.2.4}$$

As condições iniciais (t≤0) são dadas do modo que se segue:

$$T = T_{im}^{m} \qquad no\ mandril$$

$$T = T_{im}^{c}\ \ e\ c = c_{im} \qquad no\ compósito \tag{3.2.5}$$

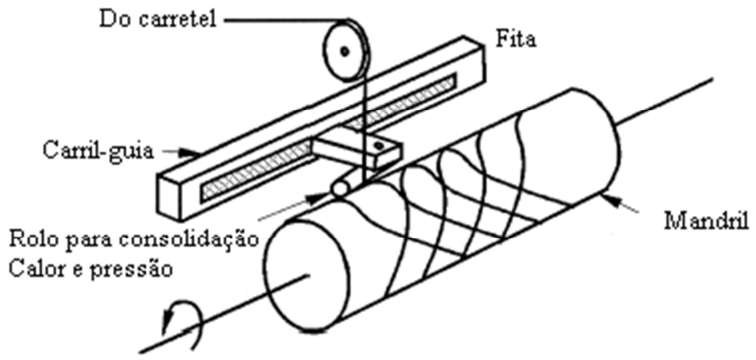


Figura 3.4 - *Diagrama esquemático de um processo de enrolamento de fita [5].*

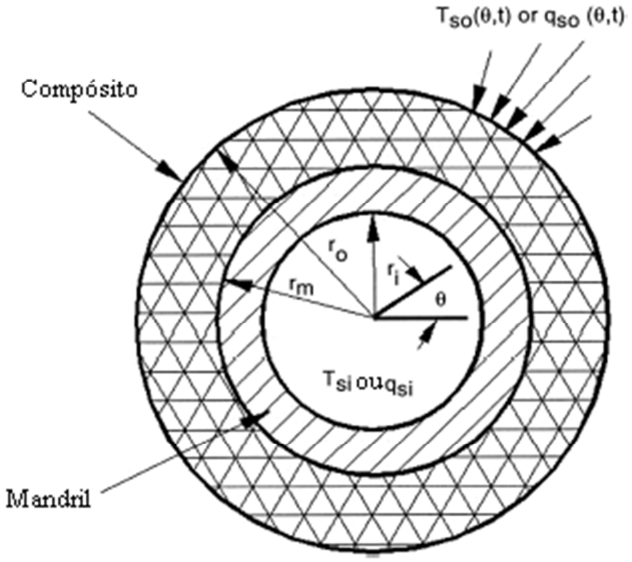


Figura 3.5 - *Condições térmicas durante um processo de enrolamento [5].*

No processo de enrolamento, as condições limite, como a temperatura ou fluxo de calor na superfície interior do mandril e na superfície cilíndrica exterior do compósito, são especificadas num tempo t > 0. Na superfície interior do mandril, a temperatura T_{si} ou fluxo de calor q_{si} é uniforme e constante, como mostrado abaixo para t > 0,

$$T = T_{si} \qquad ou \qquad q = q_{si} \qquad e \qquad r = r_i \tag{3.2.6}$$

em que r_i é o raio interior do mandril. Na superfície exterior do cilindro, pode ser especificada a temperatura da superfície T_{so} ou o fluxo de calor $q_{so.}$ Qualquer uma destas características pode variar na direção circunferencial θ e com o tempo, como se segue para t > 0.

$$T = T_{so}(\theta, t) \qquad ou \qquad q = q_{so}(\theta, t) \qquad e \qquad r = r_o \tag{3.2.7}$$

em que r_o é o raio exterior da superfície do compósito. As condições acima podem ser aplicadas após o enrolamento de uma ou mais camadas, ou na finalização do enrolamento. No caso anterior, a espessura do cilindro compósito varia com o tempo.

3.2.3. *Software* de apoio ao enrolamento filamentar

Devido a complexidade do processo de enrolamento filamentar, e com a necessidade da sua aplicação no contexto industrial, onde é necessária uma rápida adaptação às diferentes exigências dos clientes, foram desenvolvidos *software's* de apoio ao enrolamento filamentar. Um exemplo deste *software* é o "CADwind", que simula a partir de um input geométrico, o processo de enrolamento, calculando todos os parâmetros e definições de enrolamento e exporta o mesmo para a unidade de comando do mandril e equipamento de produção.

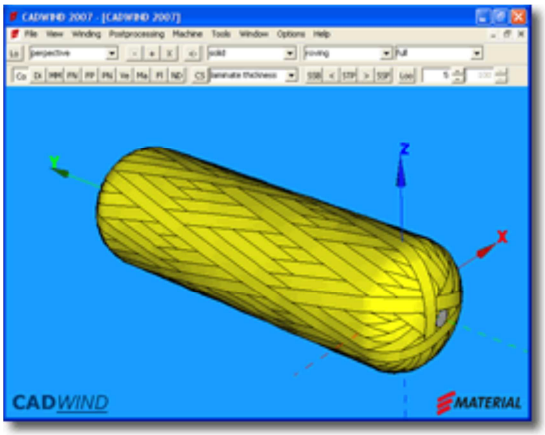


Figura 3.6 - *Software "CADwind".*

Este *software* tem as seguintes características:

- Otimização do design do compósito.
- Otimização dos parâmetros de enrolamento.
- Possibilidade de utilização de formas e geometrias diferentes, bem como se adapta ao tipo de mandril.
- Elabora todo o planeamento do processo de produção.
- Exporta o resultado em linguagem apropriada para a introdução na unidade de comando da máquina de produção.

Capítulo 4

4.1. Sensores e Medição Experimental

4.1.1. Análise experimental de tensões

A análise de tensões é fundamental para determinar o estado de tensão num ou em vários pontos de uma estrutura. Conhecido o estado de tensão em cada ponto e tendo em consideração os dados relativos às propriedades do material, obtém-se a capacidade de explicar ou prever o comportamento do elemento estrutural. Isto é, as amplitudes das tensões efetivas são comparadas com o limite elástico do material para daí se inferir o estado do funcionamento do elemento estrutural.

Para a análise das tensões num corpo foram desenvolvidos vários métodos, desde as soluções exatas por métodos analíticos, deduzidos através de diferentes teorias como:

- Teoria da elasticidade
- Teoria da plasticidade
- Visco elasticidade
- Visco plasticidade

Ou através de métodos numéricos (soluções aproximadas):

- Método das forças.
- Método dos deslocamentos.
- Método das diferenças finitas.
- Método dos Elementos finitos.

Contudo estas técnicas revelam grandes dificuldades e limitações de implementação, tal como o facto de requererem um conhecimento preciso das condições fronteira e das propriedades dos materiais, muitas vezes só conseguidas através da medição experimental. Por outro lado, nenhuma teoria poderá ser aceite até ser completamente validada experimentalmente.

Surgem, então, numerosas técnicas de análise experimental de tensão. Algumas estudam o comportamento interno dos corpos por processos destrutivos, enquanto que outros não alteram as propriedades da estrutura podendo ser implementados nesta "in-situ".

4.1.2. Métodos de análise experimental

Conforme já foi anteriormente referido a análise de tensões por via exclusivamente teórica é limitada. Por vezes o estado de tensão num ponto só é possível de ser determinado recorrendo à utilização de grandezas medidas experimentalmente. Contudo, raramente é possível a medição direta da tensão, sendo habitual a medição de outra grandeza (Ex: Resistência elétrica) para que possa ser relacionada com a tensão.

Dentro dos Métodos Experimentais podemos dividi-los em:

- Métodos destrutivos.
- Análise de Modelos.
- Métodos não destrutivos.

No âmbito deste projeto, como o objetivo é a monitorização dos reservatórios, o método utilizado e que mais foi aprofundado é o método não destrutivo.

4.1.3. Métodos experimentais não destrutivos

Dentro dos métodos experimentais não destrutivos, existem três grandes grupos [11]:

- Medição direta da tensão.
- Medição direta de deformação.
- Medição indireta, onde uma característica é relacionada com uma característica mecânica da estrutura.

Neste trabalho, para a monitorização do reservatório e após o estudo da melhor solução de experimentação de acordo com as exigências e limitações da estrutura foi escolhida a medição indireta.

Dentro da medição indireta encontram-se diversas soluções:

- Extensómetria.
- Fotoelasticidade.
- Fibras óticas.
- Revestimentos frágeis.
- Método de Moiré.
- Técnicas de Interfenómetria Holográfica.

4.1.4. Métodos experimentais para a monitorização de reservatórios

Já vários trabalhos foram realizados no sentido de monitorizar os reservatórios em material compósito.

A primeira dificuldade surge no facto do comportamento do material compósito ser difícil de caracterizar. Neste campo os métodos estudados foram:

- Sensores acústicos [8].
- "lamb wave method" [12].
- Sensores piezoelétricos.
- Condutividade elétrica [8].
- Fibra ótica[12-14].
- Ultra-sons [15].
- Raios-X [15].
- Termografia.
- " Eddy Current".

Contudo estes métodos têm algumas limitações. Os ultrassons, raios x, a termografia, e o método da corrente de Eddy, são métodos de medição de dano muito eficazes, mas só possibilitam a análise da peça pós utilização, isto é, são métodos utilizados em situações de manutenção ou análise da falha, que por estas características não são utilizados na produção de estruturas inteligentes.

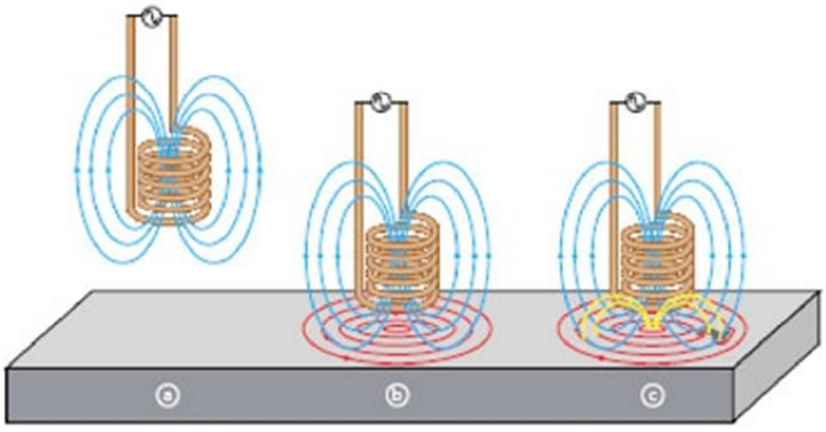


Figura 4.1 - *Exemplo de corrente de EDDY[16].*

Os sensores acústicos têm sido gradualmente utilizados na monitorização de estruturas, demonstrando ser uma ferramenta bastante eficiente para adquirir informação "In-situ", sobre a falha estrutural do componente em causa. Contudo, estes sensores não têm a capacidade de determinar o estado de tensão/deformação, não permitindo uma monitorização completa da estrutura.

Trabalho desenvolvido por Wen[8], onde a característica de condutividade elétrica da fibra de carbono, pode ser relacionada com a deformação do material compósito, bem como uma queda abrupta na condutividade elétrica poderá indicar a rotura da fibra.

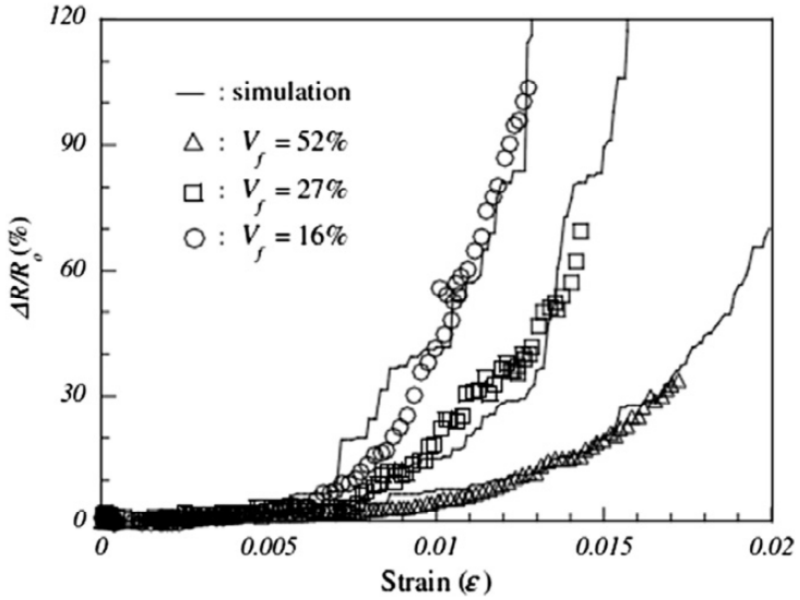


Figura 4.2 - *Condutividade elétrica de material compósito[8].*

Contudo, este método ainda está em fase de desenvolvimento e apresenta grandes dificuldades de implementação, pois a afinação desta técnica é crítica para o bom funcionamento e previsão de resultados. Cada componente mesmo sendo produzido de forma idêntica tem uma condutividade própria e, por outro lado, este método limita a utilização do reforço às fibras de carbono, bem como é bastante sensível a interferência eletromagnética.

Como métodos mais promissores, economicamente vantajosos e de maior facilidade de implementação na monitorização de reservatórios em materiais compósitos temos os sensores piezoelétricos, sensores acústicos, extensómetros e sensores de Bragg em fibra ótica.

Em alguns trabalhos encontrados [17; 18], a implementação das fibras óticas é feita através da colagem de uma "smart tape" (película inteligente) nas zonas críticas, contudo tentamos inovar o trabalho já realizado e utilizamos neste trabalho fibras óticas embebidas no compósito.

Este procedimento de embeber os sensores, teve como objetivo uma melhoria na exatidão das medições, possibilitando a medição do estado de tensão/deformação no interior da estrutura e não só na superfície, promovendo uma melhor protecção dos sensores, bem como sendo uma melhor solução para a aplicação e produção do produto final (reservatório inteligente).

4.2. Sensores de Bragg em fibra ótica

4.2.1. Sensores em fibra ótica

Os sensores em fibra ótica surgiram em meados da década de setenta antes mesmo do aparecimento de fibras de baixa perda. O desenvolvimento desta tecnologia foi baseado na medição de grandezas físicas através de processos interferométricos ou de polarização. É possível afirmar-se que qualquer conjunto de interações externas é "impresso" na fibra e traduzido por diversos mecanismos, tal como variação de fase, intensidade, frequência, polarização e comprimento de onda.

Os sensores óticos podem, então, ser classificados consoante o seu próprio mecanismo de transdução nos seguintes tipos: intensiométricos, interferométricos, polarimétricos, espectrométricos e modalmétricos.

Os sensores intensiométricos envolvem variações de intensidade à saída de uma fibra promovidas pelo mensurando e são habitualmente construídos em fibra multimodo. Os sensores interferométricos envolvem variações induzidas pelo mensurando na fase da radiação que percorre o interferómetro e são habitualmente construídos em fibra monomodo.

Efetuando a comparação entre a fase da radiação da onda de referência com aquela onde atua o mensurando proveniente da mesma da fonte, é possível estabelecer uma relação linear estável de várias ordens de grandeza entre a fase relativa dessas duas ondas. Habitualmente são usados dois tipos de configurações: interferómetros de duas ondas (Michelson e Mach-Zehnder) ou de múltiplas ondas (Fabry-Perot) [13].

4.2.2. Redes de Bragg

No capítulo anterior foram brevemente descritas as configurações base implementadas em fibra ótica destinadas à medição de diversos parâmetros físicos.

Uma nova abordagem nos sistemas sensores baseados em fibra ótica, surgiu com o aparecimento das redes de Bragg em fibra ótica e com o consequente desenvolvimento de um novo grupo de técnicas de interrogação e multiplexagem (vários sensores por fibra) capazes de serem integradas a um custo que as tornam potencialmente atrativas.

As redes de difração de Bragg em fibra ótica, são estruturas que resultam de uma modulação do índice de refração do núcleo da fibra ótica.

A sua designação é devida à semelhança existente entre o fenómeno de espalhamento de raios X em planos de uma rede cristalina, inicialmente estudado pelo cientista inglês Lawrence Bragg, e a interferência que ocorre entre a onda incidente na estrutura e o conjunto de ondas geradas pela modulação periódica de índice de refração.

As redes de Bragg em fibra ótica constituem, por isso, um grupo específico de um outro mais geral formado peles redes de difração em ótica e cujo comportamento é descrito pela seguinte equação [19]:

$$nsen(\theta_2) = nsen(\theta_1) + m\frac{\lambda}{\Lambda} \tag{4.2.1}$$

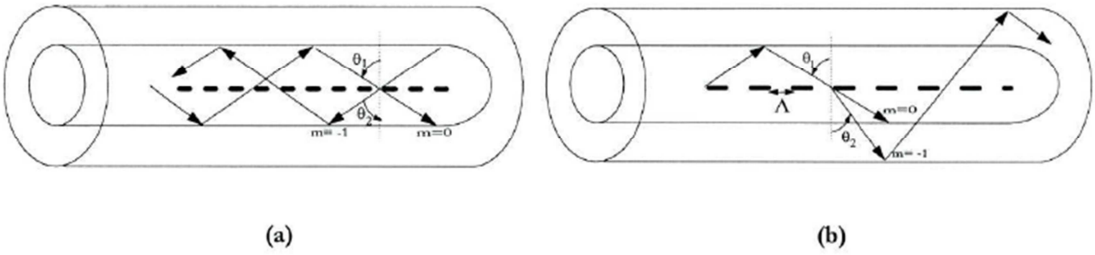


Figura 4.3 - *a) Ilustração geométrica representativa de uma rede de Bragg b) ilustração geométrica de uma fibra de período longo [13].*

Onde θ_1 e θ_2 são os ângulos de incidência e de refração da radiação, λ é o comprimento de onda e Λ o período espacial da rede.

Nas redes de Bragg em reflexão (FBG) é estabelecida uma interação entre modos contra-propagantes e as redes Bragg em transmissão ou redes de período longo (LPG-Long Period Grating) no qual é estabelecida uma interação entre modos copropagantes do núcleo e da bainha. Estes dois tipos de redes estão presentes numa grande parte dos sistemas sensores em fibra ótica desenvolvidos atualmente [13].

4.2.3. Refletividade da rede de Bragg

Como foi referido anteriormente, as redes de Bragg são formadas por uma modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra ótica. O valor máximo da refletividade ocorre quando a constante de propagação do modo guiado no núcleo, se encontra em ressonância com a modulação espacial do índice com período Λ.

Condição de Bragg [18]:

$$\lambda_B = 2n_{efc}\Lambda \tag{4.2.2}$$

Onde n_{efc}, representa o índice efetivo do núcleo.

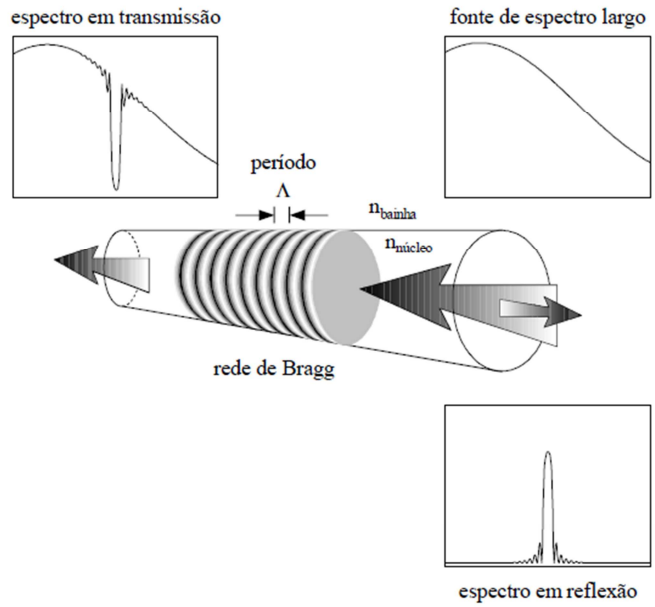


Figura 4.4 - *Representação esquemática de uma rede de Bragg em fibra óptica [18].*

As fibras de Bragg, como parte integrante da fibra ótica, são sensíveis à aplicação de grandezas físicas, na mesma medida que a própria matriz de sílica. Logo as propriedades espectrais das redes de Bragg dependem de grandezas como a temperatura e a tensão mecânica, ou seja, a aplicação destas vai provocar uma alteração do índice efetivo ou no período, que irá induzir um desvio no comprimento de onda ressonante.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B\left(\frac{\Delta n_{efc}}{n_{efc}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}\right) \tag{4.2.3}$$

O princípio de funcionamento da fibra de Bragg, baseia-se na medição dos desvios em comprimento de onda induzidos na condição de ressonância por variações de temperatura, deformação, pressão ou campos magnéticos.

4.2.3.1. Sensibilidade à temperatura dos sensores de Bragg

A sensibilidade à temperatura dos sensores de Bragg é dada pela seguinte expressão [26]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\frac{1}{\Lambda}\frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial T}\right)\Delta T = \lambda_B(\propto + \xi)\Delta T \tag{4.2.4}$$

E resulta da expansão térmica da matriz de sílica e da dependência do índice de refração com a temperatura.

Onde α e ξ são o coeficiente de expansão térmica e o coeficiente termo-ótico da sílica. Neste caso o coeficiente de expansão térmica tem o valor de $0{,}55\text{x}10^{-6}$ K^{-1} e o coeficiente termo-ótico o valor de $8{,}0\text{x}10^{-6}$ K^{-1} [13].

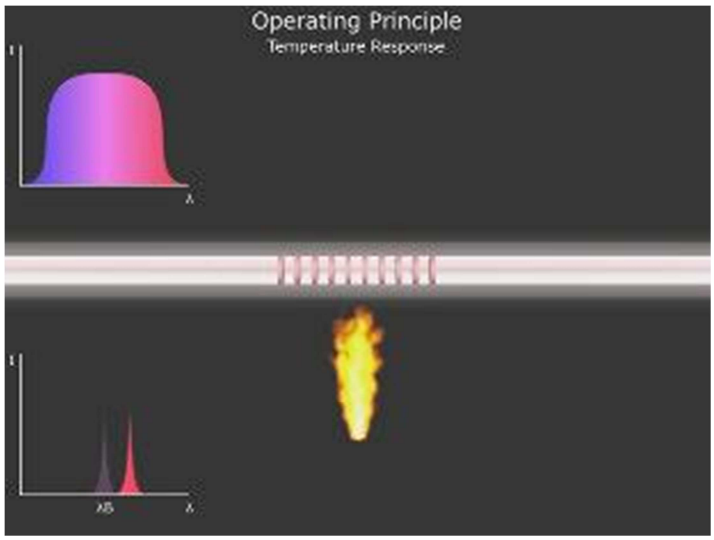


Figura 4.5 - *Sensibilidade à temperatura dos sensores de Bragg [19].*

4.2.3.2. Sensibilidade à tensão mecânica dos sensores de Bragg

A sensibilidade à tensão mecânica advém da deformação física da matriz e da alteração do índice devido ao efeito fotoelástico.

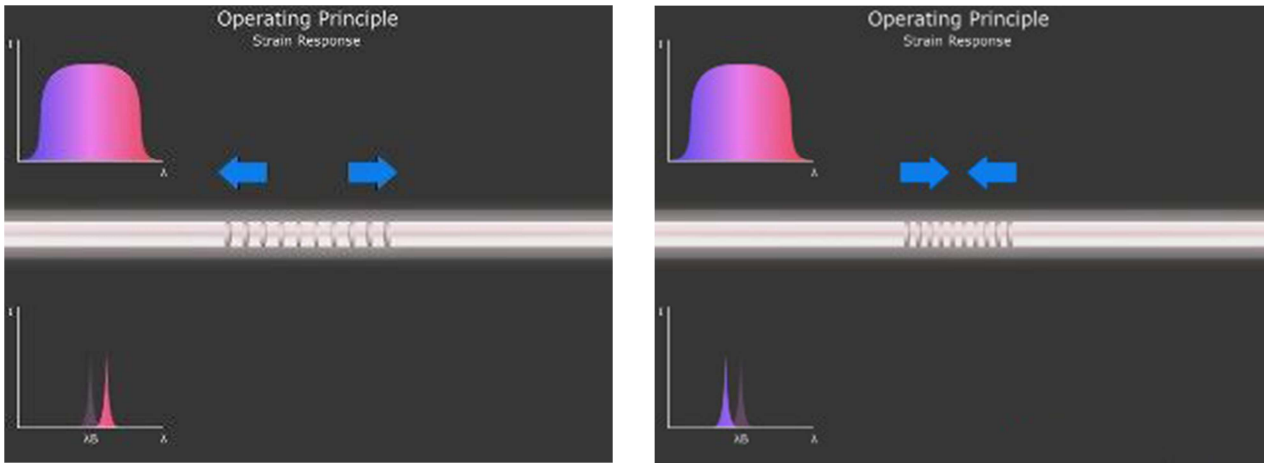


Figura 4.6 - *Sensibilidade à tensão mecânica da fibra de Bragg [19].*

A variação do comprimento de onda devido a aplicação de uma carga mecânica longitudinal é dada por [18]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\frac{1}{\Lambda}\frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial \varepsilon}\right)\Delta T = \lambda_B(1 - pe)\Delta\varepsilon \tag{4.2.5}$$

Onde *pe* representa a constante fotoelástica da sílica, que tem um valor aproximado de 0,22 [13].

4.2.3.3. Multifuncionalidade e multiplexagem

Outro aspeto importante dos sensores óticos de rede de Bragg, é a capacidade de na mesma fibra se colocar várias redes de Bragg, obtendo uma medição em vários pontos (multiplexagem), que também possibilita a medição de grandezas diferentes (multifuncionalidade), permitirá uma grande economia quer de fibras, quer do sistema de interrogação que não necessita de ter vários canais.

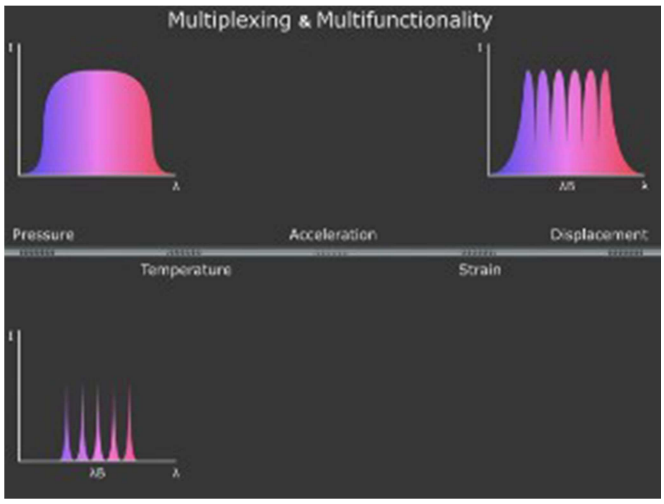


Figura 4.7 - *Multifuncionalidade e Multiplexagem [19].*

4.2.4. Tipos de redes de Bragg

Dentro das redes de Bragg, podem ser classificadas consoante o tipo de fotossensibilidade: tipo I, tipo II (dependente das condições iniciais de gravação e das propriedades da fibra ótica), tipo IIA [30]

As redes de Bragg do tipo I são as mais usuais e são gravadas (com intensidade moderada) em fibras fotossensíveis normais verificando-se um crescimento monótono da amplitude de modulação do índice de refração da fibra. Nesta rede, o espetro de reflexão do modo guiado é complementar ao de transmissão, revelando baixas perdas por absorção ou reflexão que se verificam na bainha. É ainda significativo o comportamento que as redes de tipo I têm com a variação de temperatura possibilitando a sua aplicação como sensores ou até mesmo em telecomunicações. A gama de temperatura sob a qual estas redes operam é de -40° a 80°C, podendo ser apagadas quando expostas a temperaturas em torno dos 200 °C. [31]

As redes de tipo II por norma são gravadas com recurso a um laser pulsado de alta energia e, como consequência das elevadas intensidades dos pulsos de energia, as redes de tipo II apresentam um espetro de reflexão e de transmissão no qual não é observável um pico bem definido contrariamente ao que se obtém para as de tipo I. Tal pode estar associado a possíveis danos físicos no núcleo, advindos da exposição intensa e irregular a que a fibra é sujeita, que tornam difícil a reversão da modulação do índice de refração. Relativamente à dependência com a temperatura, estas redes podem ser submetidas a temperaturas que podem ir até aos 800°C, não interferindo na alta estabilidade que estas apresentam, comparativamente às de tipo I, a elevadas temperaturas. [31]

Quando uma rede do tipo I, gravada numa fibra com elevada concentração de GeO2, é continuamente exposta à radiação laser ultravioleta (UV), esta pode ser apagada seguindo-se o crescimento de uma nova rede com variação negativa do índice de refração, sendo esta designada por rede de Bragg do tipo IIA [30]. No que toca a estabilidade, estas redes apresentam-se mais estáveis do que as de tipo I e menos do que as de tipo II.

4.2.5. Produção dos sensores

As diversas técnicas de Produção de redes em fibra ótica têm como objetivo o registo eficiente de alterações de índice de refração localizadas numa extensão definida do núcleo da fibra e, deste modo, a definição de uma rede de difração.

As principais técnicas de fabrico de sensores são [13]:

- Método holográfico.
- Método da máscara de fase.
- Método de varrimento fibra/máscara de fase.
- Método interferométrico com fonte sintonizável.

Sendo atualmente a técnica mais utilizada, o método da mascara de fase, onde a radiação UV incide diretamente num elemento difrativo gerador de uma modulação espacial de fase nas ordens difratadas +1 e —1. A fixação da porção de fibra sobre a face oposta à da radiação incidente permite a fotoimpressão de um padrão de interferência, que torna possível a fabricação das redes de Bragg.

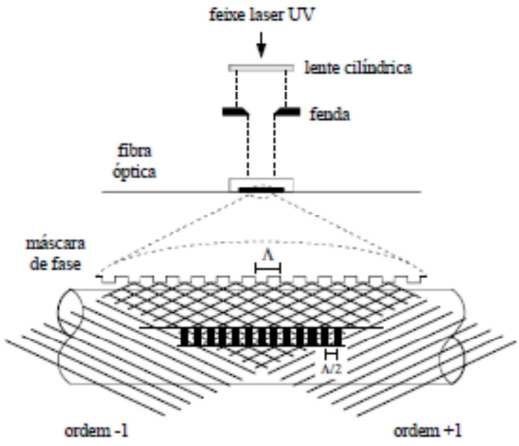


Figura 4.8 - *Fabricação da rede de Bragg [13].*

Na Figura 4., é representada a produção de uma rede de Bragg, onde a fibra é alinhada com as depressões da mascara, sendo a radiação ultravioleta focada através de uma lente cilíndrica. De se notar que o período de modulação do padrão de interferência é sempre metade do período da mascara de fase, sendo independente do comprimento de onda da emissão laser [13].

4.2.6. Fibras óticas poliméricas

Como alternativa às fibras óticas de sílica, existem fibras óticas de outros materiais, entre elas as fibras óticas poliméricas. Comparativamente, estas fibras operam na gama do visível, possuem maior resistência à fratura e a vibrações, requerem um equipamento de aquisição mais simples e mais barato.

Enquanto que as fibras de sílica são relativamente frágeis e quebram com facilidade, as fibras ótica poliméricas, por serem constituídas por materiais plásticos, são mais flexíveis, possibilitando a transmissão de luz mesmo depois de ter ultrapassado a barreira da elongação plástica. Devido às características do material da fibra ótica polimérica.

Contudo, as fibras óticas poliméricas têm um diâmetro elevado, tipicamente 0.25-1mm, que além de ser bastante superior ao das fibras de sílica, este é cerca de 98% do diâmetro da bainha, o que possibilita ao feixe de luz que é injetada atravessar a fibra[33].

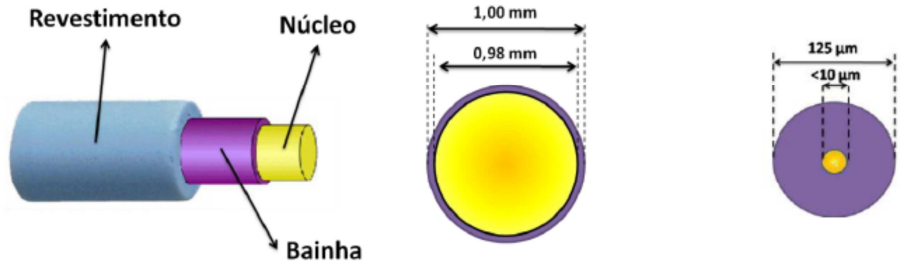


Figura 4.9 – *Composição de uma fibra óptica (esquerda) e representação das dimensões de uma fibra óptica polimérica (centro) e uma fibra óptica monomodo (à direita) [33].*

Por esta razão, a aplicação de fibras óticas poliméricas embebidas no material compósito, não apresenta uma solução tão interessante comparativamente com as fibras óticas de sílica, pois a sua dimensão poderá alterar as características da estrutura, apresentando-se o sensor como um defeito estrutural. Logo neste projeto não serão utilizadas este tipo de fibras óticas para a monitorização de reservatório produzidos por enrolamento filamentar de material compósito.

Capítulo 5

5.1. Calibração e Validação dos sensores

«**Calibração**» [Dicionário da língua portuguesa]: Operação que, em condições especificadas, num primeiro passo, estabelece a relação entre os valores da grandeza com incertezas de medição provenientes de padrões e as indicações correspondentes com incertezas de medição associadas e, num segundo passo, usa esta informação para estabelecer uma relação para obter o resultado de medição de uma indicação.

«**Validação** » [Dicionário da língua portuguesa]: Verificação de que os requisitos especificados são adequados para determinado uso.

Para a monitorização de reservatórios em material compósito, foram utilizados sensores embebidos no material compósito. Contudo, alguns aspetos tiveram que ser tomados em conta. Um dos aspetos mais importante é o próprio embebimento da fibra ótica e como será o seu relacionamento com o meio envolvente.

Tal como já foi descrito por *Luyckx* [2; 4], existe uma diferença na transferência de deformação por parte do material hospedeiro para o sensor ótico embebido que pode variar devido às diferentes características de ambos os materiais. Logo, com a utilização dos sensores óticos embebidos no reforço do compósito, surge a questão da exatidão dos valores obtidos, ou seja, se a fibra tem a capacidade de traduzir os esforços sujeitos na estrutura compósita, que remete para uma boa "ancoragem" da fibra ao compósito.

Outro aspeto importante é a integridade do sensor, nomeadamente a transmissão de sinal, pois poderá estar em jogo a resistência mecânica da fibra ótica quando comparada com a resistência do material que a envolve. Várias são as situações em que podem ocorrer perturbações no percurso da luz na fibra ótica, desde o processo de produção, que pode originar situações de estrangulamento devido a microcurvas na fibra, ou mesmo a situações de pressão devido aos processos de fabrico.

Foram estudadas neste projeto várias variáveis, para a obtenção de uma solução ótima de implementação das fibras óticas no material compósito. Para isso, foram produzidos diferentes tipos de provetes, que permitiram descrever as diferentes condições de produção e de solicitação dos reservatórios em material compósito, que por sua vez, foram ensaiados mecanicamente, onde os valores de deformação real do provete foram comparados com os obtidos pelo sistema de interrogação do sensor ótico.

5.1.1. Projeto e Construção de mecanismo para a produção de provetes

Como primeiro desafio neste projeto, surgiu a necessidade de desenvolver um "set-up" que permitisse simular as condições de tração e compressão das fibras. Sendo necessário reproduzir as condições que vigoram na produção industrial do enrolamento filamentar.

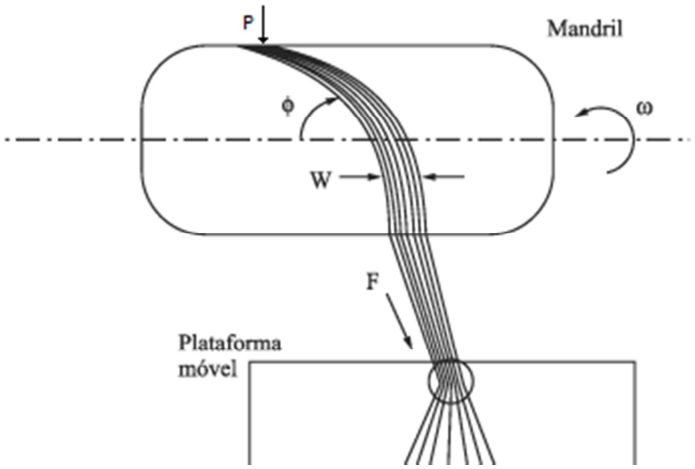


Figura 5.1 – *Processo de enrolamento filamentar.*

Como se pode verificar na Figura 5.1, as duas variáveis mais importantes que foram estudadas para a calibração dos sensores, são a tensão axial na fibra (**F**) e a compressão radial (**P**), visto estas irem determinar todo o comportamento, resistência e aplicabilidade do sensor ótico.

5.1.1.1. Requisitos e exigências do "set-up"

Características técnicas:

- Capacidade de simular a tensão axial na fibra, com a possibilidade de controlar a carga aplicada.
- Capacidade de simular o efeito da compressão da fibra, embora independentemente da tensão axial.
- Garantir estabilidade dimensional na estrutura (Evitar torsão, o peso da estrutura sobre a fibra, etc..).
- Possibilidade de realizar a cura da fibra.
- Fácil montagem e regulação.

Características de projeto:

- Projeto exequível.
- Estrutura simples, para a sua produção ser a mais rápida possível bem como económica.
- Utilização de elementos normalizados

5.1.1.2. Desenho do "set-up"

Para o projeto do "set-up" utilizou-se o software comercial *Solidworks.*[2]

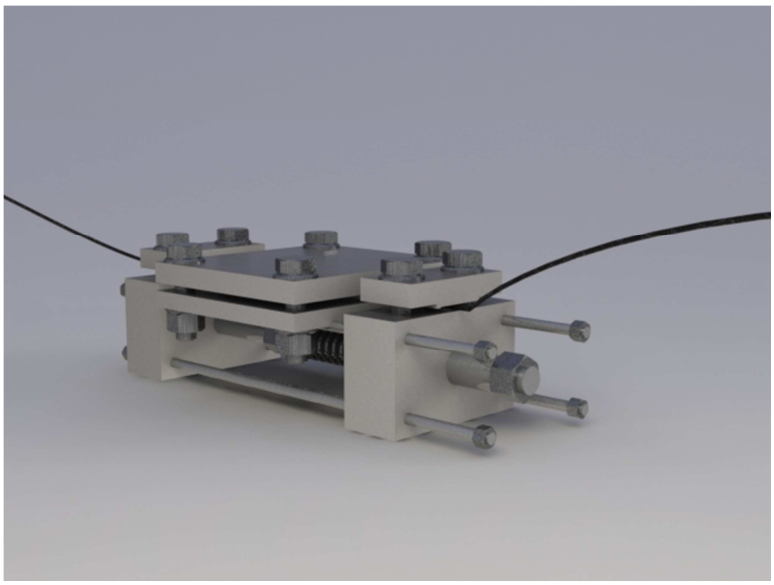


Figura 5.2 - *Set-up de ensaio.*

Este "set-up" está dividido em dois componentes principais:

i) O componente de tração, que simulará a tensão exercida no material compósito durante o processo de enrolamento filamentar. Este componente possui uma mola que permite a realização de ensaios com condições diferentes de tração.

Cuidados de projeto:

- O efeito de torção foi minimizado através da utilização de guias metálicas com baixo atrito.
- O sistema de fixação da fibra foi desenhado de forma a evitar grandes concentrações de tensões no material compósito.
- A estrutura tem uma geometria simples e elementos normalizados para uma fácil produção.

[2] Os desenhos de definição 2D encontram-se no Anexo **B.**

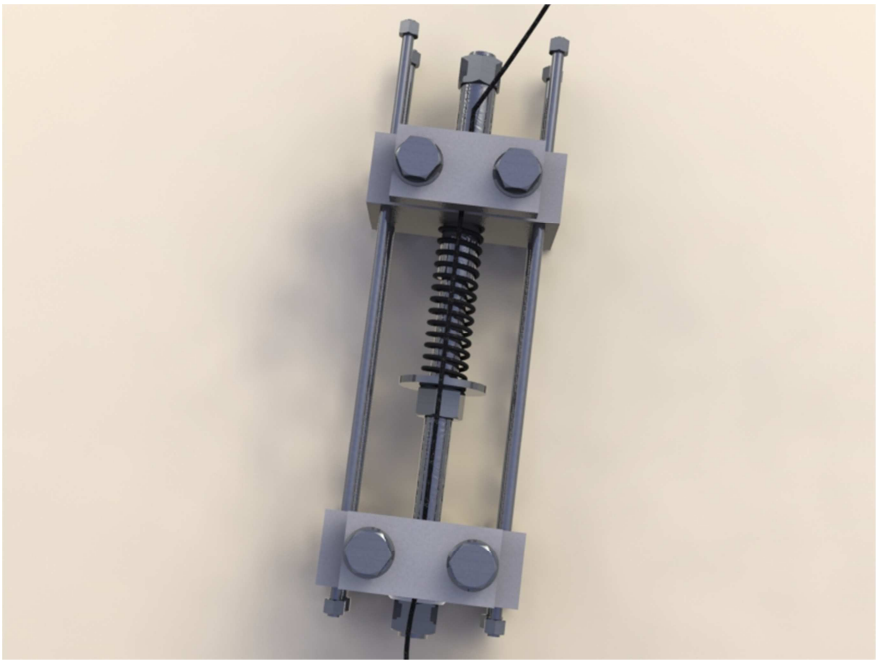


Figura 5.3 - *Componente de tração do "Set-up".*

ii) O componente de compressão, que simulará a compressão das fibras devido a sobreposição das diferentes camadas de compósito.

Cuidados de projeto:

- A estrutura apoia-se sobre os guiamentos de forma a não transferir o seu peso próprio para fibra.
- A estrutura não introduz nenhum efeito na fibra para além da compressão.
- Permite a desmontagem do componente de tração para análises individuais de tensão/compressão.
- O sistema de fixação da fibra foi desenhado de forma a evitar grandes concentrações de tensões.
- A estrutura tem uma geometria simples e elementos normalizados para uma fácil produção.

5.1.1.3. Escolha das Molas

Para a realização da tensão na fibra, o sistema utiliza uma mola de compressão, contudo com a necessidade de aplicar uma tensão de valor variável e conhecido é necessário a escolha de uma mola com características bem definidas. Para isso foram escolhidos dois grupos de molas do fornecedor MIZUMI®.

- Mola de compressão WH27-100
  - ΔLmax= 25%
  - F_{max}= 441,3 N
  - $D_{exterior}$=27 mm
  - $d_{espiral}$ = 4.0 mm
  - K = 14,7 N/mm;



Figura 5.4 – *Mola WH27-100.*

- Mola de compressão WH22-100
  - ΔLmax= 25%
  - F_{max}= 117.7 N
  - $D_{exterior}$= 22 mm
  - $d_{espiral}$ = 2.3mm
  - K = 2.9 N/mm;



Figura 5.5 – *Mola WH22-100.*

É de referir, que a primeira mola permite aplicar uma força superior, enquanto que a segunda permite uma maior controle da força aplicada, devido a ter uma constante elástica (k) menor. O Δl aplicado na mola será controlado pelo passo da porca no veio principal com valor de 1.5mm.

5.1.1.4. "Set-up" final após produção

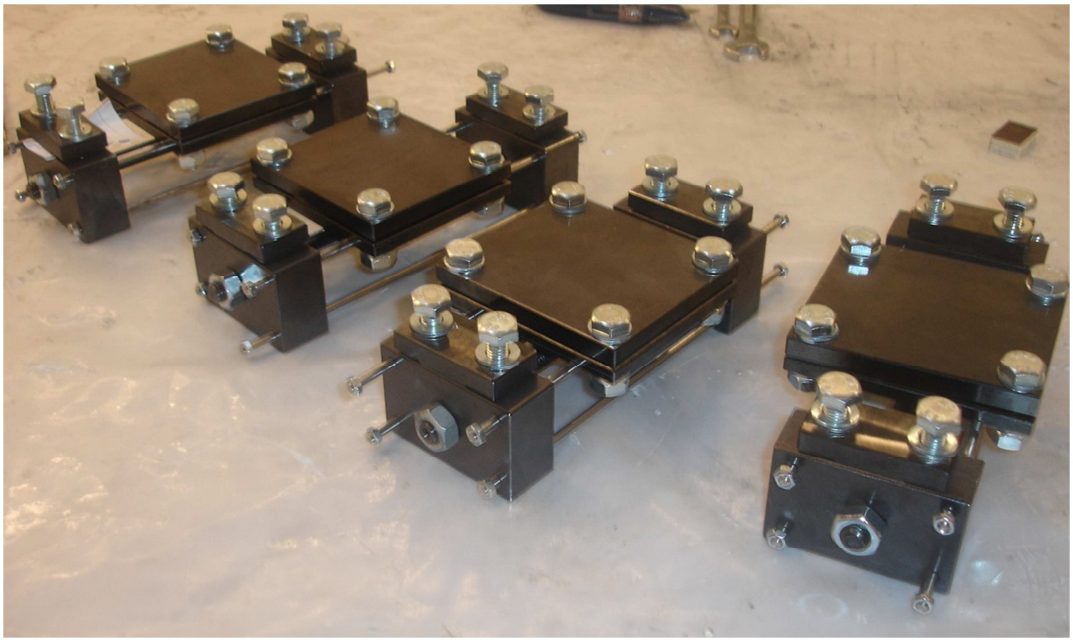


Figura 5.6 – *"Set-up" após produção.*

5.1.2. Calibração das Molas

Visto os provetes serem traccionados através da força exercida por uma mola já escolhida na secção 5.1.1.3, foi necessário realizar a sua calibração para estar assegurada essa força.

Para isso utilizou-se um dinamómetro que mediu a força exercida pela mola quando aplicado a esta um ΔL conhecido.

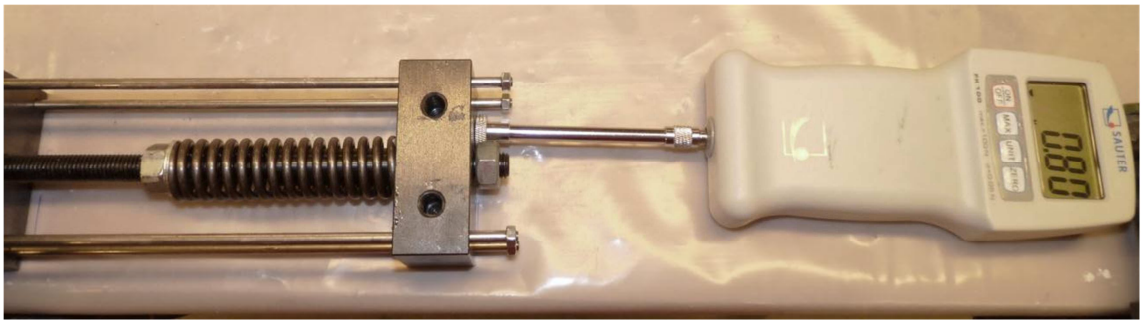


Figura 5.7 - *Calibração das molas.*

Como se veio a verificar, as molas respeitavam as características dadas pelo fabricante, podendo ser utilizadas na realização dos ensaios estando o valor da força assegurado.

5.1.3. Método de produção de provetes e realização de testes

Especial atenção foi dada à forma da produção de provetes em material compósito, que simulam o processo de enrolamento filamentar, contendo um sensor de fibra ótica embebido. Este procedimento teve um desenvolvimento contínuo de modo a se eliminar todo o tipo de variáveis que pudessem influenciar os resultados. Para isso foram realizados ensaios de teste, que permitiram uma otimização do processo de fabrico dos provetes levando a resultados coerentes e consistentes.

Em seguida, é descrito o método base de fabrico dos provetes, bem como todas as fases onde foram efetuadas medições e testes.

5.1.3.1. Preparação dos sensores óticos com rede de Bragg

Os sensores óticos, atenciosamente produzidos pelo INESC Porto, são entregues com uma rede de Bragg inscrita com o pico de refletividade num comprimento de onda de 1550.50 ± 0.5 nm. Contudo, necessitam de ser ligados a conectores que permitem a ligação ao sistema de interrogação do sensor ótico.

Para se realizar a ligação entre a fibra ótica e o conector é utilizado o equipamento "*Compact Fusion Splicer Type 25e*" produzido por *Sumitomo Electric"*, para isso ambas as extremidades dos cabos são descarnadas, limpas e cortadas, de modo a que possam ser fundidas sem perda significativa na transmissibilidade do sinal. Finalmente, a zona de ligação é reforçada e o sensor devidamente identificado.

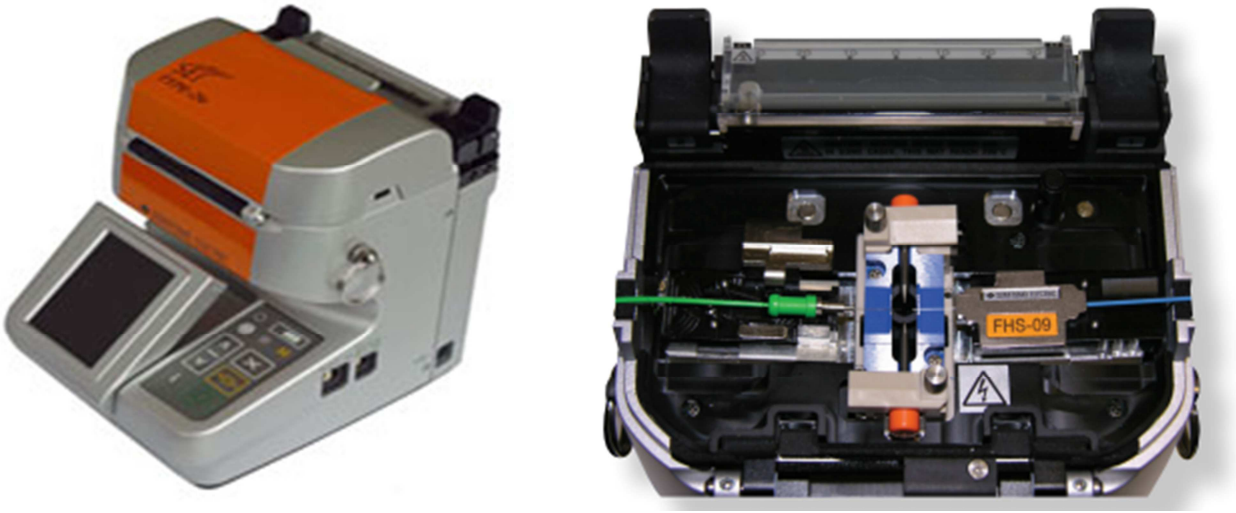


Figura 5.8 - *Equipamento de fusão da fibra óptica [20].*

5.1.3.2. Preparação dos provetes

Para a produção dos provetes, o "set-up" foi devidamente limpo e colocou-se desmoldante para uma maior facilidade da libertação dos provetes. É cortado através de rovings de material utilizado no processo de enrolamento filamentar, a quantidade necessária de material compósito e depositado no set-up juntamente com o sensor ótico.

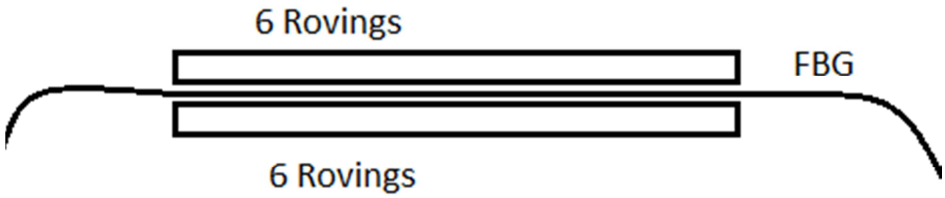


Figura 5.9 – *Estrutura do provete.*

O provete "standard"[3] foi produzido com 100 mm de comprimento, 20 mm de largura, 1.5 mm de espessura e para isso são cortados à medida 6 porções de roving que compõem uma camada. O provete por sua vez contem duas destas camadas estando o sensor na interfase das duas camadas como mostra a Figura .

Por sua vez, os valores de variação do comprimento de onda são medidos em todas as etapas de produção de provetes, de forma a ser estudada a evolução da deformação no sensor ótico e sua respetiva gama de funcionamento, durante o processo de fabrico dos provetes.

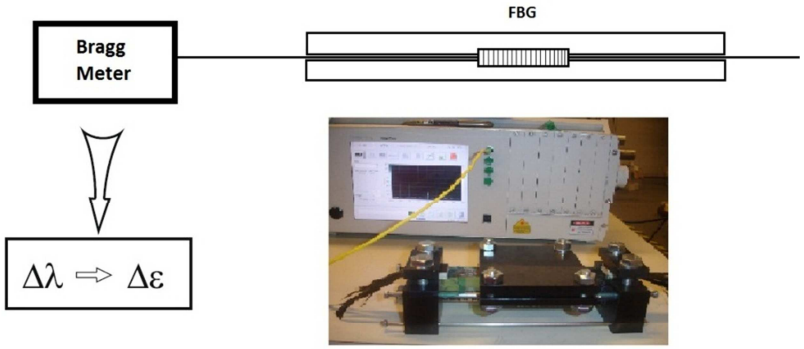


Figura 5.10 – *Embebimento de sensor ótico no compósito.*

[3] Apesar da maioria dos provetes serem produzidos de acordo com descrito, estas características podem variar, logo todos estes parâmetros estão detalhados no CD em Anexo.

Após a colocação do material compósito e do sensor de fibra ótica, o provete é fixado ao "set-up" onde lhe foram exercidas diferentes combinações de força longitudinal e de compressão axial.

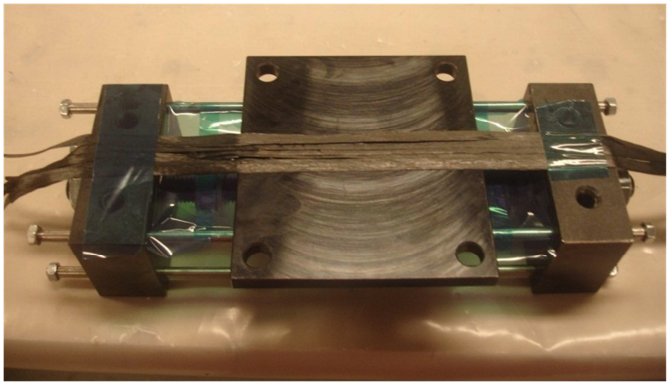


Figura 5.11 – *Colocação do material compósito e do sensor ótico no "set-up".*



Figura 5.12 – *Aplicação de força longitudinal e compressão axial no provete.*

5.1.3.3. Processo de cura

Após os provetes estarem colocados no "set-up" com uma determinada combinação de força longitudinal e compressão radial, estes são colocados a curar de acordo com as especificações da resina utilizada.[4]



Figura 5.13 - *Monitorização do processo de cura dos provetes.*

Com o sensor ótico já embebido no material compósito, o processo de cura é monitorizado em contínuo.

Pretende-se estudar todos os fenómenos presentes no mesmo, desde entender como o sensor é afetado por toda a contração e expansão do material do provete, que terá influência na gama de utilização do sensor, ao facto de se tentar também perceber em que ponto se dá a adesão do sensor ao material e se esta vai condicionar a transmissibilidade do sinal.

[4] Nota: A descrição do processo de cura de cada provete pode ser encontrada no CD anexo ao relatório.

5.1.3.4. Desmontagem e preparação dos provetes para ensaio de tração

Após a cura, os provetes são extraídos do "set-up" e é lhes retirada a tensão longitudinal e a pressão radial. Posteriormente, é lido o valor da variação do comprimento de onda, que irá permitir o estudo da tensão residual presente no material compósito após a cura e como o sensor é influenciado pelas diferentes condições de processo de fabrico dos provetes.



Figura 5.14 - *Provete após ser retirado do "set-up".*

Sendo a etapa seguinte o ensaio mecânico dos provetes, estes necessitam de ser preparados. Para isso foram colados "tabs" metálicos na extremidade dos provetes utilizando adesivo estrutural "ADH89", que garante que a tensão se transfira da máquina para o provete de forma uniforme.

5.1.3.5. Ensaio de tração

Para a realização do ensaio de tração, foi utilizada a máquina de ensaios universal "*Instron 4507"*, com extensómetro automático biaxial e uma célula de carga de 200 kN, presente no laboratório de ensaios mecânicos do INEGI. Por sua vez, os provetes foram ensaiados em diferentes condições: ensaio cíclico, ensaio em degrau e ensaio até a rotura contínuo, onde o valor de deformação do provete obtido através do extensómetro da máquina de tração e o valor teórico calculado através da força exercida, são comparados com o valor obtido pelo sistema de interrogação do sensor de fibra ótica.

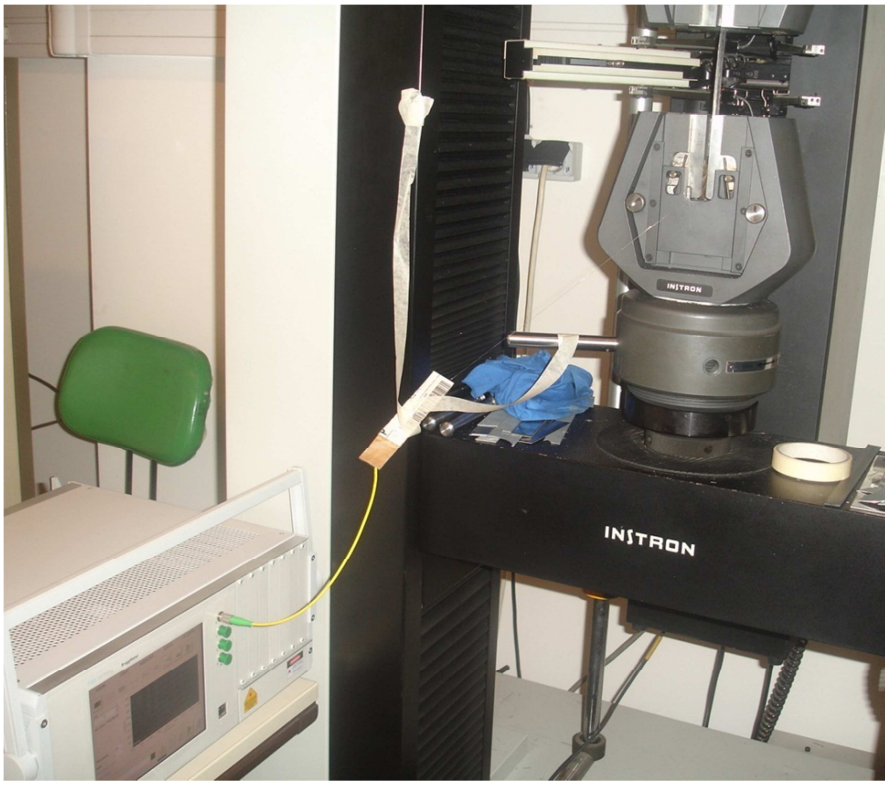


Figura 5.15 – *Ensaio de tração com monitorização do sensor ótico.*

Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 1mm/min, com uma taxa de amostragem de 5Hz., utilizando a célula de carga de 100 kN. Para haver sincronização, no "Braggmeter" foi também utilizada com uma taxa de amostragem de 5 Hz, com aquisição em contínuo, que permite posteriormente sobrepor e comparar resultados.[5]

[5] Nota: Todos os detalhes e características dos ensaios de tração realizados apresentam-se descritos no CD anexo ao trabalho.

5.1.3.5.1. Cálculo de deformação do provete

Para realizar a calibração e validação dos sensores de fibra ótica, os valores de deformação obtidos através da variação do comprimento de onda dado pelo sensor, foram comparados com a deformação real/teórica do provete.

Surge como principal preocupação a exatidão do valor de deformação obtido, tanto pelo sensor ótico, como pelo valor teórico/real retirado da máquina de ensaios. Para este efeito, foram realizados ensaios de teste para aferir a exatidão e decidir qual a metodologia a adotar.

No cálculo do valor de deformação teórico/real retirado da máquina de ensaios- "Instron", foram estudadas três metodologias[6] para o cálculo da deformação:

- Cálculo teórico através da regra das misturas.
- Metodologia segundo a norma D4018-99.
- Extensómetro automático da máquina de ensaios.

Em termos comparativos, tomemos em consideração um dos materiais utilizados. ***"Tenax-UTS50 F24 24K 1600 tex"***, com ficha técnica presente em Anexo E.

Utilizando a força exercida pela máquina de ensaio, podemos calcular a deformação através da regra das misturas [22] dada pela equação 5.1.1.

$$E_{xx} = V_f E_f + V_m E_m$$

$$E_{yy} = \frac{E_f \, E_m}{V_f E_m + V_m E_f} \tag{5.1.1}$$

Sendo E_{xx} e E_{yy} a rigidez do provete na direção x e y, E_f e E_m a rigidez da fibra e da matriz e V_f e V_m a fração volúmica de fibra e matriz.

Visto estarmos num caso de material compósito unidirecional, que foi ensaiado apenas no regime elástico e o módulo de rigidez da fibra ser bastante superior ao da matriz, podemos reescrever a equação 5.1.1 como:

$$E_{xx} = V_f E_f \tag{5.1.2}$$

Procedendo ao cálculo da deformação do provete em que:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\sigma}{E_{xx}} \tag{5.1.3}$$

[6] No anexo B , encontra-se o gráfico comparativo entre as diferentes metodologias.

Onde o calculo da tensão é dado por:

$$\sigma = \frac{F}{A_s} \tag{5.1.4}$$

Para o cálculo da área da secção resistente do provete em material compósito, considera-se que apenas o carbono que oferece resistência à deformação e sabe-se que cada roving possui 24 000 filamentos de carbono cada um com 7µm de diâmetro.

$$A_{roving} = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times 24000 = 9{,}236 \times 10^{-7}\ m^2 \tag{5.1.5}$$

Possuindo cada provete 12 “rovings”.

$$A_{provete} = 12 \times A_{roving} = 1{,}10 \times 10^{-5} m^2 \tag{5.1.6}$$

Substituindo na equação 5.1.4, e utilizando as características do material em Anexo .

$$\varepsilon_{xx} = \frac{F}{A_s E_{xx}} = \frac{F}{1{,}1 \times 10^{-5} \times 238{,}46 \times 10^{9}} \tag{5.1.7}$$

Este método toma em consideração que os valores teóricos do número de filamentos e o seu diâmetro se mantêm constantes e são conhecidos, contudo é sabido que devido ao método de produção é muito difícil para os produtores do material manter este padrão. Para eliminarmos esta incerteza comparamos os valores da deformação com o calculado pela norma “*D4018-99 Standard Test Methods for Properties of Continuos Filament Carbon and Graphite Fiber Tows”* [21], presente no anexo D, onde o cálculo da secção resistente é feito por uma metodologia diferente, com valores mais exatos devido a sua fácil natureza de medição.

Segundo a norma [21], no ponto 12.3.2

$$Tensão\ de\ Cedência\ (MPa) = A \times P \times \frac{\rho_f}{MUL} \tag{5.1.8}$$

Onde,

P- Força exercida pela máquina de ensaios, N.
A- Fator de correção, neste exemplo A=1.
ρ_f – Densidade da fibra (g/cm^3).
MUL- Peso da fibra por metro (g/m).

Podemos então considerar sendo a área da secção resistente,

$$A = \frac{MUL}{\rho_f} \tag{5.1.9}$$

Utilizando as propriedades dadas pelo fabricante, presente em Anexo E.

$$A_{roving} = \frac{1.6421}{1.79} \times \frac{1}{10^{-6}} = 9{,}17 \times 10^{-7} m^2 \tag{5.1.10}$$

Logo, considerando os 12 “rovings” por provete.

$$A_{provete} = 1{,}1008 \times 10^{-5}\ m^2 \tag{5.1.11}$$

Obtendo-se assim:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{F}{1{,}1008 \times 10^{-5} \times 238{,}46 \times 10^{9}} \tag{5.1.12}$$

Podemos concluir que a utilização da norma para o cálculo da deformação do provete é a melhor opção, por considerar as pequenas incertezas e variações das propriedades das fibras devido ao processo de fabrico. Apesar da diferença ser pequena na área da secção resistente, após comparar os dois métodos obteve-se um erro de cerca de 5-6 % quando a deformação é calculada pelo método das misturas.

Como terceiro método de medição da deformação, que apesar de ser o mais exato, é o método que mais dificuldade de utilização acarreta, pelo facto de o provete ser composto por várias camadas de material, que por vezes não tem um comportamento homogéneo devido a deslizamento entre essas camadas. Consequentemente, a utilização de extensómetros cingiu-se a um método de confirmação de resultados e de segundo plano.

5.1.3.5.2. Conversão da variação do comprimento de onda em deformação

Para o cálculo da deformação do provete através do sensor ótico com rede de Bragg, ao qual será comparado o valor da deformação real do provete, é necessária a conversão da variação do comprimento de onda dado pelo sistema de interrogação do sensor.

Sendo o comprimento de onda central da banda refletida, λ_B, descrito analiticamente pela condição de Bragg [23]:

$$\lambda_B = 2\eta_{eff}\Lambda_B \tag{5.1.13}$$

Onde η_{eff} representa a média do índice de refração efetivo do núcleo e Λ_B é o período da rede. Escrevendo o fator da deformação longitudinal [24]:

$$G_\varepsilon = \frac{1}{\lambda_B}\left[\frac{\delta\lambda_B}{\delta_s}\right]_\tau = 0{,}78 \times 10^{-6}\ \mu\varepsilon^{-1} \tag{5.1.14}$$

Como os sensores fornecidos pelo "INESC Porto" têm inscritas redes de Bragg com um comprimento de onda central de espectro 1550.50 ± 0.5 nm, podemos escrever a sensibilidade a deformação como:

$$S = 1{,}1 \times 10^{-3} nm/\mu\varepsilon \tag{5.1.15}$$

5.1.4. Plano de trabalho

Para a calibração e validação dos sensores, foi feito um estudo paramétrico das diferentes variáveis presentes no processo de enrolamento filamentar, para se garantir que os sensores conseguem prever o comportamento do reservatório em qualquer situação, bem como conseguir uma leitura dos fenómenos presentes no processo de forma independente.

Para isso, os parâmetros analisados são:

Material:

- Tenax-UTS50 F24 24K 1600 TEX (Fibra Carbono Prépreg).
- HPXSS EPX 15-360 TEX (Fibra de Vidro Prépreg).
- *FV + PP (Termoplástico).

Tensão na fibra:

- 0 N.
- 180 N.
- 360N.

Pressão radial:

- 0 KPa.
- 1 KPa.

Nº de camadas:

- 2.
- 6.

Por outro lado, os fenómenos que também se deu especial atenção foram:

- A acomodação da fibra.
- A forma de se colocar o sensor.
- A influência da deformação residual na gama de utilização do sensor.

5.2. Resultados e Discussão da Validação e Calibração dos Sensores

5.2.1. Força Longitudinal e Pressão radial

Os primeiros parâmetros estudados foram a força longitudinal e a pressão radial, simulando as diferentes forças presentes no processo de enrolamento filamentar[7]. Para o estudo do parâmetro da tensão longitudinal, foram produzidos provetes onde foi aplicada uma força inicial de 0, 180 e 360 N, que corresponde a uma tensão de 0, 15 e 30 N por roving, gama utilizada no processo de enrolamento filamentar.

Como se pode verificar na figura 5.16, que descreve a monitorização da cura nas 3 configurações de força longitudinal na fibra, não existe diferença significativa na variação da deformação residual antes e após a cura, logo pode-se considerar que a tensão e consequentemente a deformação aplicada antes do processo de cura fica "congelada" após desmontar o provete do set-up, como é descrita na figura 5.17.

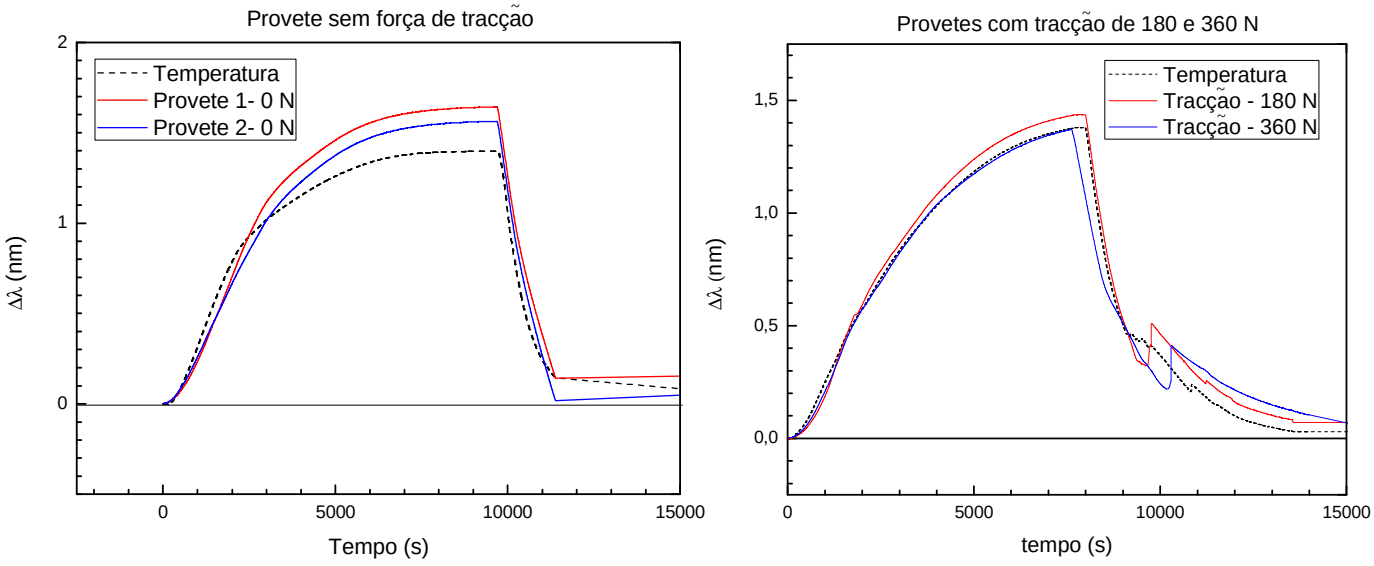


Figura 5.16-*Evolução da tensão no processo de cura com diferentes condições de força longitudinal.*

[7] Para cada característica estudada foram realizados pelo menos 5 ensaios, para o resultado ter validade estatística.

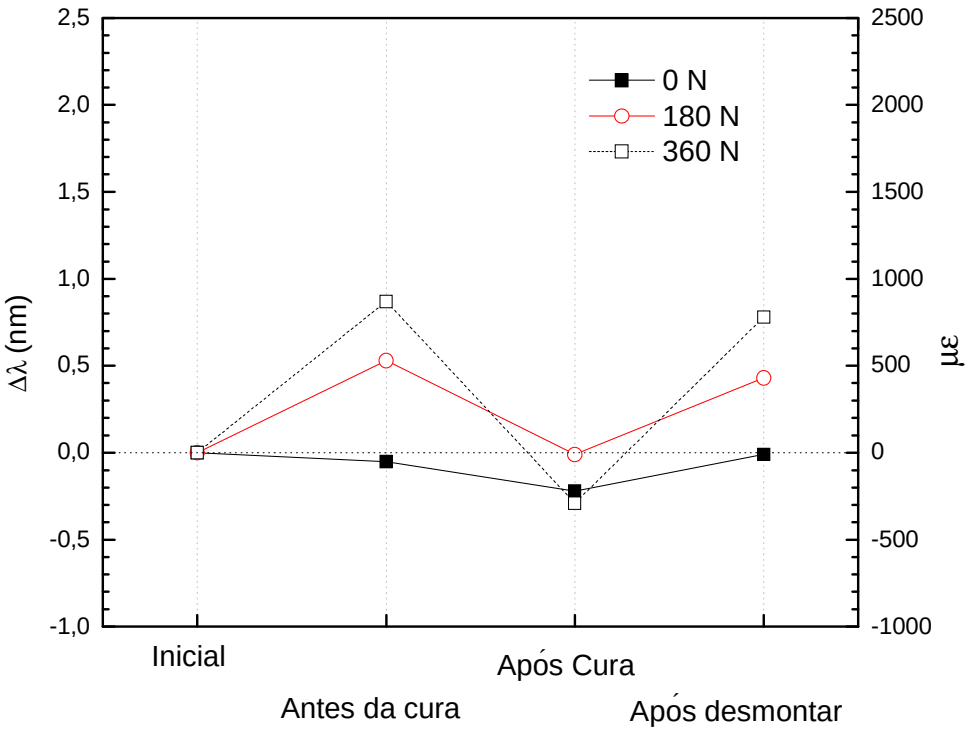


Figura 5.17 – *Variação do comprimento de onda durante todo o processo de fabrico dos provetes.*

Fazendo uma avaliação à gama de utilização do sensor e sabendo que o sensor tem a capacidade máxima de medição de 1,2 a 1,5%, assunto abordado mais a frente neste relatório, que corresponde a cerca de 12 nm de variação de comprimento de onda. Na situação de força longitudinal de 360 N, a variação de comprimento de onda "consumida" é de aproximadamente 0,8 nm, podemos concluir que durante o processo de fabrico estamos bastante longe de atingir uma deformação crítica para o sensor, bem como o "consumo" deste devido às tensões residuais, ser menor de 8% da gama total de medição.

A sensibilidade do FBG em relação à deformação, dada pelo declive da reta "$\nabla\lambda\ vs\ \varepsilon$" da figura 5.18, varia ligeiramente de acordo com a força exercida longitudinalmente na produção dos provetes. Isto deve-se ao facto, de no provete com maior força exercida longitudinalmente, o conjunto sensor-material encontrar-se mais ajustado, como se irá discutir mais à frente. Contudo, não se chega a alcançar 5% de diferença, podendo de uma forma minimamente realista concluir que a força longitudinal produzida pelo processo de enrolamento filamentar não vai influenciar significativamente a resposta dos sensores FBG.

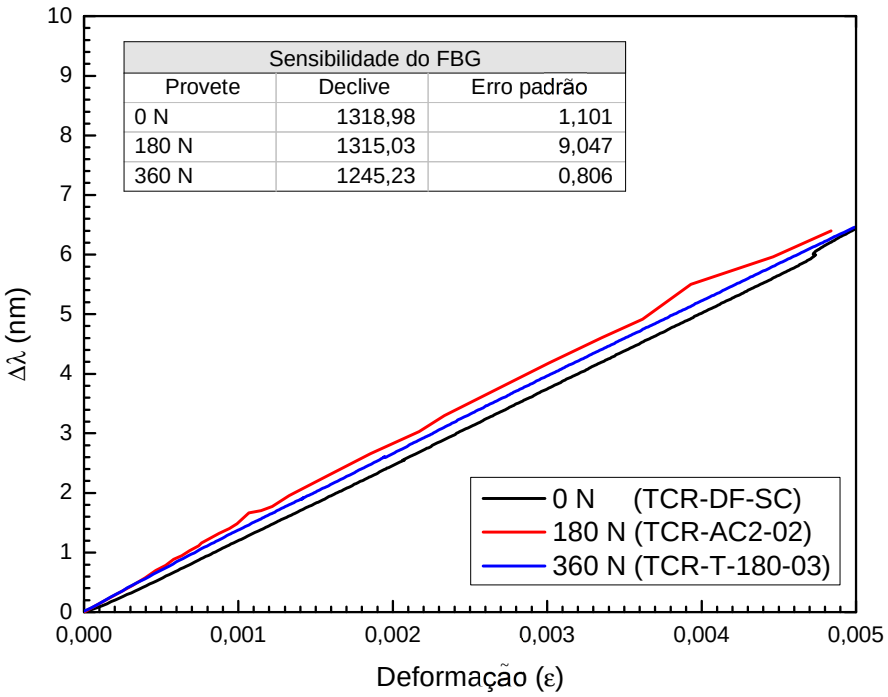


Figura 5.18- *Ensaio de tração em provetes produzidos com diferentes forças longitudinais.*

Para a análise do efeito da compressão no sensor, foram realizados alguns testes utilizando a componente de compressão do set-up e consultando o trabalho já realizado por A. Vieira [25].

Como descrito por [25; 26; 28], o revestimento do FBG influencia a sensibilidade do sensor durante e depois do embebimento. Trabalho já realizado, demonstra que existe uma grande influência na sensibilidade à deformação dependendo do tipo de revestimento e ao fenómeno de birrefringência, que provoca uma distorção no espectro de luz do sensor FBG [26]. Este fenómeno surge principalmente em situações de gradiente de tensão provocado pela presença de tensões residuais criadas no processo de cura ou devido à compressão do material.

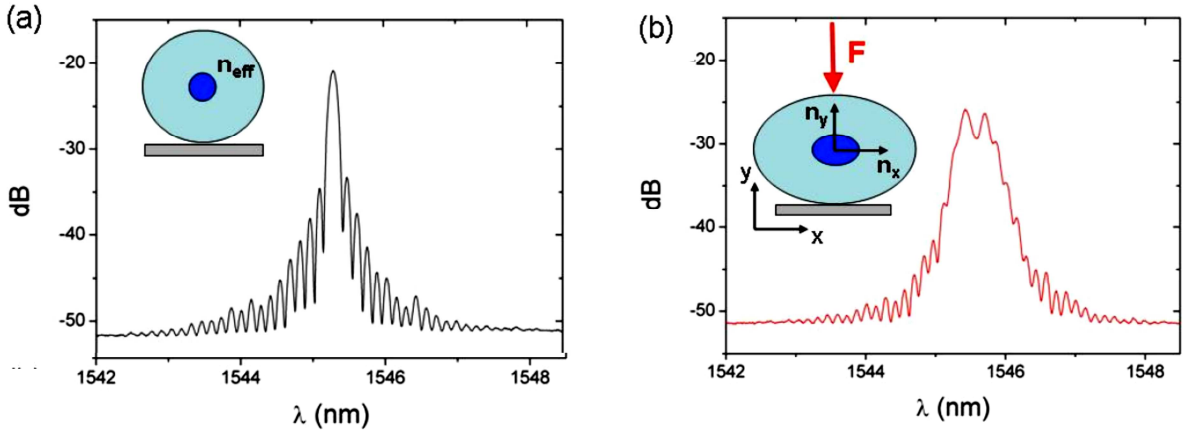


Figura 5.19- *Efeito da Birrefringência da fibra óptica: (a) sem compressão, (b) compressão [32].*

D.H. Kang [27], observou que num ensaio de flexão com o aumento do gradiente de deformação, promove-se a diminuição da intensidade da onda refletida e aumenta o número de picos de reflexão, provocando erros de medição.

Nos ensaios realizados, após a aplicação da pressão radial, não se verificou alteração no comprimento de onda refletido mas apenas surgiu uma pequena diminuição na potência ótica. Por outro lado, no trabalho realizado por A. Vieira [25], foi realizado um teste de compressão de 500 kPa ao sensor ótico, embebido em placas de material compósito.

Como podemos verificar na Figura 5.20, existe uma diminuição de potência ótica e surgem novos picos de onda refletida.

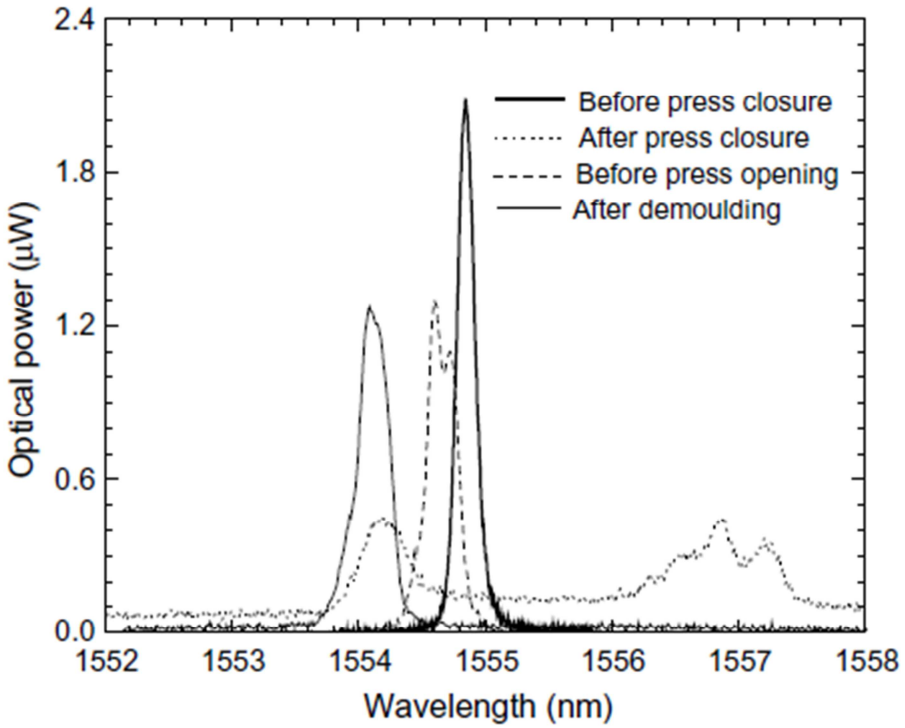


Figura 5.20- *Espectro de reflexão durante uma compressão de 0.5 N/mm^2 num FBG de 10 mm.[25]*

Podemos concluir, que pelo facto das pressões exercidas no enrolamento filamentar (1kPa) serem bastante inferiores às testadas (500kPa) por A.Vieira [25], não se verifica o fenómeno de birrefringência. Contudo, se devido à curvatura do reservatório, se verificar um aumento de erros de medida, pode-se utilizar sensores com uma zona de gravação (“gratting”) de tamanho menor, que irá reduzir este efeito, como já estudado por Y. Okabe [29] .

5.2.2. Acomodamento e forma de solicitação do sensor

Como já foi visto, as combinações de tensão e compressão no sensor provenientes do processo de enrolamento filamentar não provocam alterações significativas no comportamento do FBG. Por este motivo, os provetes seguintes foram produzidos sempre com a mesma força de tração (180 N) e pressão radial (suficiente para se limitar a geometria ao provete).

De seguida, foi estudado o comportamento do sensor a diferentes solicitações e a sua acomodação, para isso foram realizados 3 tipos de ensaios[8]:

- Ensaio cíclico (a).
- Até à rotura em patamares (b).
- Até à rotura de forma contínua (c).

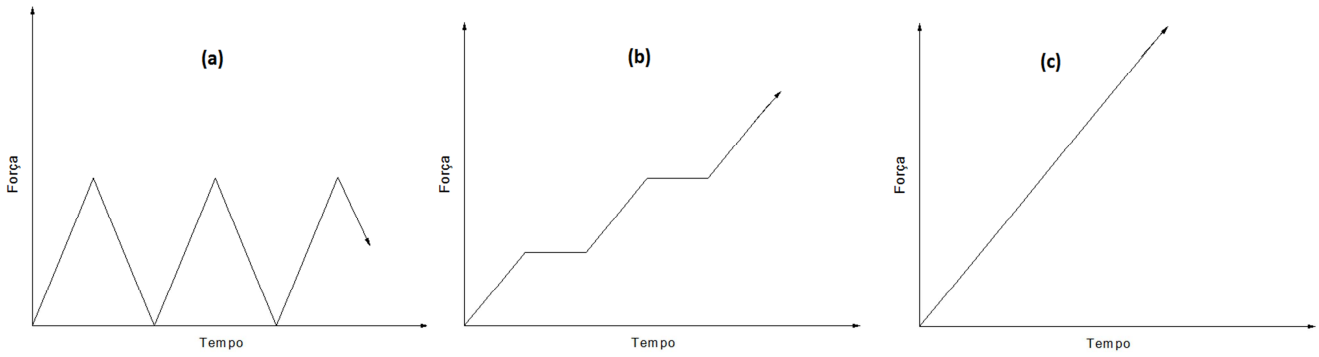


Figura 5.21 - *Tipos de ensaio de tração realizados aos provetes.*

No ensaio cíclico, como principal objetivo tentou-se observar se ocorreria algum tipo de acomodação/ajuste do sensor, produzindo assim, algum tipo de histerese na resposta. Para isso, foram realizados ensaios em que o provete é carregado e descarregado a uma velocidade de 1mm/min até o sensor FBG atingir uma variação de comprimento de onda de 2 nm.[9]

[8] Para cada característica estudada forma realizados pelo menos 5 ensaios, para o resultado ter validade estatística.

[9] O registo de todos os valores dos ensaios encontra-se no CD em Anexo com este relatório.

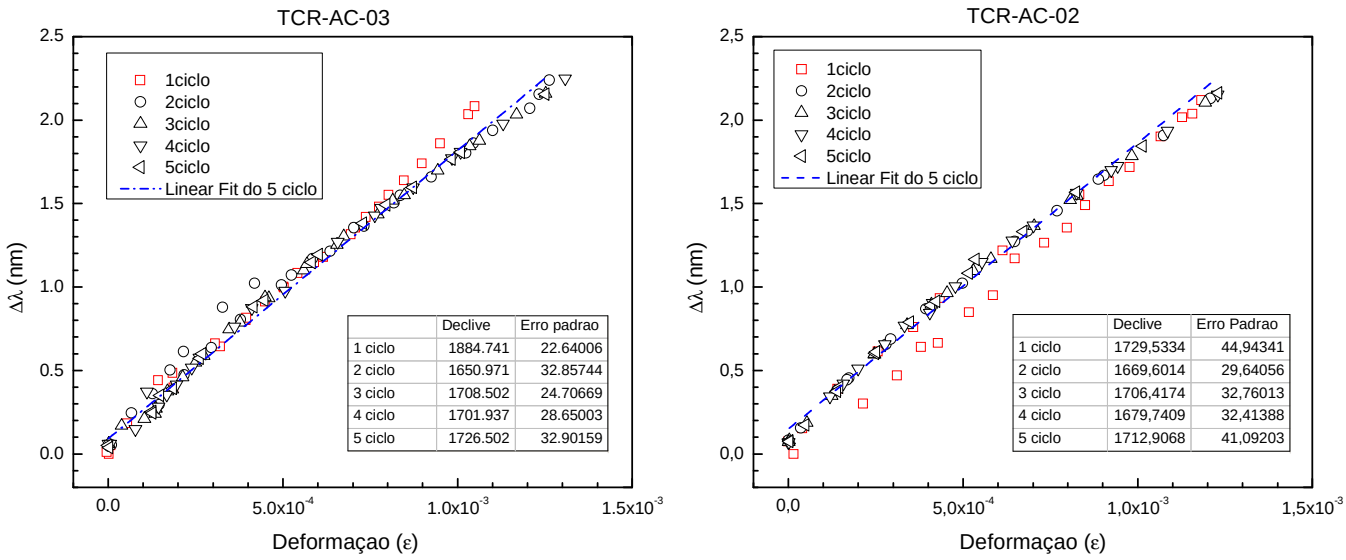


Figura 5.22 – *Ensaio de Ciclos para estudo do acomodamento do sensor.*

Como se pode verificar na Figura 5.22, existe uma acomodação do sensor nos primeiros ciclos de carga, convergindo a partir do 3º ciclo para uma reta que traduz o funcionamento do sensor. Esta característica só se verifica para baixos níveis de deformação, pois ultrapassando um nível de deformação, o sensor também se acomoda, traduzindo corretamente a deformação do provete.

Concluindo, quando for feita a implementação de sensores no reservatório produzido por enrolamento filamentar, deve-se efetuar 3 a 4 ciclos de baixa pressão para se garantir que o sensor e o material estão corretamente ajustados e se obtém uma melhor qualidade de medição.

Após esta etapa, foi estudada se a resposta do sensor é influenciada pela forma de solicitação, para isso, provetes com e sem ciclos de acomodamento foram ensaiados, onde a solicitação foi em patamares até à rotura ou de forma contínua até a rotura.

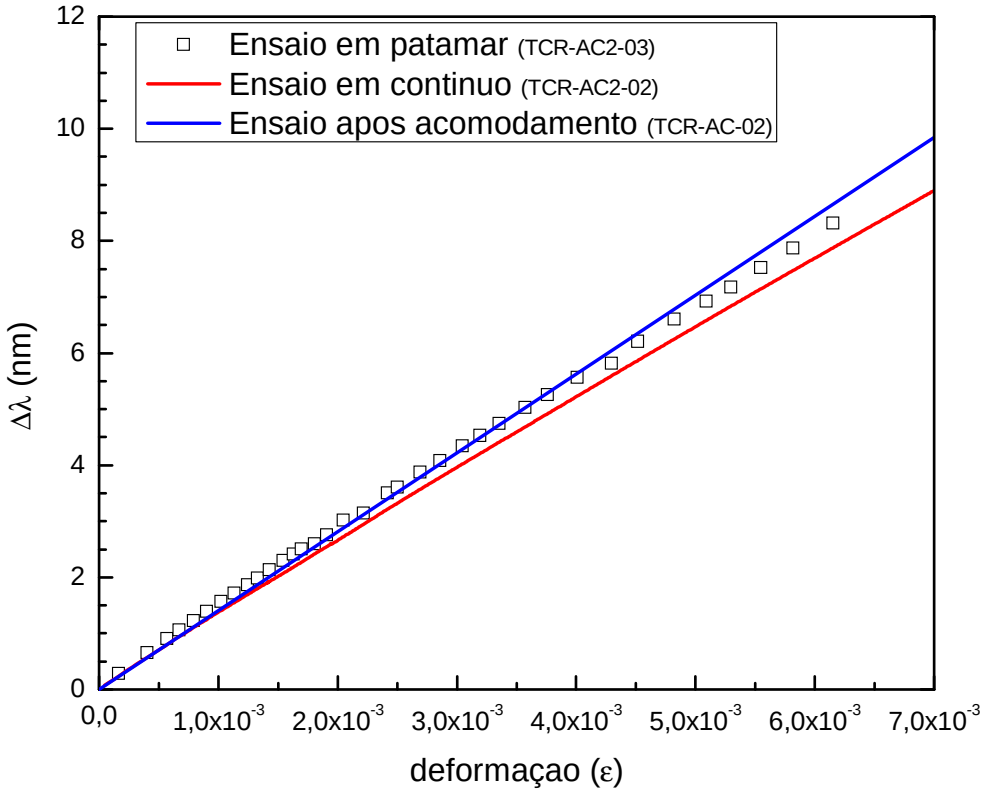


Figura 5.23 – *Ensaio de tração em patamar e contínuo até à rotura.*

Tabela 9- *Sensibilidade do sensor em relação a forma de solicitação.*

Sensibilidade Calculada	**Experimental (nm/ε)**	**Erro (square error, N=3)**
	MEAN ± SEM	
Ensaio em patamar	1363,53 ± 14,45	0,999
Ensaio em contínuo	1272,07 ± 8,10	0,997

Analisando a Figura 5.23 e a Tabela 9, podemos verificar que nos três casos a resposta do sensor FBG tem uma diferença de cerca 7%. Pode-se considerar que o sensor não é significativamente influenciado pela forma de solicitação, sendo aconselhável fazer alguns ciclos de carga para que haja um melhor ajuste entre o material e o sensor.

5.2.3. Relação do valor de deformação teórico/real com a deformação medida pelo FBG em diferentes materiais.

Como já foi referido, a principal dificuldade no embebimento de sensores óticos no material compósito é a correta transferência de carga e de deformação do material hospedeiro para o sensor. Dependendo da natureza dos materiais e do revestimento do sensor, a transferência de deformação através da interface sensor-material poderá variar.

Vieira [25], demonstrou que um sensor ótico quando embebido num material compósito, tem uma pior transferência de deformação se este for revestido, como se pode verificar na Figura 5.24, daí apenas utilizarmos sensores óticos não revestidos para a monitorização do reservatório.

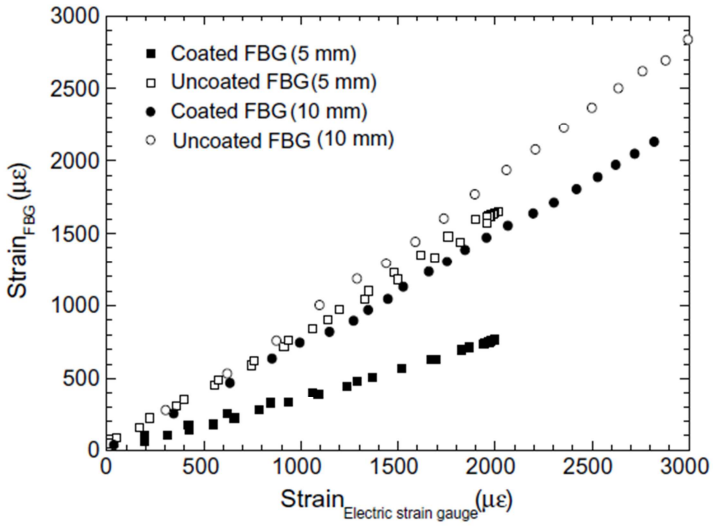


Figura 5.24 – *Resposta do FBG durante um ensaio de tração[25].*

Contudo, consegue-se verificar que mesmo com a utilização de sensores não revestidos, existe uma diferença entre a deformação obtida pelo sensor FBG e a deformação real do provete. Tal deve-se a interface sensor-material não ter uma ligação perfeita e as diferentes rigidezes dos materiais em questão, como descrito por Luyckx [2; 4].

Nesta etapa do trabalho, realizou-se a análise da relação de deformação real e da deformação obtida pelo sensor em diferentes materiais, com o objetivo de se encontrar uma regra que permitisse, dependendo do material, chegar a um valor de deformação real do reservatório a partir da variação do comprimento de onda obtido.

Para isso foi calculado um rácio dado por:

$$r = \frac{\varepsilon_{provete}}{\varepsilon_{FBG}} \tag{5.2.1}$$

Logo, se este rácio (*r*) tender para o valor de 1, significa que a transferência de deformação do provete para o sensor, se está a dar na perfeição.

Na Figura 5.25, foi analisado o pré-impregnado de carbono (TENAX-UTS50)[10], em que a deformação do provete é calculada segundo a norma D 4018-99, como já referido no tópico 5.1.3.5.2, no ensaio em ciclos e no contínuo até a rotura.

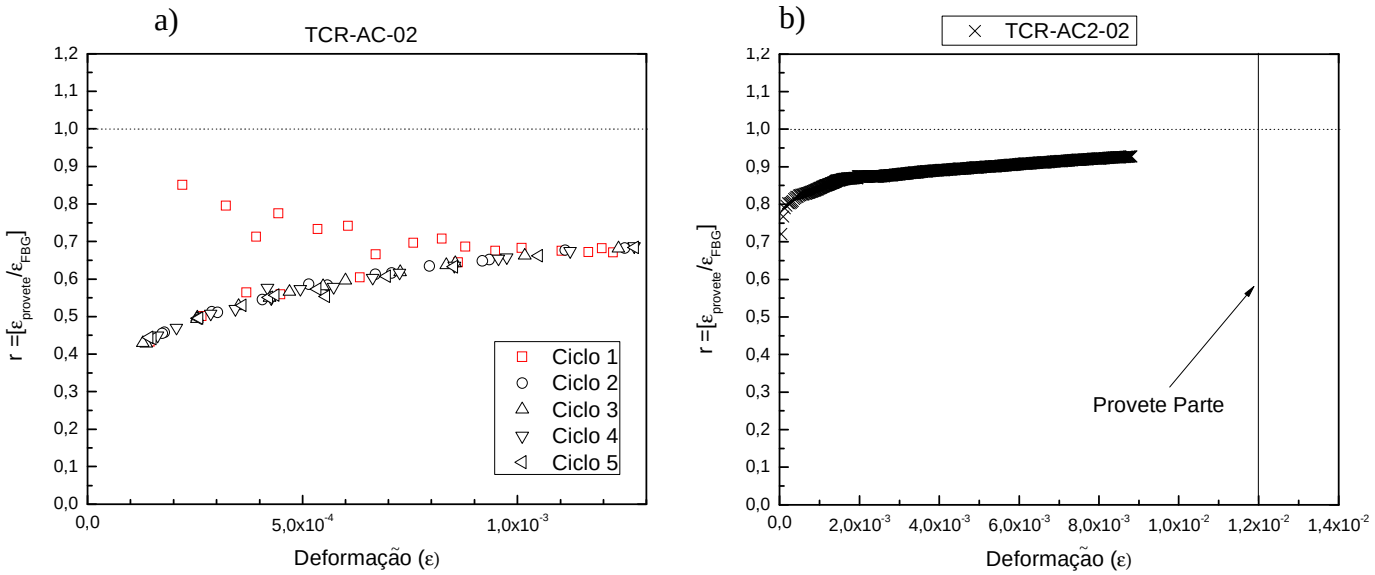


Figura 5.25 – *Rácio deformação no ensaio de tração de pré-impregnado de material compósito em fibra de carbono a)Ensaio cíclico, b)Ensaio até a rotura.*

Ao analisar a Figura 5.25, verifica-se que existe uma diferença entre o valor de deformação do provete e do valor medido pelo FBG. Isto deve-se ao facto de existir uma diferença na rigidez das matérias, que promove uma adesão e transferência de deformação incompleta, como já descrito por Luyckx [2; 4]. Por outro lado, tal como já tinha sido abordado no tópico 5.2.2, consegue-se verificar novamente o fenómeno de acomodamento da fibra em pequenos valores de deformação.

Contudo, é possível verificar que com o aumento da deformação, o rácio (*r*) tende a estabilizar para um valor próximo de 1, logo, é possível fazer uma correção ao valor medido pelo FBG, de modo a que ele traduza de forma mais próxima do real a deformação sofrida pelo material compósito em questão, como mostra o esquema seguinte.

[10] Propriedades do material no anexo E.

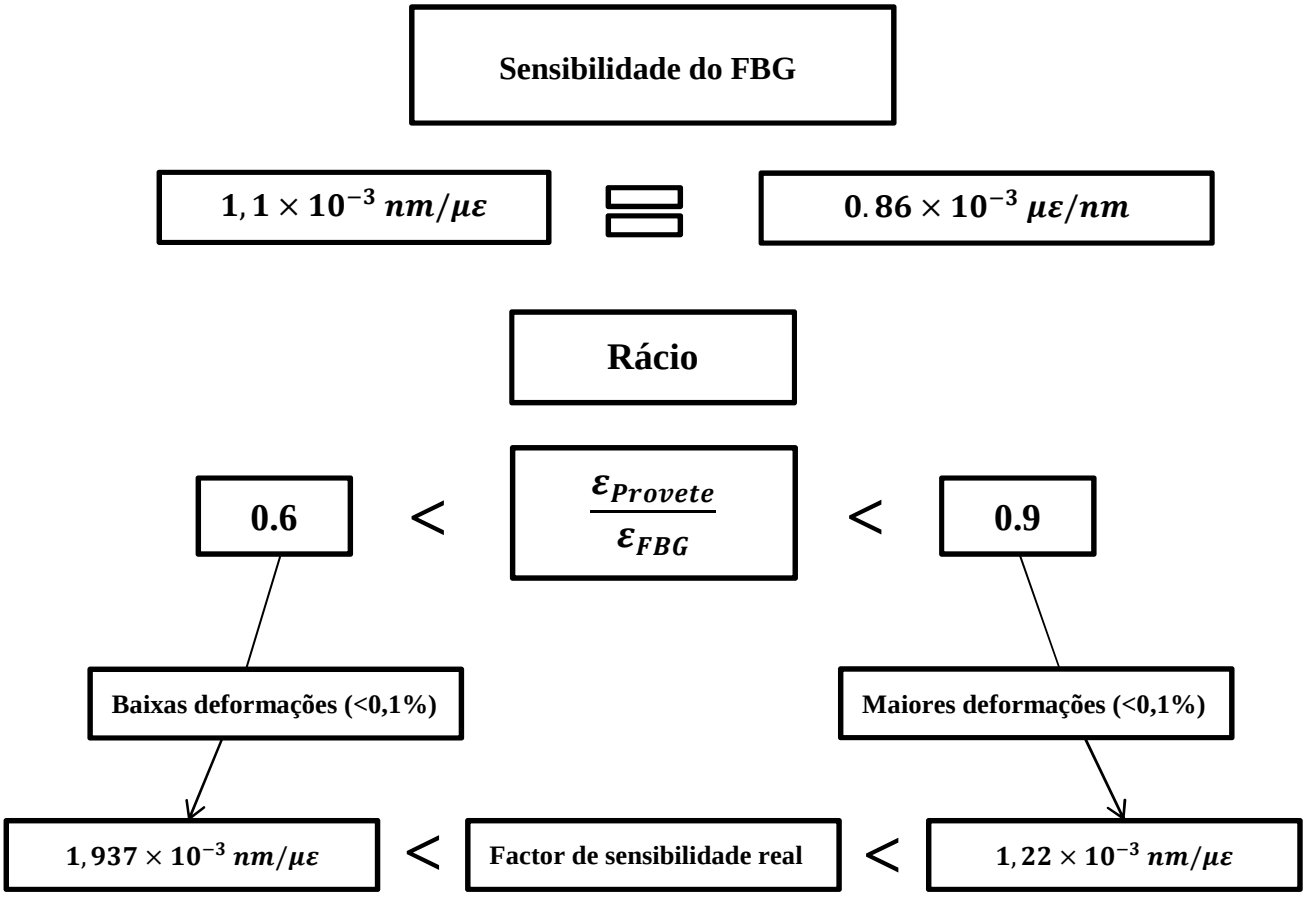


Figura 5.26 – *Correção ao factor de sensibilidade do FBG para o pré-impregnado de Fibra de Carbono.*

Analisando agora o comportamento do sensor ótico de rede de Bragg embebido em pré-impregnado de fibra de vidro (HPXSS EPX 15-360 TEX) na figura 5.26, verificamos que existe uma diferença muito menor entre os valores de deformação medida e a deformação real, isto devido a estarmos na presença de materiais com rigidez e propriedades muito semelhantes.

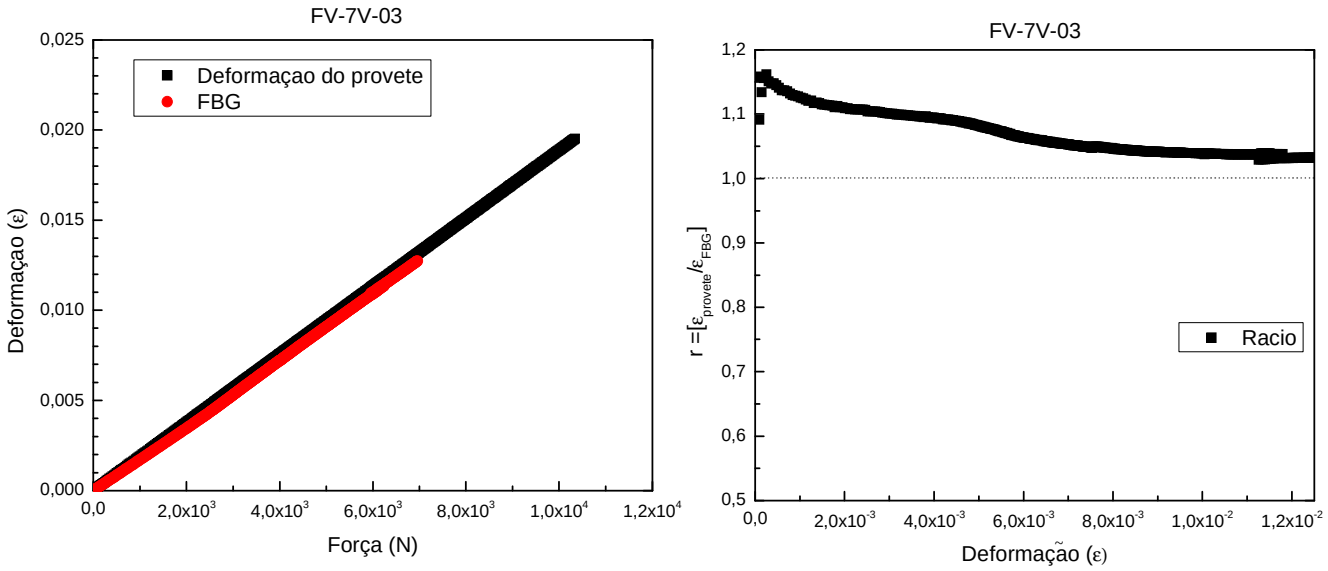


Figura 5.27- *Rácio deformação no ensaio de tração de pré-impregnado de material compósito em fibra de vidro.*

É de referir, que se verificou o contrário em relação ao ensaio elaborado em fibra de carbono, ou seja, o rácio entre deformações é superior a 1, pois antes o material hospedeiro era mais rígido que o sensor, neste caso ocorre o oposto. Contudo, neste caso, o valor de sensibilidade do sensor FBG não necessita de ser corrigido, visto estarmos relativamente próximo do valor ideal de 1.

5.2.4. Resistência do sensor à deformação

Como se verificou, o sensor tem a capacidade de traduzir a deformação do provete de forma eficaz, contudo, surge a necessidade de verificar se o sensor FBG é capaz de medir até à rotura do provete.

Segundo o fabricante do sensor (INESC), este tem uma deformação máxima de aproximadamente 1,2%. Logo, como se pode verificar na figura 5.28, é possível a utilização deste sensor no embebimento no pré-impregnado de fibra de carbono, devido a este material ter uma deformação máxima de 1,2-1,5% compatível com a deformação máxima suportada pelo sensor.

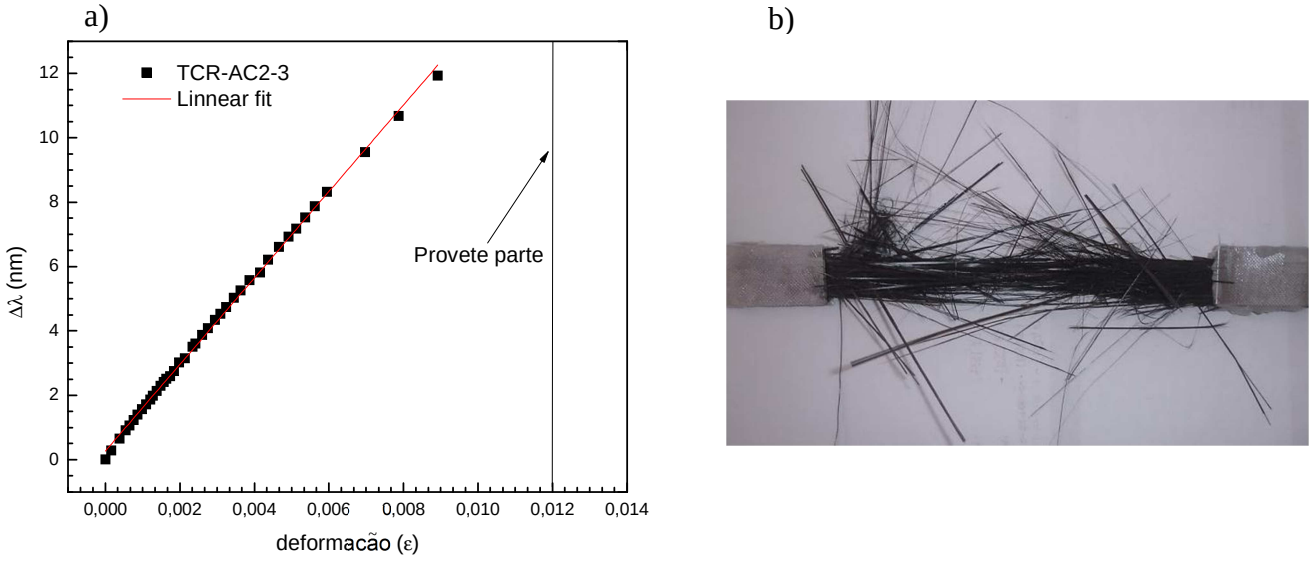


Figura 5.28- *a) Ensaio de tração do provete TCR-AC2-3; b) Foto do provete após rotura.*

Por outro lado, no pré-impregnado de fibra de vidro (figura 5.29), a deformação máxima, é de cerca de 3%, com isto, a utilização do sensor embebido neste material fica condicionada à gama de deformação máxima do sensor. Por este motivo, só será viável a utilização do sensor FBG em fibra de vidro, se não se ultrapassar em vida útil do reservatório 1.2% de deformação.

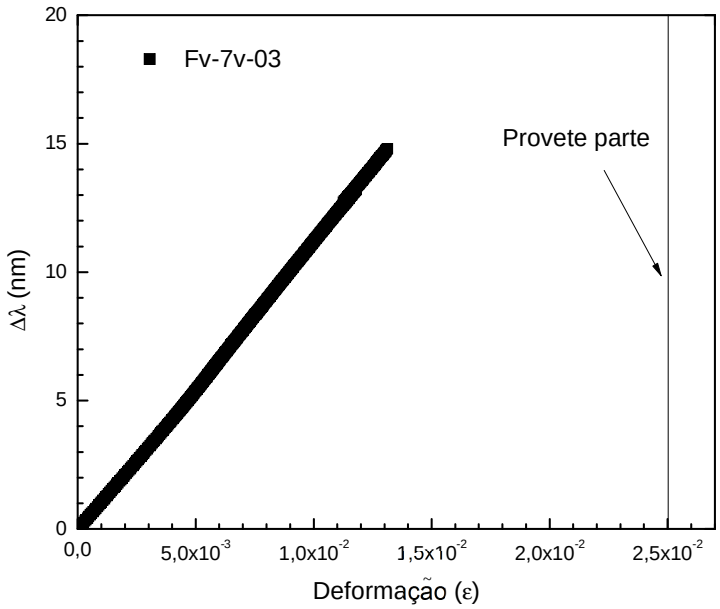


Figura 5.29- *Ensaio de tração do provete Fv-7V-03*

5.2.5. Geometria do provete e disposição do sensor

Como ultimo objetivo de estudo para a calibração dos sensores óticos, estudou-se outros tipos de geometria do provete e disposição do sensor, isto para se obter sensibilidade quanto à forma de se colocar os sensores no reservatório.

Fazendo variar a geometria do provete, este foi produzido com 6 camadas, contra as 2 já testadas, em que foram colocados 2 sensores como demonstra a Figura 5.30.

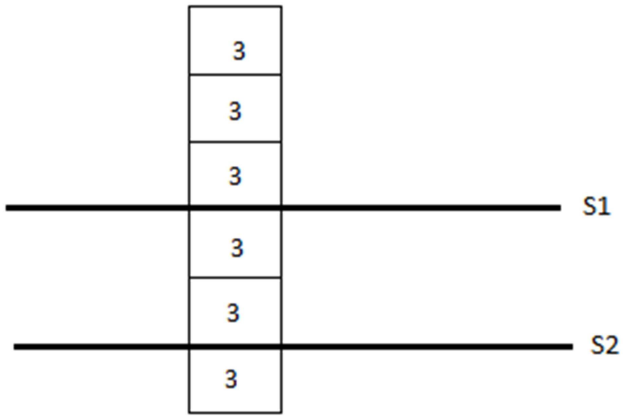


Figura 5.30 – *Geometria do provete TCR-ML*

Após realizar um ensaio de tração verificou-se ambos os sensores comportam-se como previsto, sendo capazes de traduzir corretamente a deformação do provete. Logo, conclui-se que a geometria do material compósito bem como o número de camadas não influenciam o bom funcionamento do sensor.

A nível da disposição do sensor, foi produzindo um provete com dois sensores, como se pode verificar na figura 5.31, estando um orientado na direção das fibras do compósito, enquanto que o outro faz um ângulo de 15º. O objetivo deste ensaio foi estudar a possibilidade de aumentar a gama de medição do sensor, alterando a sua disposição, de forma a evitar que ele se deforme segundo a direção principal de deformação do provete, conseguindo que o sensor se mantenha ativo até um nível de deformação superior.

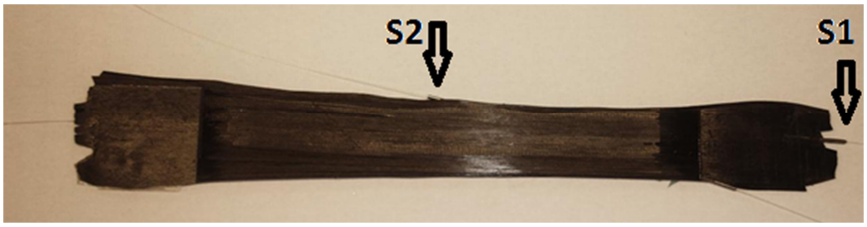


Figura 5.31 – *Provete TCR-CR*

Como se pode verificar na figura 5.32, apesar da sensibilidade do sensor com inclinação se alterar e teoricamente conseguirmos obter uma deformação superior do provete até o sensor partir, este acaba por partir e perder sinal mais cedo que o sensor orientado na direção da fibra, isto pois a probabilidade de uma fenda se formar e propagar na direção do reforço e se cruzar com o sensor é superior se este for inclinado.

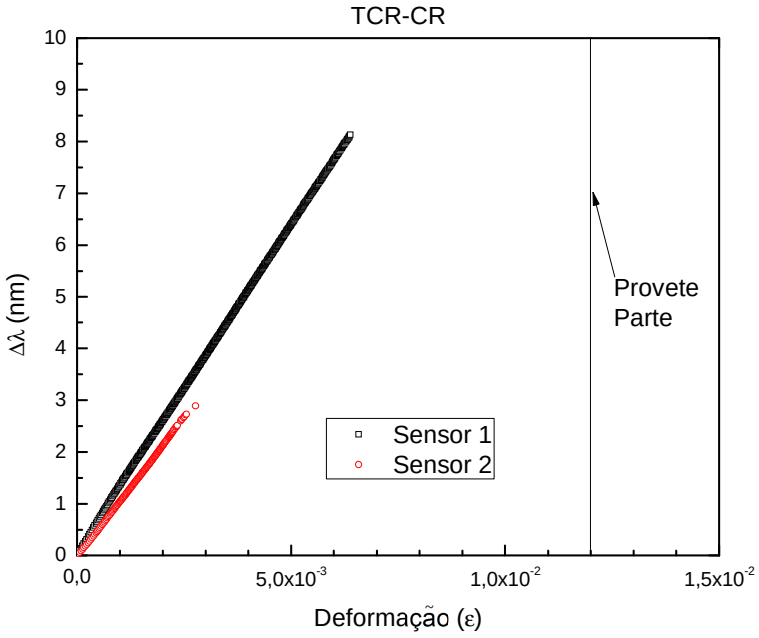


Figura 5.32 – *Ensaio de tração do provete TCR-CR*

5.2.6. Conclusões da validação e calibração dos sensores

A fase de calibração e validação dos sensores, permitiu concluir que é possível uma boa implementação deste tipo de sensores em reservatórios, embebidos no material compósito.

Os sensores óticos traduzem relativamente bem a deformação do material, contudo, quando temos uma grande diferença entre a rigidez do material hospedeiro e do sensor, é necessário proceder a uma correção do valor de deformação. Verificou-se que a tensão e pressão exercida ao material devido ao processo de produção do reservatório, não provoca nenhuma alteração na capacidade de medição do sensor FBG e que apenas perde cerca de 5 % da amplitude de medição durante todas as solicitações a que está sujeito durante o processo de enrolamento filamentar.

Conclui-se, que devem ser efetuados 3 a 4 ciclos de pressão para se dar a acomodação e ajustamento do sensor, isto irá provocar uma melhoria na qualidade de resultados.,

O sensor mostrou-se capaz de traduzir a deformação em diferentes condições de carregamento, mostrando-se sempre consistente nos valores obtidos.

Quanto à deformação máxima que o sensor é capaz de medir, verificou-se que este permite uma medição de deformação máxima de 1,2%, conseguindo assim, traduzir até à rotura o comportamento do pré-impregnado em fibra de carbono. Contudo, como no pré-impregnado de fibra de vidro a deformação máxima é de cerca de 3%, a utilização do sensor embebido neste material fica condicionada à gama de deformação máxima do sensor.

Capítulo 6

6.1. Fabrico de Reservatório com Embebimento de Sensores

Após a conclusão da calibração e validação dos sensores, avançou-se para a principal etapa deste trabalho, o fabrico de um reservatório produzido por enrolamento filamentar com embebimento dos sensores. Após percebermos quais as principais características e limitações dos sensores FBG, segue-se a sua implementação no reservatório de forma eficiente e que permita obter um conjunto de resultados onde seja possível a monitorização do estado estrutural do reservatório.

Em primeiro lugar, surge a necessidade de decidir qual a melhor localização dos sensores, que principais grandezas e fenómenos são importantes medir, bem como a quantidade de sensores que serão necessários para uma completa monitorização do reservatório. Para isso, foram realizadas simulações recorrendo ao método dos elementos finitos.

6.1.1. Simulação numérica

Para a realização da simulação por elementos finitos do reservatório, foi utilizado o software comercial ABAQUS®, contudo surge uma grande dificuldade em analisar estruturas produzidas por enrolamento filamentar, recorrendo ao software comercial tradicional do ABAQUS®, devido à impossibilidade de se implementar a variação da orientação das fibras, com isto, foi utilizado um sub-modelo do ABAQUS®, "WCM", que permitiu ultrapassar estes problemas.

A criação do modelo do reservatório (COPV-"Composite Overwrapped Pressure Vessel") consiste em duas fases. Em primeiro lugar, o mandril metálico é criado, onde diferentes regiões são definidas, tal como as regiões de soldadura e toda a variação de espessura ao longo do mandril. Em segundo lugar, são geradas todas as camadas de material compósito que são enroladas ao mandril metálico.

As diferentes camadas de compósito foram construídas tendo como referência reservatórios já produzidos, tomando como exemplo um reservatório com a seguinte disposição de camadas: [10x90º/5x±22º/1x90º]

- 10 camadas circulares, que irão cobrir a parte central do mandril com aproximadamente um diâmetro constante. Esta camada é produzida com um enrolamento num ângulo de praticamente 90º, sendo a sua espessura total de 8,05mm, de acordo com a medição feita através do corte de um reservatório já produzido.
- 5 camadas polares ou helicoidais com inclinação de 22º, sendo a espessura de cada camada de 1,61mm de acordo com as medições. Contudo, como se sabe do processo de enrolamento filamentar, a espessura desta camada junto dos topos tem tendência a aumentar devido à sobreposição de camadas, facto que é corrigido pelo sub-modelo do ABAQUS®.
- 1 camada circular exterior, com uma espessura de 0.805 mm.

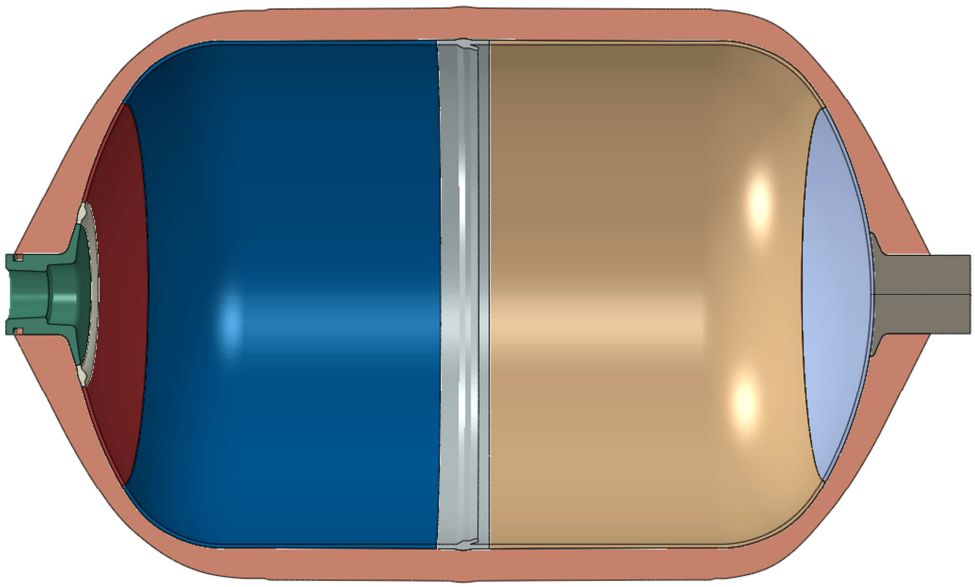


Figura 6.1 – *Modelo do reservatório produzido por enrolamento filamentar*

Foi considerado como material utilizado nas camadas de compósito, fibra de carbono HTA classic Tenax® de alta performance impregnada por resina epoxida SR1500/SD2505. As propriedades do material vêm descritas na Tabela 10.

Tabela 10- *Propriedades do material das camadas compósitas inseridas no modelo de elementos finitos.*

E_1(MPa)	E_2(MPa)	E_3(MPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}(MPa)	G_{13}(MPa)	G_{23}(MPa)
155.785	8.648	8.648	0.3	0.3	0.45	3.207	3.207	2.500



Figura 6.2 - *Modelo 3D do reservatório produzido por enrolamento filamentar*

Foi feito um carregamento quasi-estático, com o intuito de estudar a pressão de rebentamento, para isso, foi simulada uma pressão interna incrementada linearmente de 0 a 1100bar.

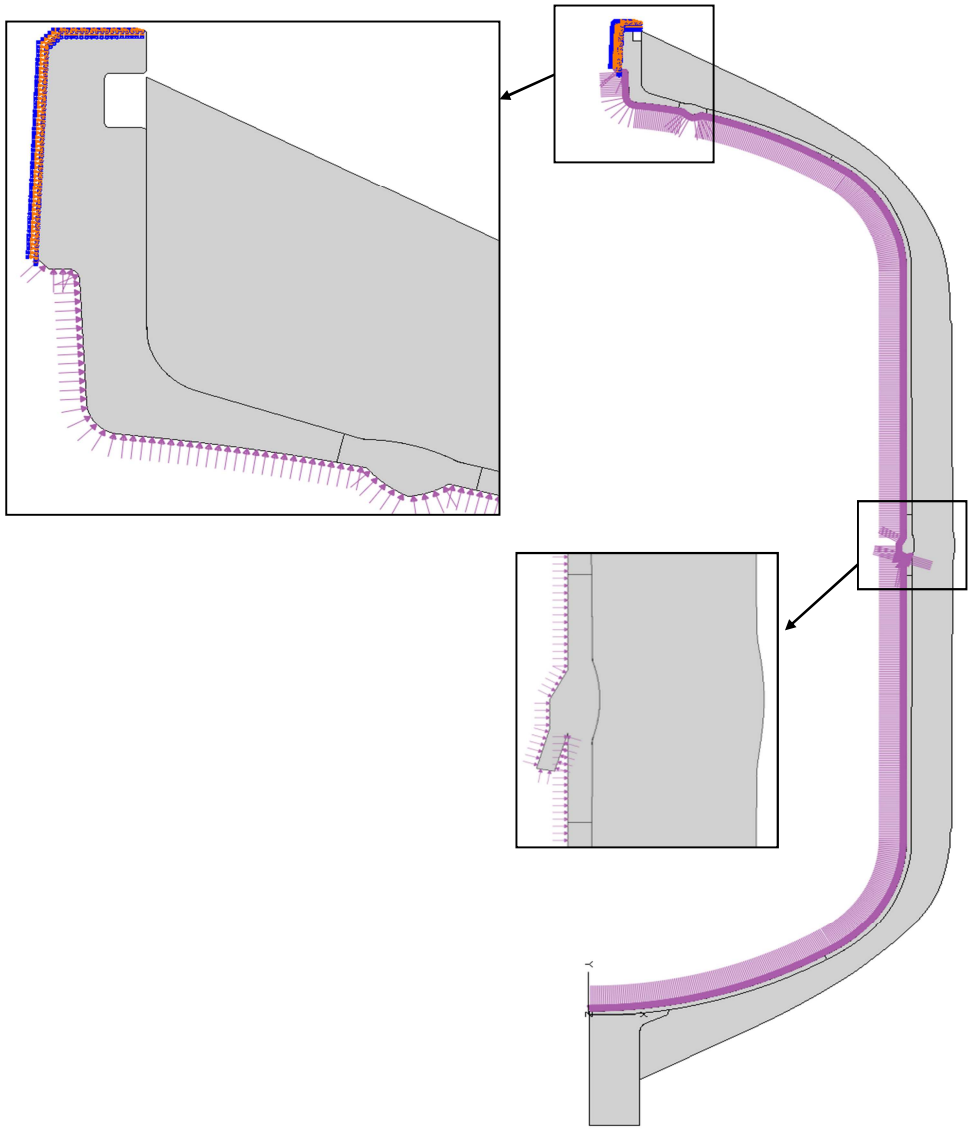


Figura 6.3- *Carregamento do reservatório com pressão interna.*

6.1.1.1. Resultados

Com o objetivo de quantificar e localizar as zonas críticas do reservatório, foi calculada a tensão ao longo do eixo do reservatório.

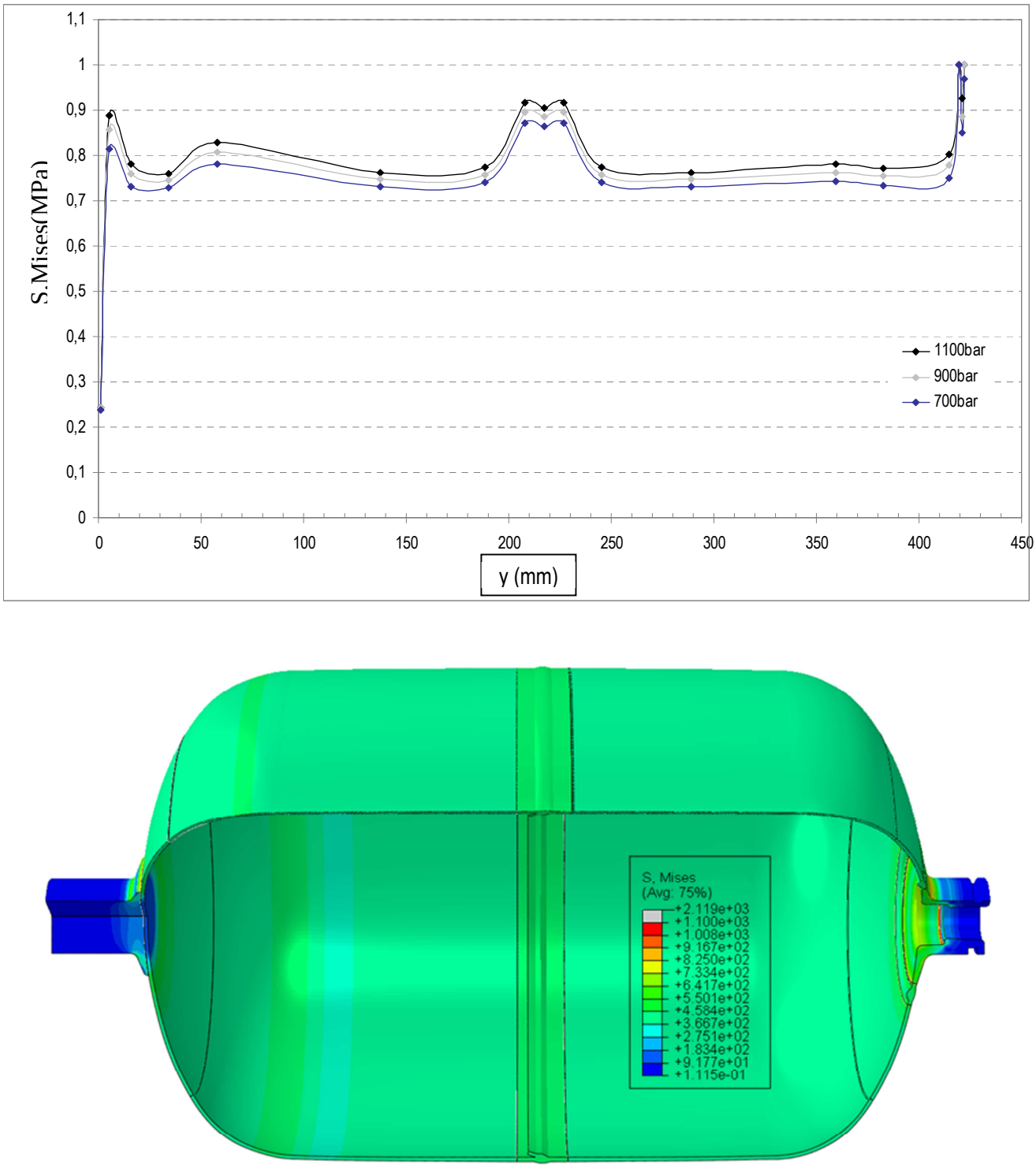


Figura 6.4 - *Critério de Von Misses ao longo do eixo do reservatório*

Para uma melhor compreensão do comportamento do reservatório foi feita a mesma análise para as tensões principais σ_{11}, σ_{22}, σ_{33}, presente no Anexo F.

Como podemos concluir, as zonas mais críticas onde as tensões são mais elevadas, localizam-se nas soldaduras dos topos, do pescoço e no fundo do reservatório, bem como na soldadura central. Nestas regiões formam-se tensões em x (radiais) e em z (circunferenciais) devido à especificidade geométrica desta região, à rigidez local devido à soldadura e à orientação da fibra.

Também foi possível verificar, que apesar de não existir tensões tão elevadas como nas zonas já descritas, os "ombros" do reservatório apresentam elevados gradientes de tensão e consequentemente é uma zona bastante solicitada à flexão, característica crítica no processo de fadiga.

6.1.2. Localização dos sensores

Como concluímos anteriormente, as zonas críticas de especial interesse de medição, são as zonas de soldadura do pescoço, do fundo e central do reservatório bem como os "ombros" do mesmo. Para isso, utilizando um mandril e o programa CNC da máquina de enrolamento filamentar, efetuamos as medições para um melhor posicionamento dos sensores.

Na Figura 6.5, apresenta-se o esquema do conjunto de 4 fibras multiplexadas que serão embebidas no reservatório produzido por enrolamento filamentar.

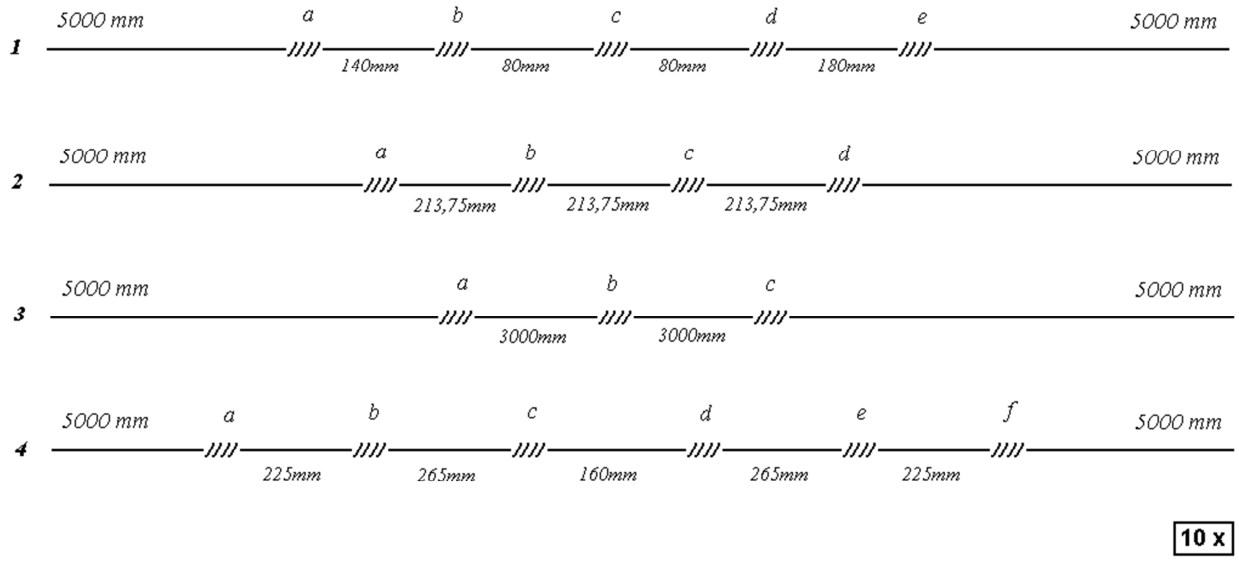


Figura 6.5 – *Esquema de cada fibra multiplexada com sensores de Bragg*

As fibra **1** e **2,** serão colocadas entre o mandril metálico e a primeira camada circular de material compósito. Isto permitirá fazer uma análise das deformações que ocorrem no mandril metálico e que são transmitidas para as primeiras camadas do material compósito.

Como se pode verificar na Figura 6.6, o sensor 1 (S1) irá medir a deformação longitudinal, enquanto que o sensor 2 (S2) irá traduzir a deformação radial.

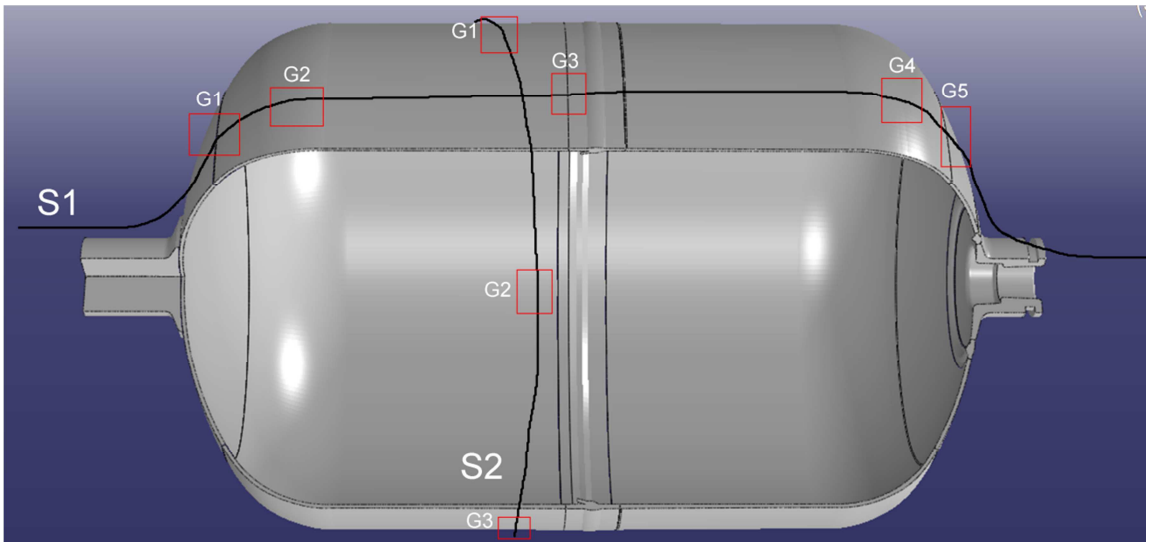


Figura 6.6 - *Disposição dos sensores no "linner" metálico.*

Por outro lado, a fibra **3** será colocada sobre a primeira camada de compósito circular, de modo que os sensores fiquem sobrepostos aos "grattings"- G2,G3,G4 da fibra **1**. A fibra **4**, será posicionada sobre a primeira camada helicoidal de igual forma colocada, como na fibra **3.**

Com esta disposição, espera-se conseguir monitorizar as zonas críticas do reservatório bem como as duas direções principais de deformação (radial e longitudinal).

6.1.3. Produção do reservatório para verificação do programa CNC

Antes de serem colocados os sensores FBG embebidos no compósito, produziu-se um reservatório em material compósito, para se adquirir competências no processo de enrolamento filamentar. Por outro lado, verificamos se o programa em linguagem CNC era o adequado para as medidas do reservatório em questão e se a espessura da secção das camadas de material compósito correspondiam com as utilizadas na simulação numérica.

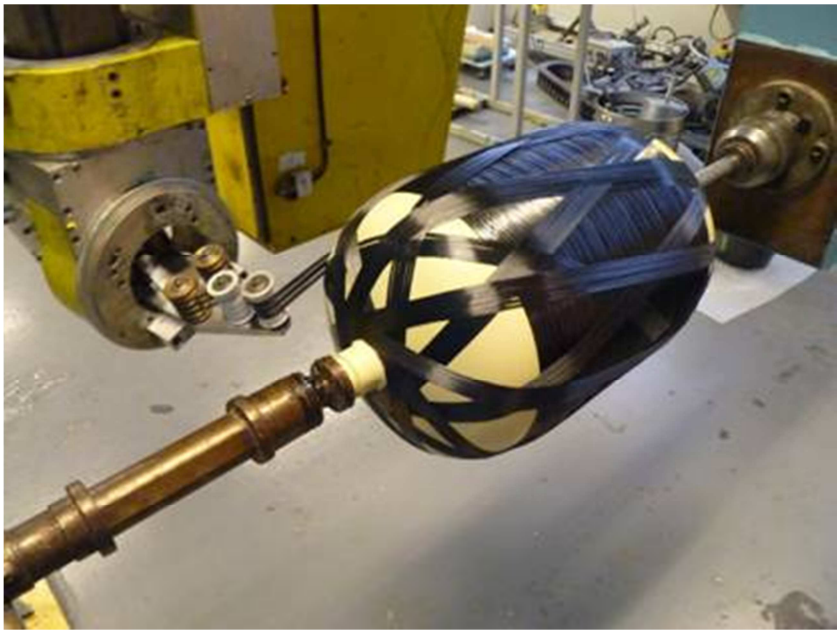


Figura 6.7- *Enrolamento filamentar do reservatório teste.*

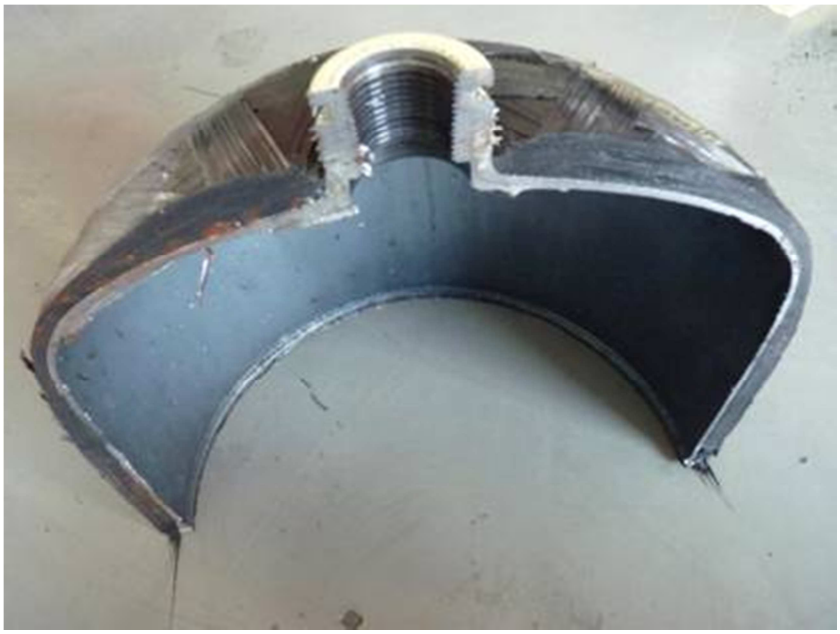


Figura 6.8 - *Corte transversal do reservatório em material compósito.*

6.1.4. Reservatório com sensores FBG embebidos no compósito

Após verificarmos que o programa CNC era o adequado para o mandril metálico utilizado e para as especificações do reservatório pretendido, produziu-se o primeiro reservatório com sensores FBG embebidos no compósito.

Numa primeira fase, foram colados ao mandril metálico os primeiros dois sensores (S1;S2), já descritos no tópico 6.1.2. A dificuldade prende-se com a fragilidade dos sensores e a sua colocação numa posição ideal, que conduza a leitura das grandezas pretendidas.



Figura 6.9 - *Colocação dos sensores FBG S1 e S2 no mandril metálico.*

Após os primeiros sensores estarem colocados no mandril metálico, foi enrolada a primeira camada circular de material compósito, onde logo de seguida foi colocado o sensor encarregue de medir a deformação radial na camada compósita.

De referir, que nesta fase foi importante manter o alinhamento do sensor com o material compósito, para que os valores obtidos, possam se correlacionados com os dados na calibração do sensor descrito no capítulo 5.

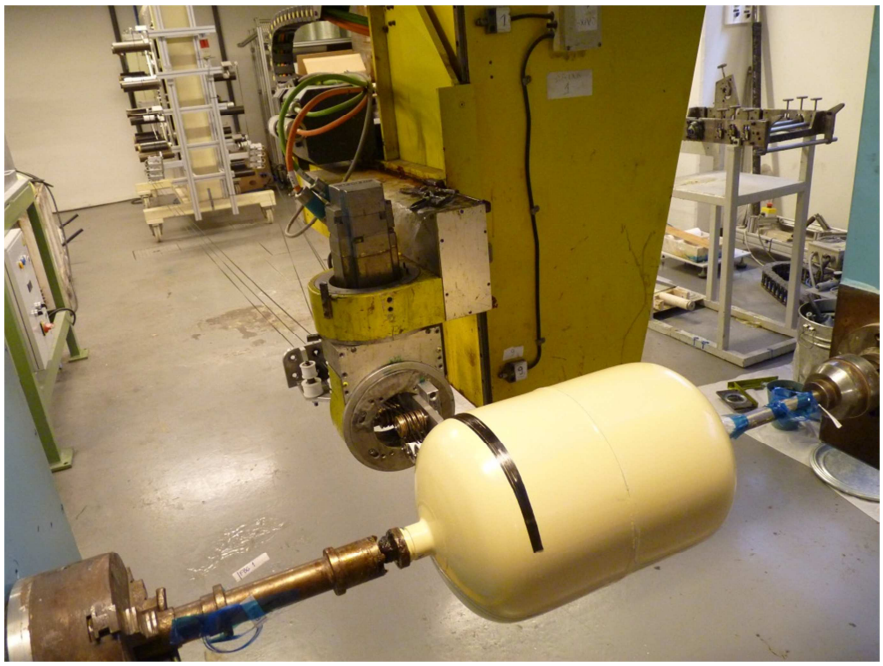


Figura 6.10 - *Início do enrolamento da camada circular.*

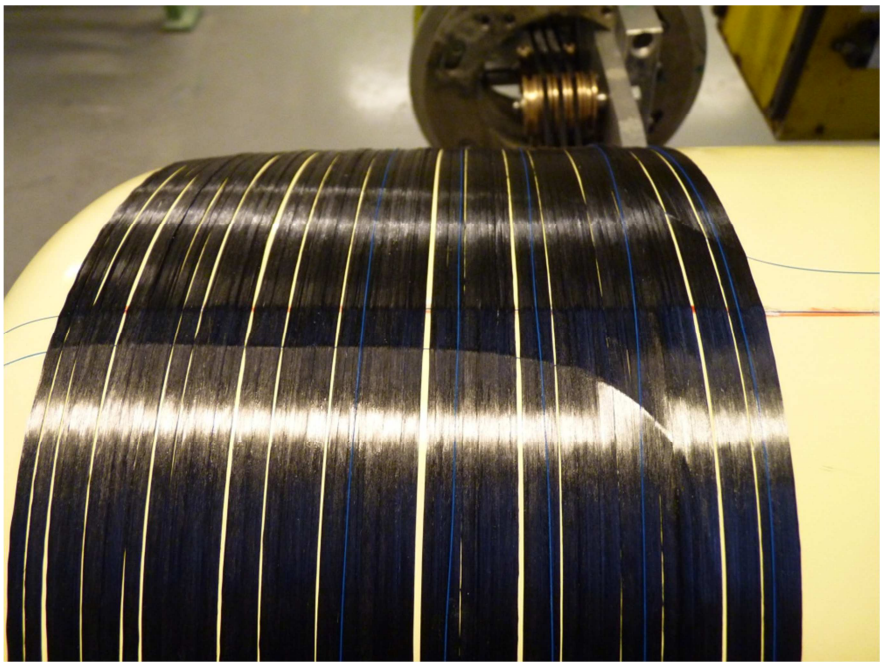


Figura 6.11 - *Alinhamento do sensor S3 com a camada circular.*

Após o enrolamento das 5 camadas circulares, é iniciada a camada helicoidal, onde é colocado o último sensor, responsável por medir as tensões longitudinais.

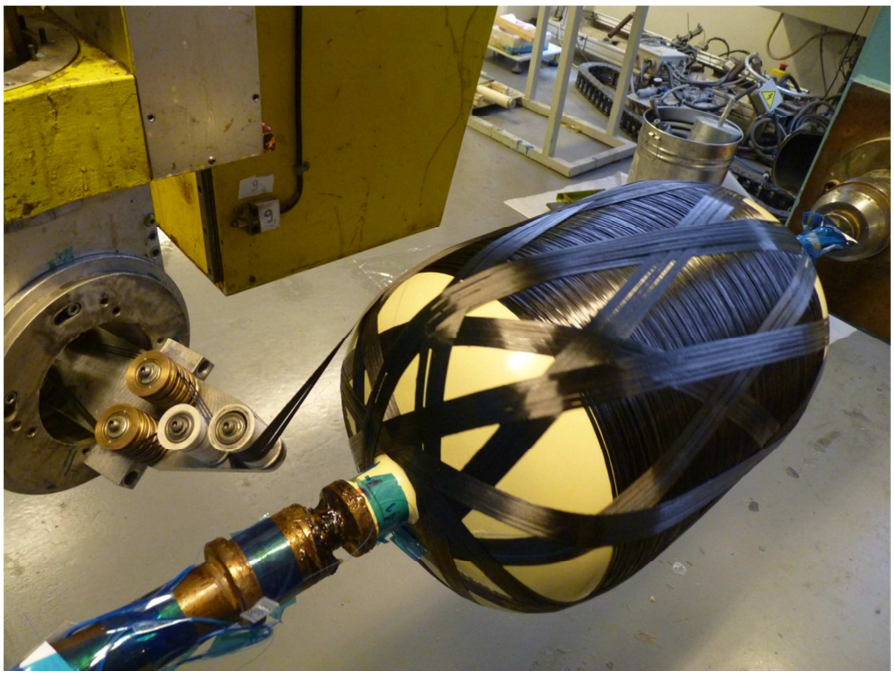


Figura 6.12 - *Enrolamento da camada helicoidal.*

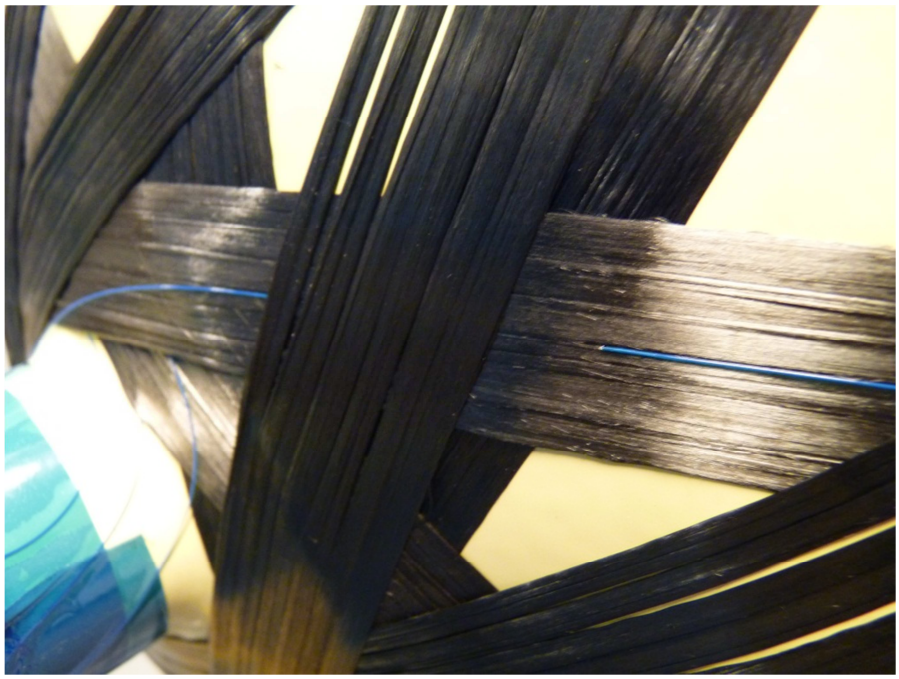


Figura 6.13 - *Colocação do sensor FBG S4 na camada helicoidal.*

Após o processo de enrolamento filamentar estar concluído, o reservatório foi colocado na estufa para se dar o processo de cura. Toda esta etapa foi monitorizada, para identificar possíveis problemas que vieram a surgir, pois alguns sensores deixaram de medir durante o processo de cura.

No final do processo de cura verificou-se que alguns sensores tinham deixado de medir, possivelmente devido a um mau posicionamento dos sensor e a estrangulamento devido as contrações térmicas dos materiais do reservatório.

Visto esta dissertação de mestrado integrado estar incorporada num projeto de investigação, com calendarizações diferentes, foi impossível resolver os problemas da implementação dos sensores no reservatório. Contudo, como trabalho futuro serão feitos novos reservatórios tentando minimizar esta perda de sinal por parte dos sensores, bem como ensaios de pressão interna, permitindo testar a eficiência dos sensores e a sua capacidade de traduzir a deformação dos reservatórios de alta pressão em material compósito.

Capítulo 7

7.1. Conclusões e Trabalhos Futuros

Os reservatórios em material compósito, fabricados por enrolamento filamentar, apresentam-se como a tecnologia mais promissora para o armazenamento de fluidos a altas pressões, antevendo-se a criação de reservatórios capazes de suportar maiores pressões, mas também evoluindo no sentido de serem capazes de medir e atuar sobre o seu estado estrutural, surgindo assim o conceito de reservatório inteligente.

Os sensores de fibra ótica com redes de Bragg, são uma das tecnologias mais promissoras para a criação de estruturas monitorizadas, devido a suas incríveis características sensoras, como a medição de diversas grandezas, alta sensibilidade, imunidade a ruído e interferência externa, multiplexidade, etc.. Contudo, o que marca a diferença, nos sensores FBG em relação aos restantes métodos de medição, é o seu reduzido tamanho e a possibilidade de implementação "in-situ" do sensor, fazendo com que este seja parte integrante da estrutura.

A calibração e validação dos sensores FBG permitiu concluir que é possível uma boa implementação deste tipo de sensores em reservatórios, embebidos no material compósito.

Os sensores FBG traduzem relativamente bem a deformação do material. No entanto, quando temos uma grande diferença entre a rigidez do material hospedeiro e do sensor, é necessário proceder a uma correção do valor de deformação. Verificou-se que a tensão e pressão exercida ao material devido ao processo de produção do reservatório, não provocam nenhuma alteração na capacidade de medição do sensor FBG e que apenas perde cerca de 5 % da amplitude de medição durante todas as solicitações a que está sujeito durante o processo de enrolamento filamentar.

Por outro lado, devem ser efetuados 3 a 4 ciclos de pressão para se dar a acomodação e ajustamento do sensor, isto irá provocar uma melhoria na qualidade de resultados, por outro lado, o sensor mostrou-se capaz de traduzir a deformação em diferentes condições de carregamento, mostrando-se sempre consistente nos valores obtidos.

Quanto à deformação máxima que o sensor é capaz de medir, verificou-se que este permite uma medição de deformação máxima de 1,2%, conseguindo assim, traduzir até à rotura o comportamento do pré-impregnado em fibra de carbono.

Contudo, como no pré-impregnado de fibra de vidro a deformação máxima é de cerca de 3%, a utilização do sensor embebido neste material fica condicionada à gama de deformação máxima do sensor.

No reservatório produzido por enrolamento filamentar, foram identificadas as zonas mais críticas onde as tensões são mais elevadas, localizando-se nas soldaduras dos topos, do pescoço e no fundo do reservatório, bem como na soldadura central. Nestas regiões formam-se tensões em x (radiais) e em z (circunferenciais) devido à especificidade geométrica desta região, à rigidez local devido à soldadura e à orientação da fibra.

Também foi possível verificar, que apesar de não existir tensões tão elevadas como nas zonas já descritas, os "ombros" do reservatório apresentam elevados gradientes de tensão e consequentemente é uma zona bastante solicitada à flexão, característica crítica no processo de fadiga.

Com isto, foi possível escolher as zonas ideais para a implementação dos sensores FBG, estando dois deles a monitorizar o mandril metálico nas zonas já especificadas e outros dois a monitorizar as camadas helicoidais e circulares do compósito.

Por fim, foi construído um protótipo de um reservatório em material compósito com sensores FBG embebidos, conseguindo-se identificar as diferentes dificuldades deste processo, contudo foi impossível resolver os problemas da implementação dos sensores no reservatório, como a perda de sinal e o estrangulamento, em tempo útil da realização desta dissertação.

Como trabalhos futuros serão feitos novos reservatórios tentando minimizar a perda de sinal por parte dos sensores, bem como serão realizados ensaios de pressão interna, permitindo testar a eficiência dos sensores e a sua capacidade de traduzir a deformação dos reservatórios de alta pressão em material compósito.

Também seria interessante, proceder à calibração dos sensores FBG embebidos em diferentes materiais, nomeadamente os termoplásticos, por serem outra classe da matriz muito importante nos materiais compósitos, com inúmeras aplicações.

Também aliciante, seria o estudo e melhoria da rotura máxima dos FBG, permitindo a sua aplicação a uma maior gama de materiais, bem como um estudo mais aprofundado da interação a nível da interface do sensor, permitindo perceber e melhorar a forma de transferência de deformação entre sensor-material hospedeiro.

Por ultimo, e como uma visão mais inovadora, seria interessante a criação de um reservatório com um conceito inteligente, onde além de estar assegurada a integridade estrutural, este teria mecanismos para evitar uma falha catastrófica ou mesmo proceder a sua reparação.

Referências e Bibliografia

[1] **UDD, E.** *"Fiber optic structures and skins"*. Pro.SPI, 1989.

[2] **LUYCKX, G., ET AL.**;*"Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: I. Parametric study"*. Smart Materials and Structures, 2010, vol. 19, no. 10, p. 105017;ISBN 0964-1726.

[3] **GRIFFITH, A.A.** *"The phenomenon of rupture and flow in solids"*. Philosophical transactions of the royal society, 1920.

[4] **VOET, E., ET AL.**;*"Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: II. Experimental validation"*. Smart Materials and Structures, 2010, vol. 19, no. 10, p. 105018;ISBN 0964-1726.

[5] **MAZUNDAR, S.K.** *"Composite Manufacturing"*. CRS Press LLC, 2002.

[6] **MOURA, M.F.S.F.** *"Materiais Compósitos- Materias, fabrico e comportamento Mecânico"*. Edtion ed.: Publindústria, 2005. ISBN 972-8953-00-3.

[7] **MARQUES, A.T.** "*Apontamentos disciplina Materiais Compósitos*". Departamento Engenharia Mecânica Universidade do Porto 2009.

[8] **WEN, J., XIA, Z., CHOY, F.**;*"Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement"*. Composites Part B: Engineering, 2011, vol. 42, no. 1, p. 77-86;ISBN 1359-8368.

[9] *Imagem retirada de***: INNOVATIONS, F.**, em Julho 2011

[10] *Imagem retirada de***: FIBERITE, C.**, em Julho 2011

[11] **VAZ, M., GOMES, J.** *"Análise experimental de Tensões"*. MIEM- Sebenta de Mecânica Experimental, 2011.

[12] **LEE, S.-S., LEE, J.H., PARK, I.K., SONG, S.-J., CHOI, M.Y.**;*"Strain Monitoring and Damage Detection of a Filament Wound Composite Pressure Tank Using Embedded Fiber Bragg Grating Sensors"*. Key Engineering Materials, 2006, vol. 321-323, p. 182-185.

[13] **VIDAL, R.J.** "*Sistema de calibração de sensores de temperatura em rede de Bragg em fibra optica*". *MIEE.* Porto: Universidade do Porto, 2009. Tese de Mestrado

[14] **GLISIC, B.** 2004. "*Health monitoring of a full composite CNG tanks using long-gage fiber optic sensors"*. In *Proceedings of the 11th SPIE's Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Switzerland 2004.

[15] **KAMAT, S., SU, X.** *"Filament Winding Simulation Of A Composite"*. 2001.

[16] *Imagem retirada de***: SPECTRUMINSPECTION**, em Julho 2011. http://www.spectruminspection.org/tofd_Picture.gif.spectruminspection,

[17] **GLISIC, B., INAUDI, D.**;*"Sensing tape for easy integration of optical fiber sensors in composite structures"*. Switzerland, 2003.

[18] **OLIVEIRA, R.D., RAMOS, C.A., MARQUES., A.T.**;*"Health monitoring of composite structures by embedded FBG Health monitoring of composite structures by embedded FBG"*. Computers and Structures 86, 2008, p. 340-346.

[19] *Imagem retirada de***: FIBERSENSIG**, em Julho 2011. http://www.fibersensing.com.fibersensig,

[20] *Imagem retirada de***: ELECTRIC, S.**, em Julho 2011.

[21] **ASTM**. "*D 4018- 99 Standard Test Methods for Properties of Continuous Filament Carbon and Graphite Fiber Tows*". In. ASTM, 2011, vol. D 4018-99, p. 3.

[22] **BRITO, F.J.M.M.D.** *"Comportamento Mecânico das Camadas Usadas Na Construção de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica"*. Porto: INEGI, 1997. Tese de Mestrado

[23] **YIN, S., RUFFIN, P.B., YU, F.T.S.** *"Fiber Optic Sensors"*.CRC Press, 2008.

[24] **FRIAS, C.M.M.** "*Materiais Inteligentes para próteses de anca*". *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial.* Porto: Faculdade de Engenharia Universidade Porto, 2009, Tese de Doutoramento.

[25] **VIEIRA, A., OLIVEIRA, R.D., FRAZÃO, O., J.M.BAPTISTA, MARQUES, A.T.**;*"Effect of the recoating and the length on fiber Bragg gratings sensors embedded in polymer composites"*. Materials and Design, 2008, p. 1818-1821.

[26] **KUANG, K.S.C., KENNY, R., WHELAN, M.P., CANTWELL, W.J., CHALKER, P.R.**;*"Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials"*. Composites Science and Technology, 2001, vol. 61, no. 10, p. 1379-1387;ISBN 0266-3538.

[27] **KANG, D.H., PARK, S.O., HONG, C.S., KIM, C.G.**;*"The signal characteristics of reflected spectra of fiber Bragg grating sensors with strain gradients and grating lengths"*. NDT & E International, 2005, vol. 38, no. 8, p. 712-718;ISBN 0963-8695.

[28] LEE, J.-R., TSUDA, H., KOO, B.-Y.;*"Single-mode fibre optic Bragg grating sensing on the base of birefringence in surface-mounting and embedding applications"*. Optics & Laser Technology, 2007, vol. 39, no. 1, p. 157-164;ISBN 0030-3992.

[29] OKABE, Y., YASHIRO, S., TSUJI, R., MIZUTANI, T., TAKEDA, N.;*"Effect of thermal residual stress on the reflection spectrum from fiber Bragg grating sensors embedded in CFRP laminates"*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, vol. 33, no. 7, p. 991-999;ISBN 1359-835X.

[30] NOGUEIRA, R.N. "*Redes de Bragg em Fibra Óptica*". *Universidade de Aveiro.* 2005. Tese de Mestrado

[31] OTHONOS, A., KALLI, K. *"Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and applications in Telecommunications and Sensing"*. Arctech House, 1999.

[32] MAUL, J., KIPP, T.;*"Sensing of Surface Strain with Flexible Fiber Bragg Strain Gages"*. HBM GmbH, May 2011 2011.

[33] FIGUEIREDO, J.L. "*Sensores de fibra óptica para uso avançado em compósitos poliméricos*". *Universidade de Aveiro.* 2009. Tese Mestrado

[34] *Imagem retirada de***: WIKIPEDIA**, em Julho 2011 http://pt.wikipedia.org/wiki/Kevlar

Anexo A

Processamento de Materiais Compósitos

Processamento de Materiais Compósitos

Processamento de Materiais Compósitos de matriz Termoendurecível

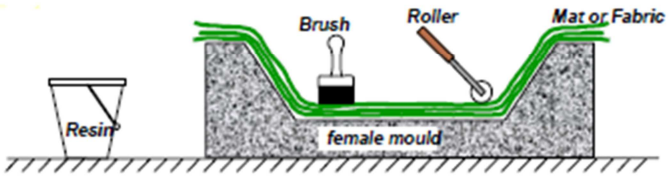
Há quatro passos básicos na produção de componentes compósitos: impregnação, deposição em camadas, consolidação e pós-cura. Todos os processos de produção de compósitos envolvem os mesmos passos, embora estes sejam realizados de formas diferentes.

Moldação por contacto

A moldação por contacto sobre a superfície de um molde é o método que requer menor investimento inicial e pode ser dividido nos seguintes tipos:

Moldação Manual

Neste método, o empilhamento e a impregnação de sucessivas camadas é feito manualmente, é aplicada resina líquida no molde e por cima deste aplica-se o reforço, para a impregnação utiliza-se um rolo.



Moldação Manual [6]

Principais aplicações:

Devido a simplicidade do processo e do reduzido investimento de capital, é um processo muito utilizado para a produção de protótipos, bem como para um extensa quantidades de peças que justifique a produção manual.

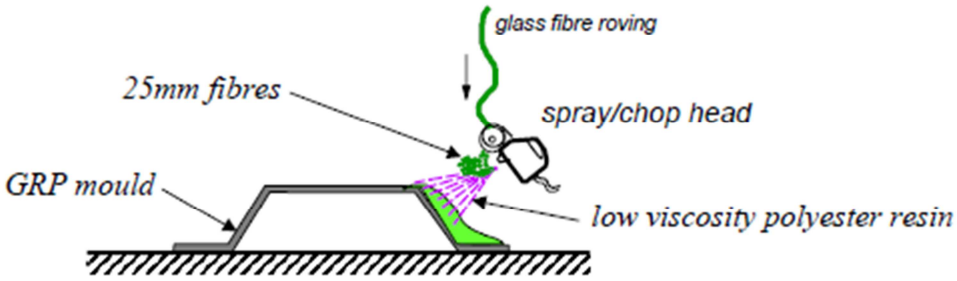


Moldação manual num iate de 22 metros [6]

Moldação Por Projeção

O processo consiste na aplicação simultânea de resina e fibra, sobre um molde, através de uma pistola de projeção.

O processo de moldação por projeção é muito mais rápido que o processo de deposição manual, e continua a ser uma opção barata de produção de produtos em material compósito.



Moldação por projeção [6]

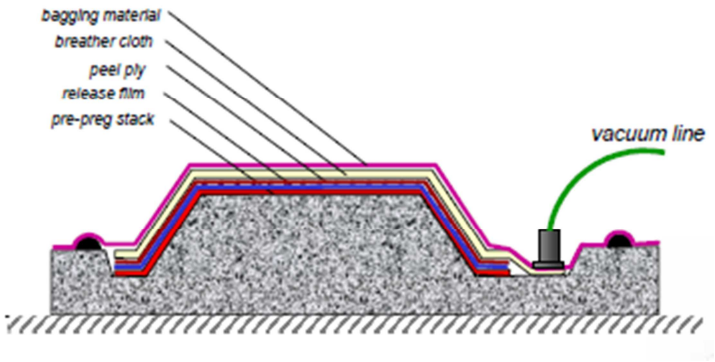
Principais aplicações:

O processo de moldação por projeção é utilizado para a produção de componentes pequenos a grandes, em pouca ou média quantidade. A moldação por projeção é a opção mais adequada para os casos em que a resistência do produto não é tão crucial.

Banheiras, piscinas, cascos de navios, reservatórios de armazenamento, equipamento de manuseamento de ductos e ar, e componentes de mobiliário, são algumas das aplicações comerciais deste processo.

Moldação por vácuo (Infusão)

O processo consiste na aplicação de vácuo no interior do molde. A moldação por vácuo é semelhante à prensagem a frio, com a vantagem de exigir um investimento menor em molde e equipamentos.



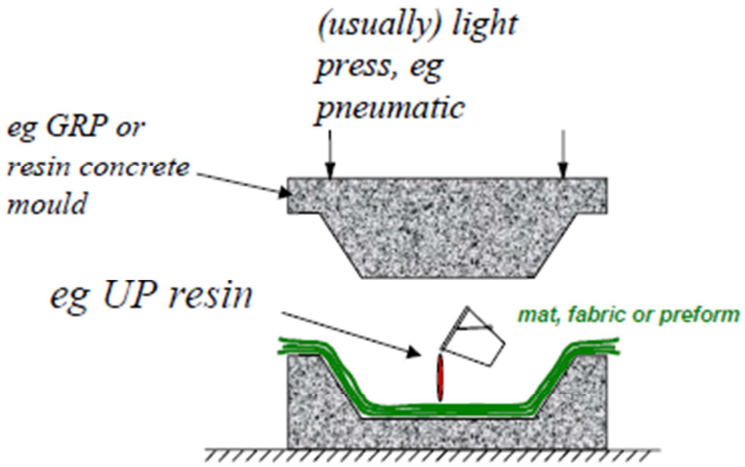
Moldação por Vácuo [6]

Principais aplicações:

Este processo de produção tem vindo a ser utilizado na produção de peças grandes, tal como cascos de barcos, componentes de automóveis e aeronaves.

Moldação por Compressão

A moldação por compressão pode ser feita a frio ou quente e permite obter peças numa cadência mais elevada.



Moldação por Compressão[6]

Principais aplicações:

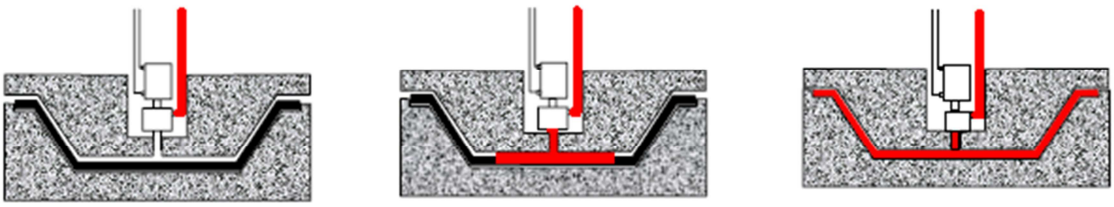
A moldação por compressão é muito popular na indústria automóvel dadas as suas capacidades de grande volume. Este processo é usado para moldação de grandes painéis automóveis, usando compostos de moldação (SMC).

Moldação por Injeção

A moldação por injeção é utilizada para produção de grandes séries e pode ser aplicada tanto a compósitos de matriz polimérica termoendurecíveis como termoplásticos.

Moldação por injeção a Baixa Pressão e por Transferência

O processo de moldação por transferência de resina (RTM), consiste numa pré-forma colocada na cavidade do molde, posteriormente o molde e contra-molde são unidos e então é injetada uma mistura pressurizada de resina termoendurecivel, catalisador,etc..



Moldação por injecção a Baixa Pressão [6]

Como vantagens deste método temos, a grande exatidão dimensional, a capacidade de fabrico de componentes complexos a velocidade elevada, permite a obtenção de fracções volúmicas elevadas, até 65%

Principais aplicações:

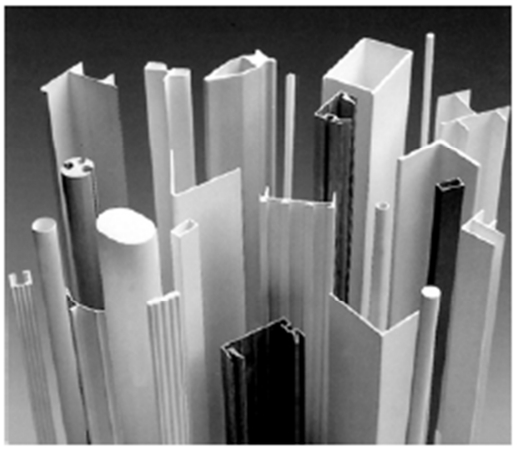
Este processo de fabrico é bastante flexível, sendo possível produzir desde peças pequenas a grandes em quantidades de volume pequeno a médio. Logo as aplicações mais comuns são capacetes,portas, tacos de hóquei, quadros de bicileta, pás de turbinas eólicas, componentes de aeronaves.

Moldação em Autoclave

O processo consiste em consolidar um componente através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo.

Pultrusão

O processo de pultrusão é um processo de produção de baixo custo e elevado volume, onde as fibras em forma de pré-impregnado são puxadas através de uma fieira. Criando-se assim componentes de secções transversais constantes e comprimento contínuo.



Perfis produzidos por pultrusão [5]

Principais aplicações:

As aplicações mais comuns do processo de pultrusão são vigas, tubos, sistemas de gradeamento, corrimões, postes, infraestruturas de veículos.

Moldação por centrifugação

Processo de produção de peças ocas, como tubos, reservatórios etc...

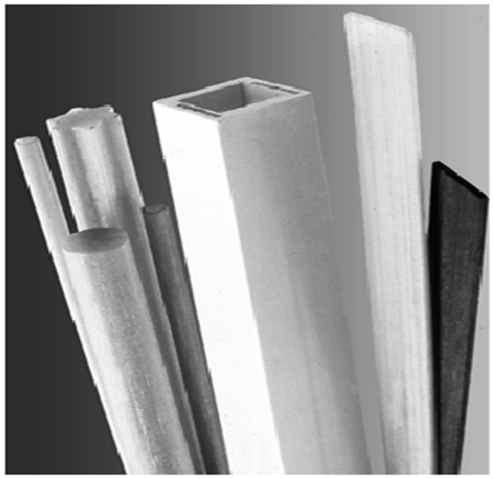
Processamento de Materiais Compósitos de matriz Termoplástica

Na indústria de compósitos, são os termoendurecíveis que dominam o mercado. Em 1998, os compósitos termoplásticos representavam cerca de 25% do mercado total para compósitos estruturais de base polímera[5].

O uso de compósitos termoplásticos está-se a tornar popular nas indústrias aeroespacial e automóvel, dada a sua maior rigidez, maior velocidade de produção, e preocupações ambientais mínimas.

Processo Termoplástico de Pultrusão

Este processo é semelhante ao processo de pultrusão de compósitos termoendurecíveis, sendo as fibras misturadas ou pré-impregnadas em termoplástico e posteriormente passa através de uma fieira para obter o produto final. Contudo este processo apresenta a desvantagem de exigir forças de tração superiores, devido a elevada viscosidade dos termoplásticos, bem como o produto final apresenta uma qualidade superficial inferior.



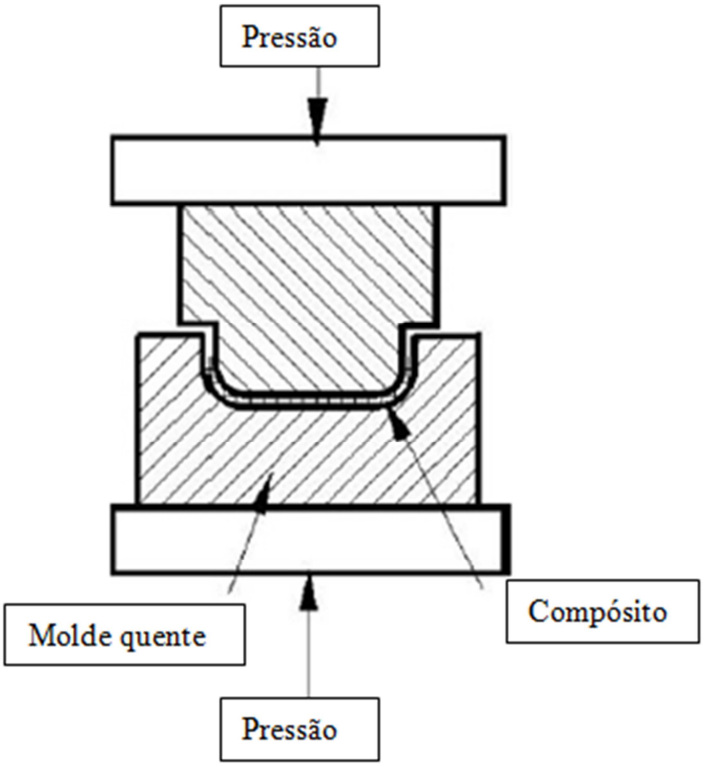
Componentes termoplásticos pultrudidos [5]

Principais aplicações:

Arames, tubos de variadas secções, barras e outras formas simples.

Moldação por Prensa Quente

Este processo é semelhante ao de formação de metal em chapa, neste processo é empilhado pré-impregnado termoplástico que é colocado em moldes aquecidos que são prensados, levando assim à fusão do termoplástico que provoca a conformação no molde.



Moldação por Prensa Quente

Principais aplicações:

Peças simples em laminados planos, componentes de espessura constante.

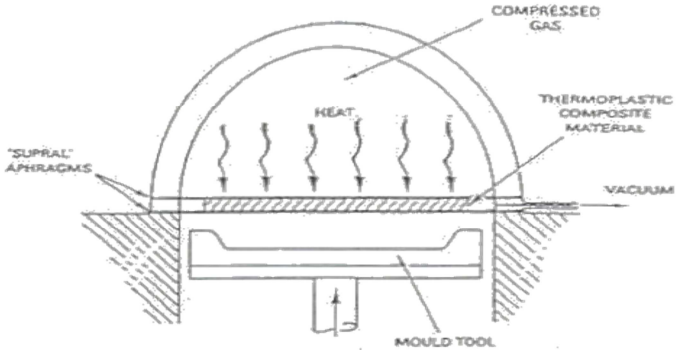
Processo de Autoclave

O processamento de compósitos termoplásticos em autoclave é semelhante ao processamento de compósitos termoendurecíveis. Neste processo, pré-impregnados termoplásticos são depostos numa ferramenta, na sequência desejada, e soldados por pontos para garantir que as camadas empilhadas não se movem. Toda a montagem é então submetida a vácuo e colocada numa autoclave.

A seguir ao ciclo de processo, o componente é retirado da ferramenta. Este processo é semelhante à tecnologia de prensa quente, estando a única diferença no método de aplicação de pressão e calor.

Processo de Moldação por Diafragma

Neste processo são colocadas camadas de pré-impregnadas em forma de placa entre dois diafragmas flexíveis, e são então moldadas sob calor e pressão contra um molde fêmea. As camadas pré-impregnadas flutuam livremente entre os dois diafragmas reprimidos.



Moldação por Diafragma

Principais aplicações:

Componentes complexos como capacetes, formas corrugadas, etc..

Moldação por Injeção

A moldação por injeção de compósitos termoplásticos é o mesmo que a moldação por injeção de termoplásticos sem quaisquer reforços.

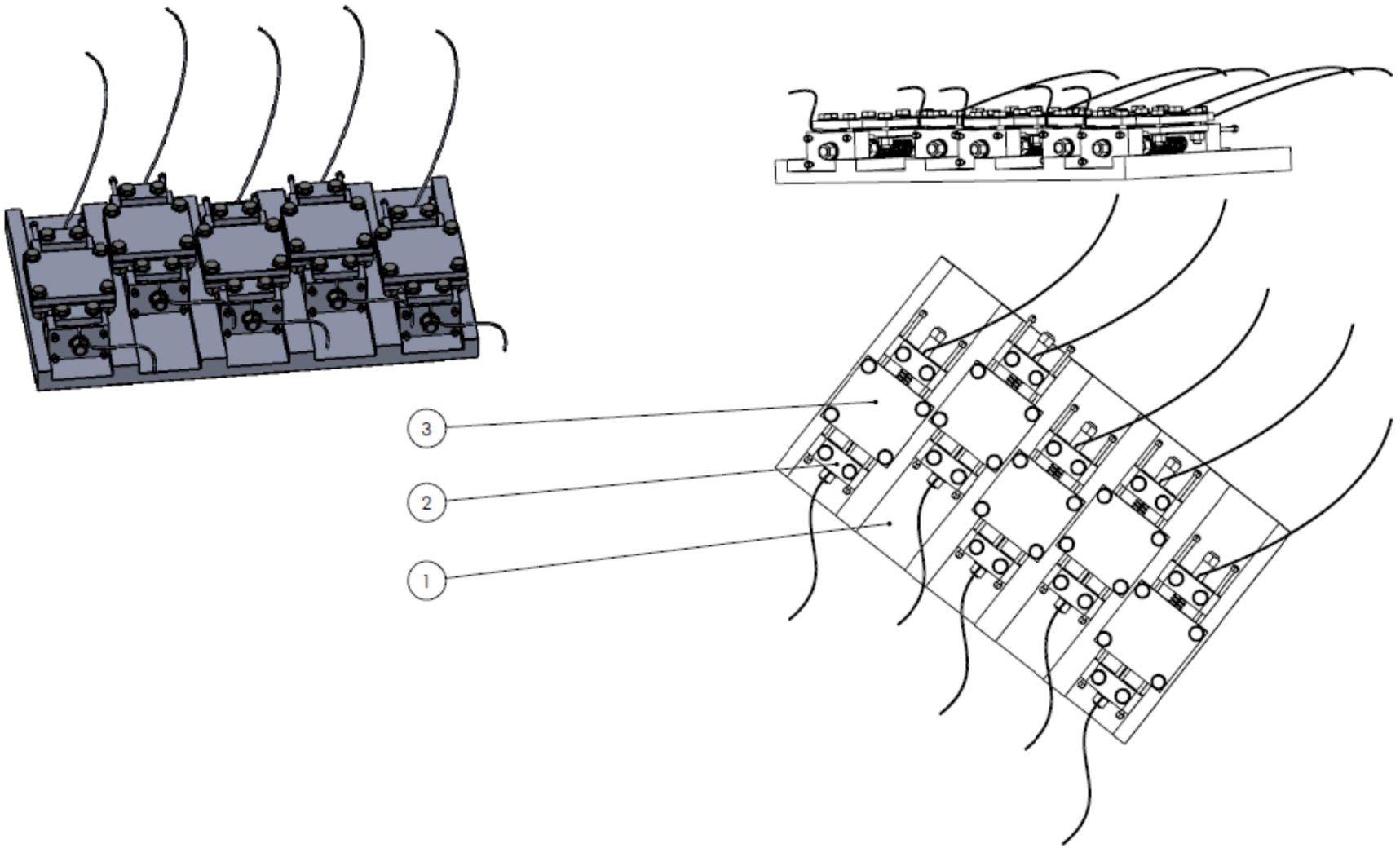
A moldação por injeção é usada para fazer componentes complexos a uma velocidade muito elevada. Para fazer o componente, são usados moldes de cavidade única ou múltipla. O processo é adequado a aplicações de grande volume, como a automóvel e de bens de consumo.

Principais aplicações:

Rodas dentadas, componentes de computador, componentes de automóveis, etc..

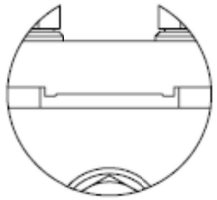
Anexo B

Desenhos de Definição do “Set-up De Ensaio”

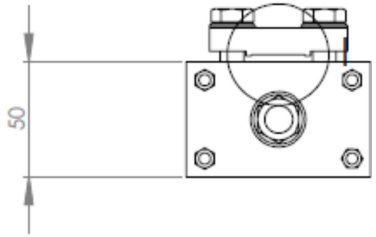


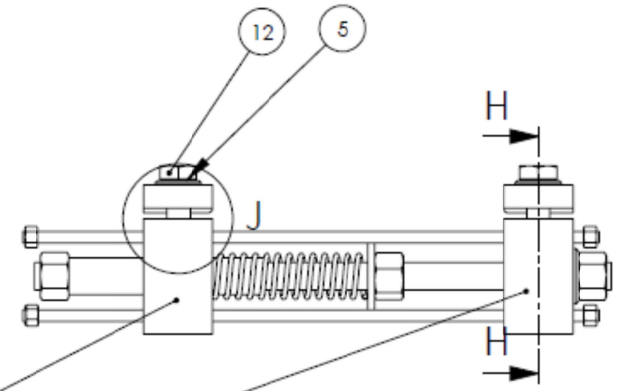
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	base de apoio		1
2	tensor de fibras		5
3	Compressor da fibra		5

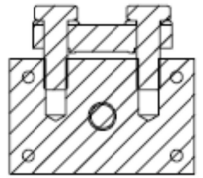
inegi Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial UMEC-Unidade materiais estruturas compósitas	Material: Aço	Quantidade: 1	
	Dimensões: 1	Substitui:	
	Tratamentos:	Substituido por:	
Escala: 1:5	desenho da base de apoio para os protótipos	Projectou:	
		Desenhou:	Gilmar Pereira 19-11-2010
		Verificou:	19-11-2010
		Des.Apo.Ver.1	



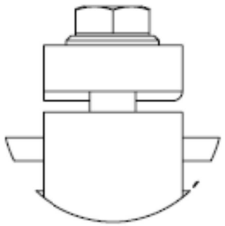
DETAIL I
SCALE 1 : 1



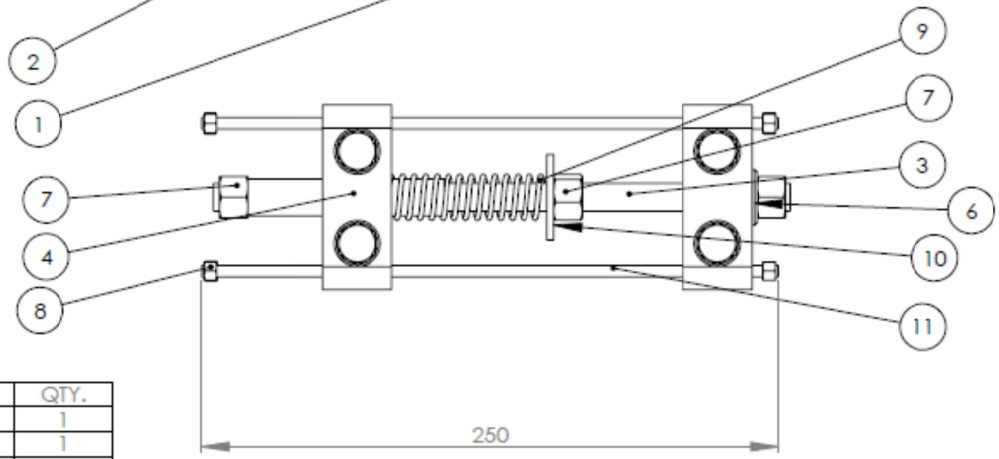




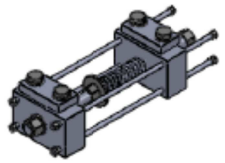
SECTION H-H



DETAIL J
SCALE 1 : 1



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	base1		1
2	base2		1
3	veio		1
4	topo		2
5	Washer ISO 7090 - 10	Anilha M10	4
6	Washer ISO 7090 - 12	Anilha M12	1
7	Hexagon Nut ISO - 4034 - M12 - N	Porca M12	3
8	Hexagon Nut ISO - 4034 - M5 - N	Porca M5	8
9	Mola	Ainda por detalhar o tipo	1
10	Washer ISO 7093 - 12	Anilha larga M12	1
11	guia	guia de material com baixo atrito	4
12	ISO 4017 - M10 x 30-C	Parafuso M10-30	4

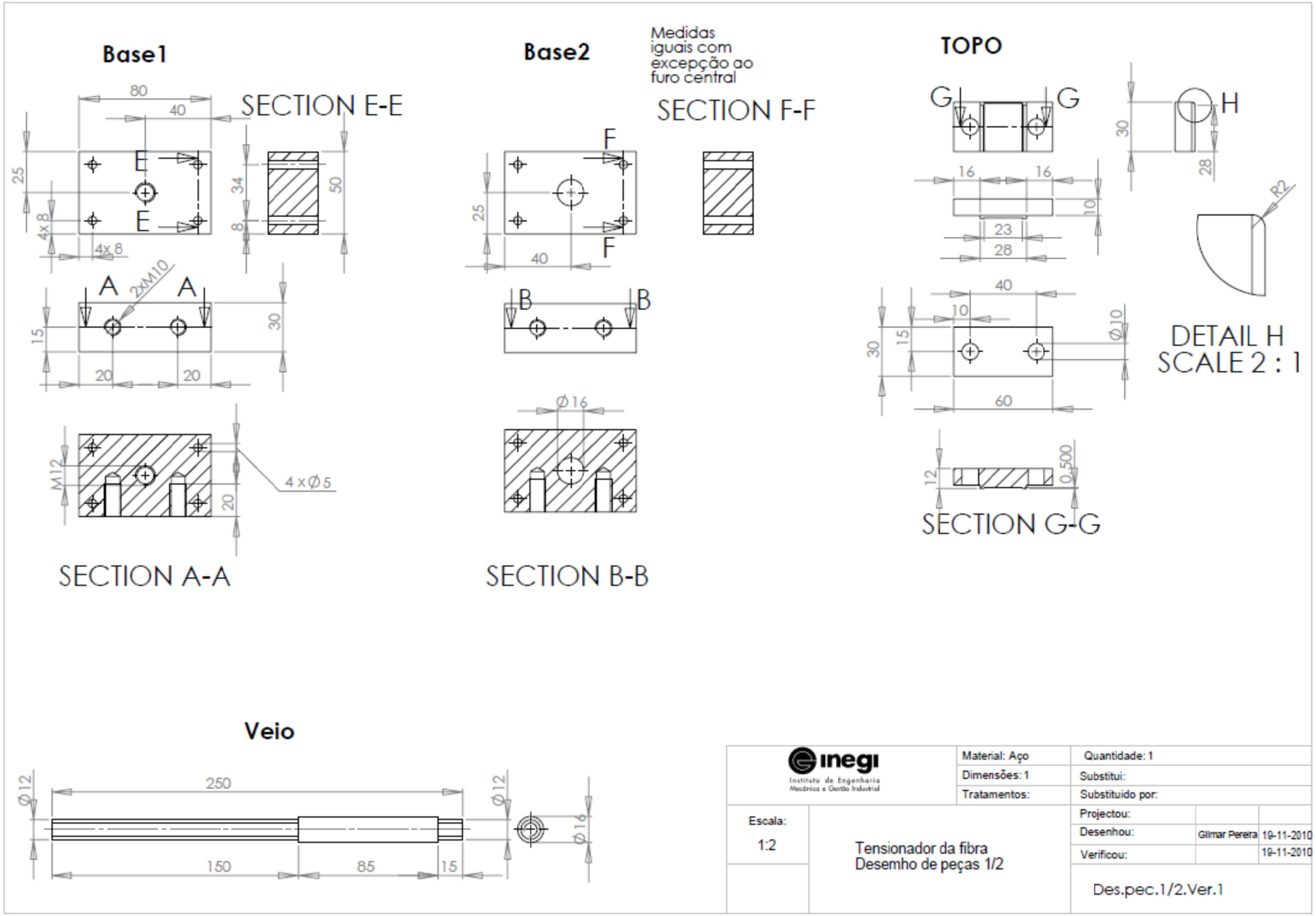


inegi
Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
UMEC-Unidade materiais estruturas compósitas

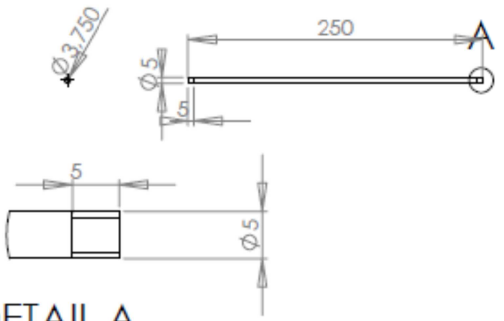
Material: Aço	Quantidade: 1		
Dimensões: 1	Substitui:		
Tratamentos:	Substituido por:		
Escala: 1:2	Projectou:		
	Desenhou:	Gilmar Pereira	19-11-2010
	Verificou:		19-11-2010

Desenho de conjunto do tensionador de fibra

Des.Con.Ver.1

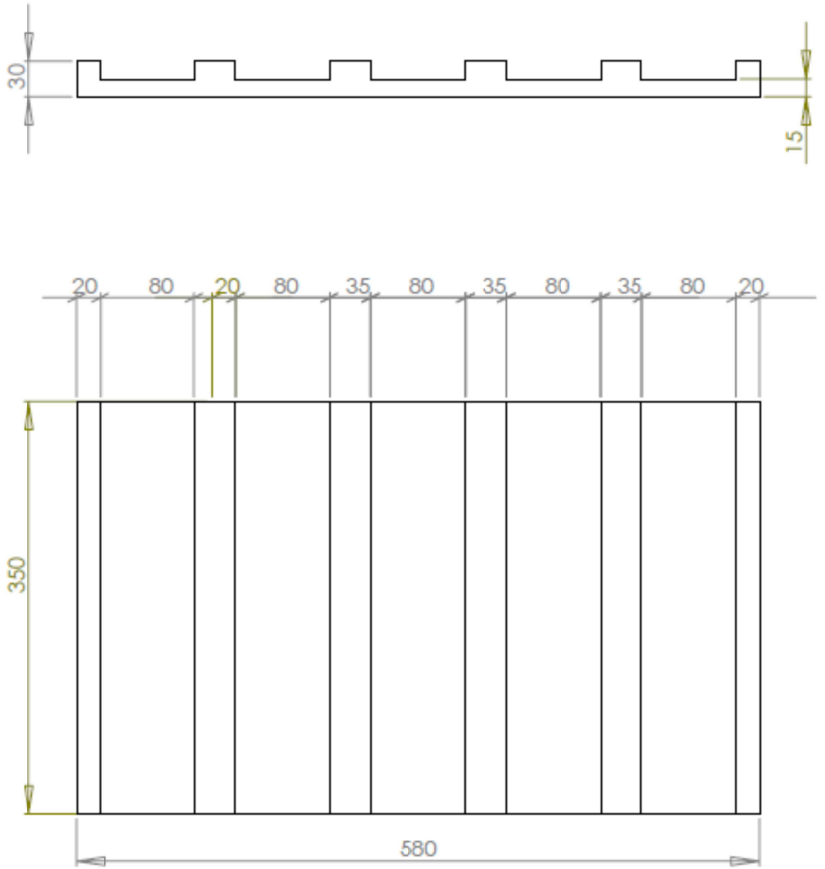

Base1
80
40
SECTION E-E
E
E
25
4x 8
4x 8
34
50
8
A
A
2xM10
15
30
20
20
M12
4 x Ø 5
20
SECTION A-A
Base2
Medidas iguais com excepção ao furo central
SECTION F-F
F
F
25
40
B
B
Ø 16
SECTION B-B
TOPO
G
G
16
16
10
23
28
30
28
H
R2
DETAIL H
SCALE 2 : 1
40
10
Ø10
30
15
60
12
0,500
SECTION G-G
Veio
Ø12
250
Ø12
Ø16
150
85
15
inegi
Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Material: Aço
Dimensões: 1
Tratamentos:
Quantidade: 1
Substitui:
Substituido por:
Escala:
1:2
Tensionador da fibra
Desemho de peças 1/2
Projectou:
Desenhou:
Gilmar Pereira
19-11-2010
Verificou:
19-11-2010
Des.pec.1/2.Ver.1

Guia

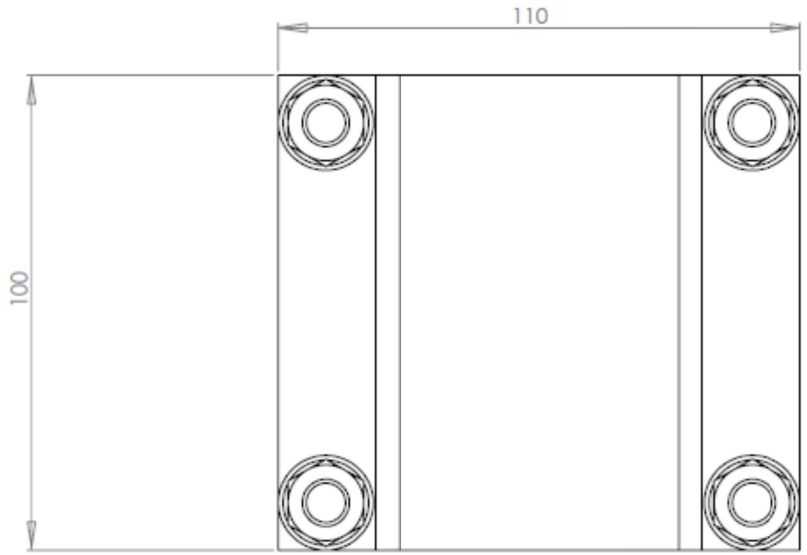


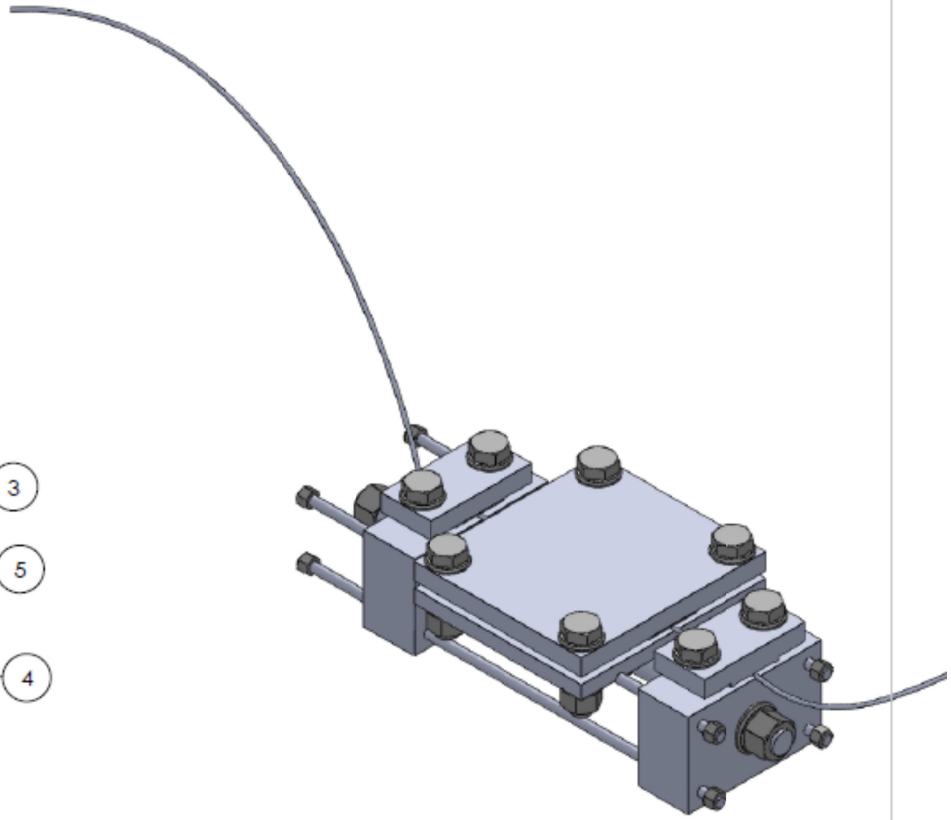
DETAIL A
SCALE 2 : 1

Base de montagem de varios conjuntos



inegi Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial UMEC-Unidade materiais estruturas compósitas	Material: Aço	Quantidade: 1		
	Dimensões: 1	Substitui:		
	Tratamentos:	Substituido por:		
Escala: 1:4	Tensionador da fibra Desenho de peças 2/2	Projectou:		
		Desenhou:	Gilmar Pereira	19-11-2010
		Verificou:		19-11-2010
		Des.pec.2/2.Ver.1		





ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	topo compressão		1
2	base compressão		1
3	ISO 4017 - M10 x 40-C	Parafudo M10	4
4	Hexagon Nut ISO - 4034 - M10 - C	Porca M10	4
5	Washer ISO 7090 - 10	Anilha M10	8

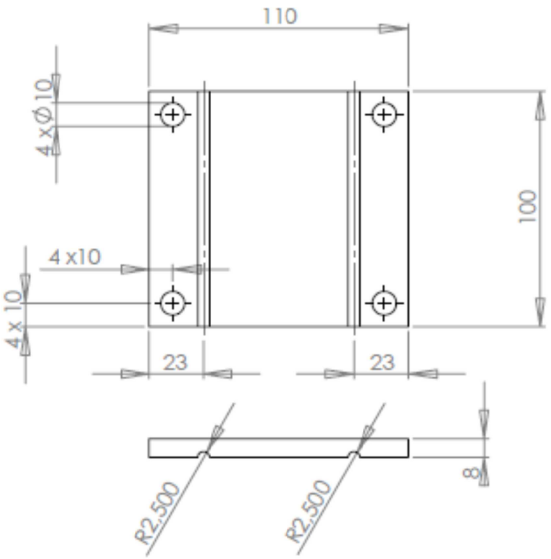
inegi
Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
UMEC-Unidade materiais estruturas compósitas

Material: Aço	Quantidade: 1		
Dimensões: 1	Substitui:		
Tratamentos:	Substituido por:		
Escala: 1:1	Projectou:		
	Desenhou:	Gilmar Pereira	19-11-2010
	Verificou:		19-11-2010

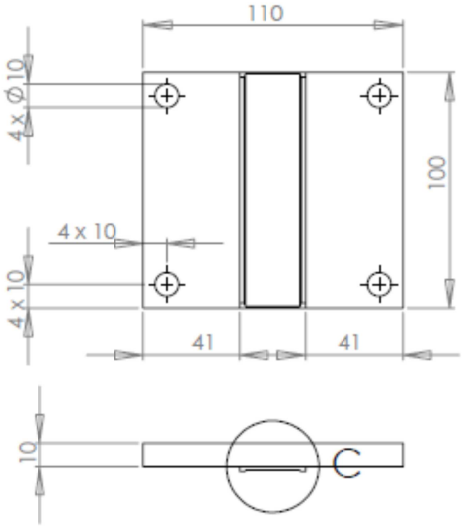
Compressor de fibra
Desenho de conjunto

Des.Con2.Ver.1

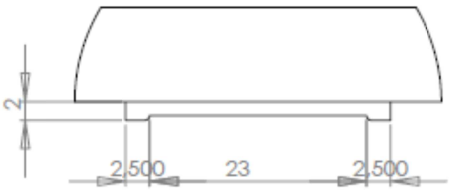
Base do Compressor de fibra



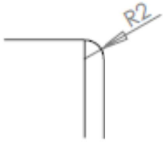
Topo do Compressor de fibra



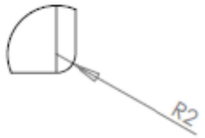




DETAIL C
SCALE 2 : 1



DETAIL B
SCALE 2 : 1



DETAIL A
SCALE 2 : 1

inegi Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial UMEC-Unidade materiais estruturas compósitas	Material: Aço	Quantidade: 1		
	Dimensões: 1	Substitui:		
	Tratamentos:	Substituido por:		
Escala: 1:2		Projectou:		
		Desenhou:	Gilmar Pereira	19-11-2010
		Verificou:		19-11-2010
	Compressor de fibra Desenho das peças	Des.PEC2.Ver.1		

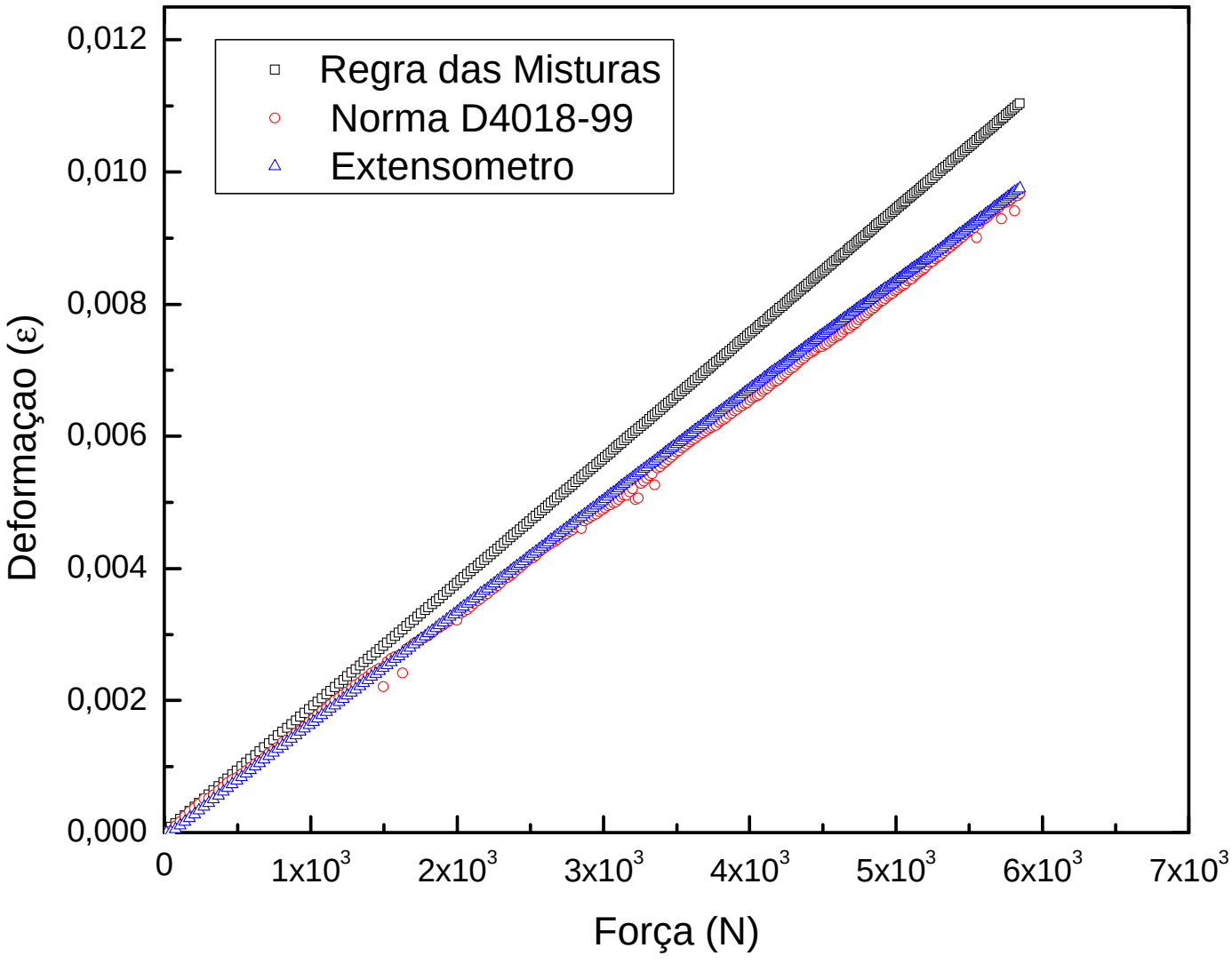
Anexo C

Comparação entre metodologias de cálculo de deformação.

Teste realizado para aferir qual a melhor metodologia de medição da deformação do provete.

Tabela 11- *Características do ensaio e dos provetes*

Características do provete	
Material	Prépreg-Fibra de Vidro: HPXSS EPX 15-360 TEX
Cura	90 min a 150ºC
Características do ensaio	
Tipo	Ensaio de tração contínuo
Velocidade	2 mm/min
Taxa de aquisição	5 Hz
Sensores utilizados	Extensómetro automático



Anexo D

Norma D4018-99- Standard Test Methods for Properties of Continuous Filament Carbon and Graphite Fiber Tows

Gilmar Pereira, Julho 2011

Standard Test Methods for Properties of Continuous Filament Carbon and Graphite Fiber Tows[1]

This standard is issued under the fixed designation D 4018; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 These test methods cover the preparation and tensile testing of resin-impregnated and consolidated test specimens made from continuous filament carbon and graphite yarns, rovings, and tows to determine their tensile properties.

1.2 These test methods also cover the determination of the density and mass per unit length of the yarn, roving, or tow to provide supplementary data for tensile property calculation.

1.3 These test methods include a procedure for sizing removal to provide the preferred desized fiber samples for density measurement. This procedure may also be used to determine the weight percent sizing.

1.4 These test methods include a procedure for determining the weight percent moisture adsorption of carbon or graphite fiber.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values in parentheses are for information only.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

D 70 Test Method for Specific Gravity/Density of Semi-solid Bituminous Materials/Asphalt Cement/Soft Tar Pitches by Pycnometer Test[2]

D 123 Terminology Relating to Textiles[3]

D 891 Test Methods for Specific Gravity, Apparent, of Liquid Industrial Chemicals[4]

D 1193 Specification for Reagent Water[5]

D 3800 Test Method for Density of High-Modulus Fibers[6]

D 3878 Terminology of High-Modulus Reinforcing Fibers and Their Composites[3]

D 5550 Test Methods for Soil Solids—Specific Gravity by Gas Pycnometer Test[7]

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines[8]

E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing[9]

E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers[6]

E 100 Specification for ASTM Hydrometers[9]

2.2 *Other Document:*

CRC Handbook of Chemistry and Physics[10]

3. Terminology

3.1 *Definition*

3.1.1 *sizing, n*—a generic term for compounds which, when applied to yarn or fabric, form a more or less continuous solid film around the yarn and individual fibers.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *desized fiber, n*—fiber which has had a sizing removed from it.

3.2.2 *fiber, n*—continuous filament carbon or graphite yarn, roving, or tow.

3.2.3 *sized fiber, n*—a fiber with a sizing applied to it.

3.2.4 *unsized fiber, n*—fiber which has never had a sizing applied to it.

3.3 **Symbols**

3.3.1 A—Unit conversion factor for tensile strength

3.3.2 B—Unit conversion factor for tensile modulus

3.3.3 E—fiber chord modulus

3.3.4 ϵ_l—Lower strain limit

3.3.5 ϵ_u—Upper strain limit

3.3.6 k_c—correction factor for density of size

3.3.7 L—specimen length

3.3.8 MUL—the mass per unit length of the sized fiber

3.3.9 MUL_f—the mass per unit length of the impregnated and consolidated fiber

3.3.10 P—maximum load

3.3.11 P_l—tensile load at lower strain limit

3.3.12 P_u—tensile load at upper strain limit

3.3.13 ρ_f—density of the fiber

3.3.14 ρ_{sf}—density of the fiber with sizing

3.3.15 RC—weight percent of resin (resin content)

3.3.16 W_1—specimen mass

4. Summary of Test Methods

4.1 These test methods include procedures for determining the tensile strength and modulus of a resin-impregnated and consolidated carbon fiber tow. Also included are procedures to measure the mass per unit length and density of the carbon fiber and the resin content of the resin-impregnated and consolidated specimens.

4.2 *MUL*—The *MUL* of the fiber is determined by dividing the mass of a sample of sized fiber by its length.

4.3 *Density*—The density of the fiber is determined using Archimedes' method or a pycnometer method. The recommended specimen is desized or unsized fiber. The ideal immersion fluid is one that completely wets the specimen and provides minimum toxicity or environmental hazard.

4.4 *Resin Content*—The resin content (weight percent) of the resin-impregnated and consolidated fiber is determined by comparing the mass per unit length of the impregnated and consolidated specimen to the fiber mass per unit length.

4.5 *Tensile Properties*—The tensile strength and tensile chord modulus of the fiber are determined by the tensile loading to failure of the resin-impregnated and consolidated fiber. The chord modulus is determined between defined strain limits. The purpose of the impregnating resin is to provide the fiber, when consolidated, with sufficient mechanical strength to produce an easily handled test specimen capable of sustaining uniform loading of the individual filaments in the specimen. The resin shall be compatible with the fiber and any size applied to it. The strain capability of the consolidated resin shall be at least twice the strain capability of the fiber.

5. Significance and Use

5.1 The properties determined by these test methods are of value in material specifications, qualifications, data base generation, certification, research, and development.

5.2 These test methods are intended for the testing of fibers that have been specifically developed for use as reinforcing agents in advanced composite structures. The test results of an impregnated and consolidated fiber should be representative of the strength and modulus that are available in the material when used as intended. The performance of fibers in different resin systems can vary significantly so that correlations between results using these test methods and composite testing may not always be obtained.

5.3 The reproducibility of test results is dependent upon precise control over all test conditions. Resin type, content and distribution, curing process, filament alignment, gripping in the testing machine, and alignment in the testing machine are of special importance.

5.4 The measured strengths of fibers are not unique quantities and test results are strongly dependent on the test methods used. Therefore the test method described here will not necessarily give the same mean strengths or standard deviations as those obtained from single filaments, dry fibers, composite laminas, or composite laminates.

6. Apparatus

6.1 Three sets of apparatus are required. One set is for resin impregnation of the fiber. A second set is for curing the resin-impregnated specimens. A third set is for tensile testing the resin-impregnated and consolidated specimens. Optional apparatus may be used for applying end tabs to the specimens and removing sizing.

6.1.1 *Resin Impregnation*—The goal of the resin-impregnation apparatus is to apply and uniformly impregnate resin into the fiber. This is normally achieved by dipping the fiber into the resin and then working the wet fiber over rolls or through a die, or both. While automated apparatuses are preferred for consistency, any apparatus which achieves uniform impregnation of 35 to 60 % resin by weight and does not damage the fiber is acceptable.

6.1.2 *Consolidation*—An apparatus to hold the impregnated specimens under tension during consolidation is required.

6.1.3 *Optional End Tabs*—An apparatus to cast resin end tabs on specimens may be used. Apparatuses to apply and align other forms of end tabs such as bonded on cardboard or metal tabs may also be used.

6.1.4 *Testing*—A tensile testing machine and recorder meeting the requirements of Practices E 4 at the maximum expected test load are required. The load recording device shall be coordinated with the extensometer and strain recorder to assure that the corresponding load and elongation of the specimen are recorded at essentially the same time. The testing machine shall also have the following features:

6.1.4.1 *Grips*—Grips suitable for loading the tabbed or untabbed specimen without damaging it are required. For resin tabbed specimens a custom grip is generally required. For untabbed or cardboard tabbed specimens pneumatic or hydraulically powered grips are typically used. Different grip pressure settings may be required for different fibers.

6.1.4.2 *Jaws*—Jaws compatible with the grips and capable of holding a specimen without damaging it are required. For untabbed specimens, flat jaws with rubber or other compliant materials bonded to the face are generally used. Sandpaper may also be placed on the grips to reduce slippage. For cardboard tabbed specimens serrated jaws are generally used. Jaws should be inspected regularly and cleaned or repaired as required.

6.1.4.3 *Extensometer and Recorder*—An extensometer and recording device in accordance with the requirements of Practice E 83 Class B-2 are required. The extensometer and recorder shall be coordinated with the tensile testing machine so that the corresponding load and elongation of the specimen are recorded at essentially the same time.

6.1.4.4 *Balance, Analytical*—Accuracy of ±0.0002 g for mass per unit length, density, and resin or size content determinations.

6.1.4.5 *Balance, Laboratory*—Accuracy of ±0.1 g for measuring components of resin.

6.1.4.6 *Length Measuring Devices*—Devices to measure the length of impregnated and consolidated specimens and dry fiber to ±2-mm accuracy are required.

6.1.4.7 *Density Measuring Device*—See Test Methods D 70, D 3800, or D 5550.

[1] These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D-30 on Composite Materials and are the direct responsibility of Subcommittee D30.03 on Constituent/Precursor Properties.

Current edition approved Oct. 10, 1999. Published February 2000. Originally published as D 4018 – 81. Last previous edition D 4018 – 93.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.03.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 07.01.

[4] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.05.

[5] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.01.

[6] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03.

[7] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.09.

[8] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

[9] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.03.

[10] CRC Press Inc., Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, 73rd Edition, 1992–1993.

Copyright © ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

119

6.1.4.8 *Forced Air Oven*—A forced air oven of sufficient size and temperature capabilities to cure the impregnated fiber on the curing device. The temperature shall be controlled to ±10°C.

7. Reagents and Materials

7.1 *Reagent Water*—Unless otherwise indicated, references to water shall be understood to mean reagent water as defined by Type III of Specification D 1193.

7.2 *Resin.*

7.3 *Commercial Grade Solvent,* (optional) for resin dilution.

7.4 *Hardener or Catalyst.*

7.5 *Surfactant* (optional).

8. Test Specimens

8.1 *Mass per Unit Length Specimen*—The specimen to measure mass per unit length is a 1-m minimum length of fiber in the form in which it is intended to be used. Test one specimen per sample. Coil the specimen into a usable form for testing. Care is required to not damage and lose filaments from the specimen.

8.2 *Density Specimen*—Density specimens may be sized, unsized, or desized material. Unsized or desized samples are preferred. Test one specimen per sample. A 1-m minimum length is required for Test Method D 3800. For methods in Test Methods D 70 and D 5550, a suitable volume to fill the container is recommended. Coil the specimen into a usable form for testing. Care is required to not damage and lose filaments from the specimen.

8.3 *Tensile Test Specimen*—The tensile specimen shall be a tabbed or untabbed resin-impregnated and consolidated fiber. Tabbed specimens shall have a 150-mm gage length between the tabs. Untabbed specimens shall be of sufficient length to allow a 150-mm gage length between the grips when they are tested. Samples with 3000 filaments or less may be tested using specimens of more than one fiber bundle to facilitate handling. Combine the bundles before resin impregnation and count the test results as one specimen. Test a minimum of four test specimens per sample. Separate test specimens for modulus and strength determination are permitted; however, four specimens for each test are required. Specimens that are fuzzy, curved, not uniform in cross section, have broken filaments, resin humps, or other observable defects should be rejected unless they are representative of the material being tested.

9. Conditioning

9.1 Fibers that adsorb less than 0.5 % moisture by weight at 23 ± 2°C and 90 % or greater relative humidity require no conditioning before testing. Conduct mass per unit length, density, and tensile testing for these materials at 23 ± 7°C and 50 ± 20 % relative humidity unless other conditions are the variables of interest.

9.2 Condition fibers that adsorb more than 0.5 % moisture by weight (at 23 ± 2°C and 90 % or greater relative humidity) for a minimum of 24 h at 23 ± 2°C and 50 ± 10 % relative humidity. Conduct mass per unit length and density testing at 23 ± 2°C and 50 ± 10 % relative humidity unless other conditions are the variables of interest. Conduct tensile testing at 23 ± 7°C and 50 ± 20 % relative humidity unless other conditions are the variables of interest.

9.3 To determine moisture adsorption, dry a minimum of five mass per unit-type specimens at 120 ± 5°C for 24 h in a circulating air oven. Cool samples in a desiccator. Remove samples from desiccator one at a time and immediately weigh them. Place samples in a humidity chamber and maintain at 23 ± 2°C and 90 % or greater relative humidity for 24 h. Remove samples from the humidity chamber one at a time and weigh immediately.

9.4 If all specimens are conditioned for 24 h and mass per unit length and density testing are performed at 23 ± 2°C and 50 ± 10 % relative humidity, then no testing for moisture adsorption is required.

9.5 Moisture adsorption testing is only required once annually for a standard product.

10. Specimen Preparation

10.1 *Mass per Unit Length*—No preparation is required. The sample is taken from a package of material as it is intended to be used.

10.2 *Density*—The preferred density specimen is a desized or unsized fiber. This eliminates any need to correct for the density of the sizing. The sizing may be removed using solvent extraction, pyrolysis, or other means. An example method is described in Appendix X1. An unsized sample of a sized fiber would have to be collected during the production of the fiber and is therefore not recommended.

10.3 *Tensile Test*—The tensile test specimen must be impregnated with resin and consolidated before testing.

10.3.1 *Resin Preparation*—Any resin that meets the requirements of 4.5 may be used. The resin when combined with the fiber shall produce a composite (reinforcement/matrix) failure. A resin generally found satisfactory is a combination of bisphenol A (or bisphenol F) epoxy and diethyltoluene diamine in the weight ratio of 3.9:1. A solvent that lowers the viscosity of a resin mixture or softens the sizing, or both, may be selected for use with the resin. The amount and type of solvent used will vary with the product and apparatus used for impregnation. Prepare and store the resin in accordance with the manufacturer's instructions.

10.3.2 *Fiber Impregnation*—The resin shall be maintained within a suitable viscosity or temperature range throughout the impregnation process that assures reproducible specimen constituency and quality. An automated impregnation device is recommended but not required. The objective of impregnation is a uniform, well-collimated strand with adequate resin, content, typically 35 to 60 % by weight.

10.3.2.1 Wind or attach the impregnated fiber to a rack or other device to hold it under tension during consolidation.

10.3.2.2 Check the consolidated impregnated fiber resin content at least daily to ensure adequate resin pickup. Determine the mass of a known length of impregnated and consolidated fiber. Compute the resin content using the mass per unit length of the fiber as a reference.

10.3.2.3 *Tabbing*—End tabs may be applied to the impregnated and consolidated specimens but are not required. End tab material must adequately grip the specimen without slipping. Heavy paper or poster board have been used successfully as tabs. The distance between tabs shall be 150 mm.

11. Procedure

11.1 *Mass per Unit Length*—Take the mass per unit length specimen from the fiber in the same form as it is intended to be used. Test fiber with size with the size on the fiber. Test one specimen per sample.

11.1.1 Using a calibrated measuring device measure a minimum of a 1-m (±2-mm) length of fiber. Hold the fiber under light hand tension while measuring and cutting it. Coil the fiber onto a usable form taking care not to damage or lose filaments.

11.1.2 Determine the mass of the specimen using an analytical balance.

11.1.3 *Retests*—Reject any specimen which has an obvious flaw or deviation from the requirements of these test methods. Prepare a new or spare specimen from the same sample and test to replace any specimens eliminated in accordance with this paragraph.

11.1.3.1 Discard test results for any condition that compromises the integrity of the test. These conditions must be documented.

11.1.3.2 Retest any suspect single specimen or sample. Retesting of specimens requires twice the number of specimens that were suspect. Retesting of a sample requires twice the number of specimens that were tested in the suspect sample. The average result of the retested specimens shall replace the original value. However, all values must be recorded.

11.2 *Density*—Test density in accordance with Method A of Test Methods D 3800 (for Archimedes' method) or D 70/D 5550 (for a pycnometer method) with modifications. The preferred density sample is unsized or desized fiber. Test one specimen per sample. Coil the fiber into a suitable form taking care not to damage or lose filaments.

11.2.1 *Retests*—Any specimen that has an obvious flaw or deviation from the requirements of these test methods shall be rejected. Prepare a new or spare specimen from the same sample and test to replace any specimens eliminated in accordance with this paragraph.

11.2.1.1 Discard test results for any condition that compromises the integrity of the test. These conditions must be documented.

11.2.1.2 Retest any suspect single specimen or sample. Retesting of specimens requires twice the number of specimens that were suspect. Retesting of a sample requires twice the number of specimens that were tested in the suspect sample. The average result of the retested specimens shall replace the original value. However, all values must be recorded.

11.3 *Tensile Test*—Test the impregnated and consolidated fiber in a calibrated tensile testing machine using a calibrated extensometer. Test a minimum of four specimens for strength and modulus. These may be the same four specimens or two sets of four specimens. (If the extensometer causes premature tensile failure it may be necessary to test four additional specimens without the extensometer for strength only.)

11.3.1 Install the appropriate grips and jaws into the tensile testing machine. For untabbed specimens set the distance between the grips to 150 mm.

11.3.2 Set the speed of the testing machine. The maximum acceptable speed is 250 mm/min (10 in./min). The maximum practical speed may be limited by the speed of data sampling or recording equipment.

11.3.3 Select the appropriate load range of the tensile testing machine.

11.3.4 Set the speed of any recording or sampling equipment as required.

11.3.5 Place the specimen in the jaws and carefully align it so that it is centered in the jaws and aligned with the loading axis. Close the grips assuring that the specimen remains aligned.

11.3.6 Preload the specimen to the appropriate load in accordance with Table 1. Determine the load using the expected modulus and cross-sectional area of the fiber.

11.3.7 Attach the extensometer if modulus is to be measured. Take particular care not to damage or cut filaments.

11.3.8 Start the recording or sampling equipment and the tensile testing machine.

11.3.9 When the maximum strain required for modulus calculation has been exceeded, the extensometer may be removed. This may be done while the test is in progress or after stopping the testing machine. Take particular care not to damage or cut filaments.

11.3.10 Test the specimen to failure. Observe the failure of specimen.

11.3.11 Record the failure load and the load at the strains in accordance with Table 2 for use in calculating the chord modulus.

11.3.12 *Retests*—Any specimen that has an obvious flaw or deviation from the requirements of these test methods shall be rejected. Prepare a new or spare specimen from the same sample and test to replace any specimens eliminated in accordance with this paragraph.

11.3.12.1 Discard test results for any condition that compromises the integrity of the test. These conditions must be documented. Examples of these conditions include slippage of the specimen or extensometer, breaks in the tabs or grips, breaks at the extensometer attachment points, and abnormal breaks which may be due to poor resin impregnation (see 11.4).

11.3.12.2 Retest any suspect single specimen or sample. Retesting of specimens requires twice the number of specimens that were suspect. Retesting of a sample requires twice the number of specimens that were tested in the suspect sample. The average result of the retested specimens shall replace the original value. However, all values must be recorded.

11.4 *Failure Mode*—Record atypical mode and location of failure of individual specimens. Typical failure mode and location may be grouped for the fiber. Choose, if possible, a standard description using the three-part failure mode code that is shown in Fig. 1.

11.5 *Grip/Tab Failures*—Reexamine the means of load introduction into the material if a significant fraction of failures

TABLE 1 Maximum Preloads

Typical Product	Maximum Preload
Strain at failure (microstrain)	(microstrain)
$\varepsilon \geq 12\,000$	200
$6000 \leq \varepsilon < 12\,000$	100
$\varepsilon < 6000$	100

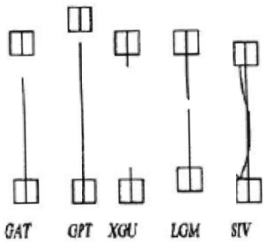
120

Gilmar Pereira, Julho 2011

Gilmar Pereira, Julho 2011

TABLE 2 Chord Modulus Strain Limits

Typical Product	Chord Modulus	
Strain at failure (microstrain)	strains (microstrain)	
	lower	upper
$\epsilon \geq 12\,000$	1000	6000
$6000 \leq \epsilon < 12\,000$	1000	3000
$\epsilon < 6000$	500	1500



First Character		Second Character		Third Character	
Failure Type	Code	Failure Area	Code	Failure Location	Code
Grip/tab	G	Inside Grip/Tab	I	Bottom	B
Lateral	L	At grip/tab	A	Top	T
Long Splitting (fiber pullout)	S	<1W from grip/tab	W	Middle	M
		Tab Pullout	P	Various	V
EXplosive	X	Various	V	Unknown	U
Other	O	Unknown	U		

FIG. 1 Three-Part Failure Mode Code

in a sample population occur within one specimen width of the tab or grip. Factors considered should include the tab alignment, tab material, tab adhesive, grip type, grip pressure, and grip alignment.

12. Calculations

12.1 *Mass per Unit Length, MUL*—Calculate the mass per unit length of the fiber using the following equation:

$$MUL = W_1/L \quad (1)$$

where:
MUL = mass per unit length, g/m;
W_1 = mass of the specimen, g; and
L = length of the specimen, m.

12.2 *Density*—Calculate the density of the fiber using following sets of equations.

12.2.1 *Desized or Unsized Fiber (Preferred)*—Use equations found in Test Methods D 3800, D 70, or D 5550.

12.2.2 *Sized Fiber*—Determine the fiber density as follows:

$$\rho_f = \rho_{sf} - k_s \quad (2)$$

where:
ρ_f = fiber density, g/cm^3;
ρ_{sf} = density of fiber + sizing, g, and
k_s = correction factor (if required). (k_s is determined by means of repeated tests on sized and desized or unsized samples to correlate sized fiber results with the preferred technique. k_s may be a function of size level and size type. A correction factor is not required if the test differences are less than 1.0 % of the preferred technique result.)

12.3 *Tensile Test*:

12.3.1 *Resin Content*—Calculate the resin content of the impregnated and consolidated fiber using the following equation:

$$RC = 100[1 - (MUL/MUL_c)] \quad (3)$$

where:
RC = resin content, weight %;
MUL = mass per unit length of fiber, g/m; and
MUL_c = mass per unit length of the impregnated and consolidated fiber, g/m.

12.3.2 *Tensile Strength*—Calculate the tensile strength of the fiber using the following equation:

$$\text{Tensile Strength (MPa)} = A \times P \times \rho_f / MUL \quad (4)$$

where:
P = maximum load measured in tensile test, N (lb);
ρ_f = fiber density, g/cm^3;
MUL = fiber mass per unit length, g/m; and
A = unit conversion factor (1 if load in N).

12.3.3 *Tensile Modulus*—Calculate the tensile chord modulus of the fiber between the strain values in accordance with 11.3.11 using the following equation:

$$E = B \times (P_u - P_l) \times \rho_f / [(\epsilon_u - \epsilon_l) \times MUL] \quad (5)$$

where:
E = fiber chord modulus, GPa;
P_u = tensile load at upper strain limit, N (lb);
P_l = tensile load at lower strain limit, N (lb);
ρ_f = fiber density, g/cm^3;
ϵ_u = upper strain limit, microstrain;
ϵ_l = lower strain limit, microstrain;
MUL = fiber mass unit length, g/m; and
B = unit conversion factor (10^{-3} if load is in N).

13. Report

13.1 Report the following information:

13.1.1 *MUL Report*:

13.1.1.1 Complete identification of the samples tested to assure traceability of test results,

13.1.1.2 Date of test,

13.1.1.3 Test facility,

13.1.1.4 Identification of the individual performing test,

13.1.1.5 *MUL* of the specimens tested, and

13.1.1.6 Any deviations from these test methods.

13.1.2 *Density Report*:

13.1.2.1 Complete identification of the samples tested to assure traceability of test results,

13.1.2.2 Date of test,

13.1.2.3 Test facility,

13.1.2.4 Identification of the individual performing test,

13.1.2.5 Immersion fluid and degassing technique if appropriate,

13.1.2.6 Density of the specimens tested, and

13.1.2.7 Any deviations from these test methods.

13.1.3 *Tensile Test Report*:

13.1.3.1 Complete identification of the samples tested to assure traceability of test results,

13.1.3.2 Date of test,

13.1.3.3 Test facility,

13.1.3.4 Identification of the individual performing test,

13.1.3.5 Impregnation apparatus, resin, and consolidation or cure cycle used,

13.1.3.6 Tensile testing apparatus,

13.1.3.7 Individual and average tensile strength and tensile chord modulus of the specimens tested, and

13.1.3.8 Reason for specimen rejection and atypical specimen failure modes, as well as a typical failure mode.

13.1.3.9 Any deviations from these test methods.

14. Precision and Bias

14.1 *Precision*—The precision of the procedures for measuring *MUL*, density, tensile strength and tensile chord modulus, and weight percent size is being determined.

14.2 *Bias*—Since there is no accepted reference material suitable for the procedure for measuring tensile strength and tensile chord modulus, bias has not been determined. The procedures for measuring *MUL* and weight percent size have no bias because the values of *MUL* and weight percent size are defined only in terms of these test methods.

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. REMOVING THE SIZE FROM SIZED FIBER SPECIMENS AND DETERMINING THE PERCENT SIZING CONTENT

X1.1 Scope

X1.1.1 This test method describes a procedure for removing the size from sized fiber specimens and determining the percent sizing content.

X1.2 Summary of Test Method

X1.2.1 Sizing is completely pyrolyzed from the fiber by heating the specimen in a furnace under inert atmosphere. A typical temperature and time to accomplish this are 450°C for 15 min. However, a particular set of time and temperature requirements must be determined for each size and fiber under consideration.

X1.3 Significance and Use

X1.3.1 The result of this test method, a desized fiber specimen, is the preferred specimen for density measurement.

X1.3.2 This test method may be used to determine the weight percent sizing of the fiber specimen.

X1.4 Apparatus

X1.4.1 *Electric Furnace*—An electric furnace with adequate exhaust ventilation and capable of the temperature required to pyrolyze the sizing under consideration. The furnace is supplied with nitrogen to maintain an inert atmosphere.

X1.4.2 *Flow Meter*—A flow meter for nitrogen gas with a recommended range from 0 to 50 L/min for use in the furnace apparatus.

X1.4.3 *Flow Meter*—A flow meter for nitrogen gas with a recommended range from 0 to 10 L/min for use in the cool-down sagger apparatus.

X1.4.4 *Desiccator*—A desiccator of sufficient size to hold the specimens.

X1.4.5 *Specimen Tray*—A specimen tray to hold the specimens during pyrolysis and cool down. A stainless steel tray with permanently marked or numbered bins is recommended.

X1.4.6 *Cool-Down Sagger*—A cool-down sagger of sufficient size to enclose the specimen tray. Stainless steel construction is recommended to avoid heat damage from the hot specimen tray. The cool-down sagger is supplied with nitrogen to maintain an inert atmosphere.

X1.5 Test Specimen

X1.5.1 Test one test specimen per sample.

X1.6 Conditioning

X1.6.1 See Section 9.

X1.7 Procedure

X1.7.1 Cut a minimum 1-m specimen of fiber. Coil the fiber into a usable form taking care not to damage or lose filaments. It is recommended that the specimen mass not exceed 2 g.

X1.7.2 Determine the mass of the specimen using an analytical balance with ±0.0002-g accuracy.

X1.7.3 Increase the nitrogen flow in the preheated furnace to reduce the influx of air. Remove a preheated tray from the furnace and place the specimens in the tray.

X1.7.4 Return the tray to the preheated furnace for the required time at temperature. Maintain the furnace nitrogen flow at a sufficient rate to maintain an inert atmosphere but not so high as to remove loose filaments from the samples.

X1.7.5 After the pyrolysis is complete, remove the specimen tray from the furnace and place in the cool-down sagger under nitrogen purge for approximately 15 min. Maintain the sagger nitrogen flow at a sufficient rate to maintain an inert atmosphere but not so high as to remove loose filaments from the samples.

X1.7.6 At the end of the cool-down period, remove the tray from the sagger and determine the mass of the desized fiber immediately. If this weighing will be delayed, place the specimens in a desiccator to prevent moisture adsorption on the fiber.

Anexo E

Materiais Utilizados

TEIJIN

Certificate of Analysis

QAP 004,F2 Rev L

Toho Tenax
Toho Tenax America, Inc.
121 Cardiff Valley Road
Rockwood, TN 37854
Tel. (865) 354-5500
Fax (865) 354-5547

Customer:	TCR Composites	**Fax To:**	Susie Hales	**Fax Number:**	Email
CustomerPO#:	10PN154	**Order:**	36254	**Ship Date:**	10/6/2010
Customer P/N:	n/a	**Product:**	Tenax®-J UTS50 F24 24K 1600tex DCP (Tenax®-J G30-700 24K HTA-7D F402)		
Part Number:	J30742HP	**Quantity:**	1375.66 lbs.	**Certifies To:**	Internal Specification
Lot Number:	***100700630***				

We are pleased to advise that the product (s) listed above has been released for shipment. We certify that the lots of Carbon Fiber listed below have been tested by standard test methods and determined to have the following properties:

FOR NON-AEROSPACE USE ONLY

	Average	cv%
Tensile Strength (ksi):	738	2.9
Tensile Modulus (msi):	34.6	1.4
Elongation (%):	2.13	2.8
Linear Density w/s (g/m):	1.6421	0.7
Size (%):	1.68	9.6
Density (g/cc):	1.79	0.3
# of samples:	192	
Twist, turn/m:	Never Twisted	
Date of Manufacture:	July 2010	
Manufacturing Location:	Mishima, Japan	

David Rainwater
Quality Assurance 10/6/2010

These commodities, technology or software are controlled by U. S. Export Administration Regulation. Diversion contrary to U. S. Law is prohibited.

If goods are not received in a reasonable time or if there are any questions, please call 1-800-252-3001 (or (865) 354-8408).
Toho Tenax America, 121 Cardiff Valley Road, Rockwood, TN 37854.

OWENS CORNING

INNOVACIONES PARA VIVIR℠

OWENS CORNING

10PN055

QUALITY CERTIFICATE

TEXTILE PLANT

Lot 051024

DATE: 2010-05-25

ORDER: 0

CUSTOMER: TCR Composites LOTE: 27,28/10/2009

SAP: 545978

PRODUCT: HPXSS EPX15 9mic 360 BP QUANTITY: 64.1 KG

PROPERTIES: SPECIFICATION:

	MIN	NOM	MAX	TEST METHOD	RESULTS
SOLIDS (%)	0.54	0.67	0.80	W-07-Da	0.67
MOISTURE CONTENT (%)			0.15%	W-07-Da	0.004%
TEX (GR/1000m)	333	362	391	W-07-Da	363
TENSILE STRENGHT (Ksi)	450			ASTM-D2343	523

RECEIVED 6-10

5 BOBINAS (64.1 Kg.)

TESTED BY:

Juan Arroyo Olalde

QUALITY TECHNICIAN

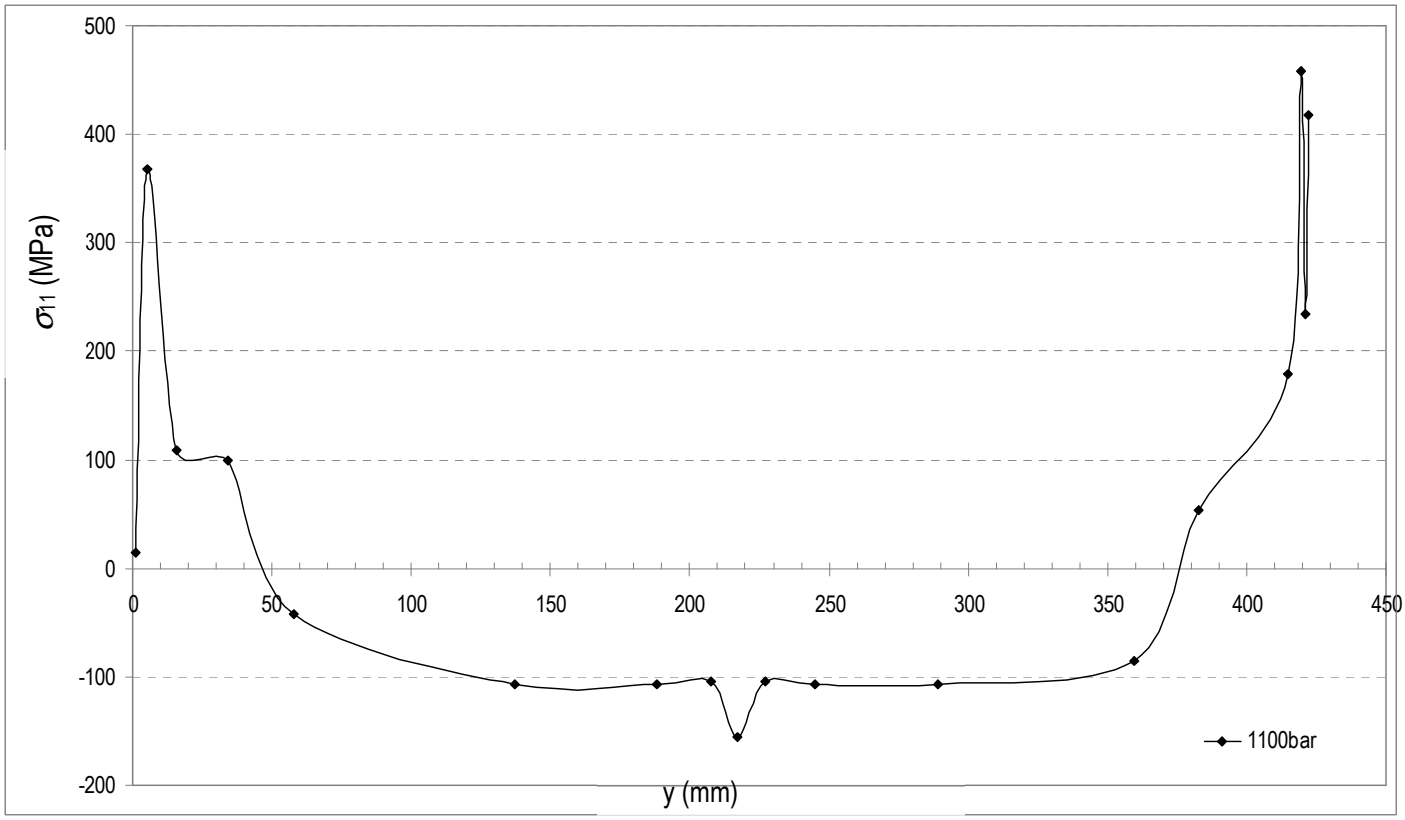
135 Lot

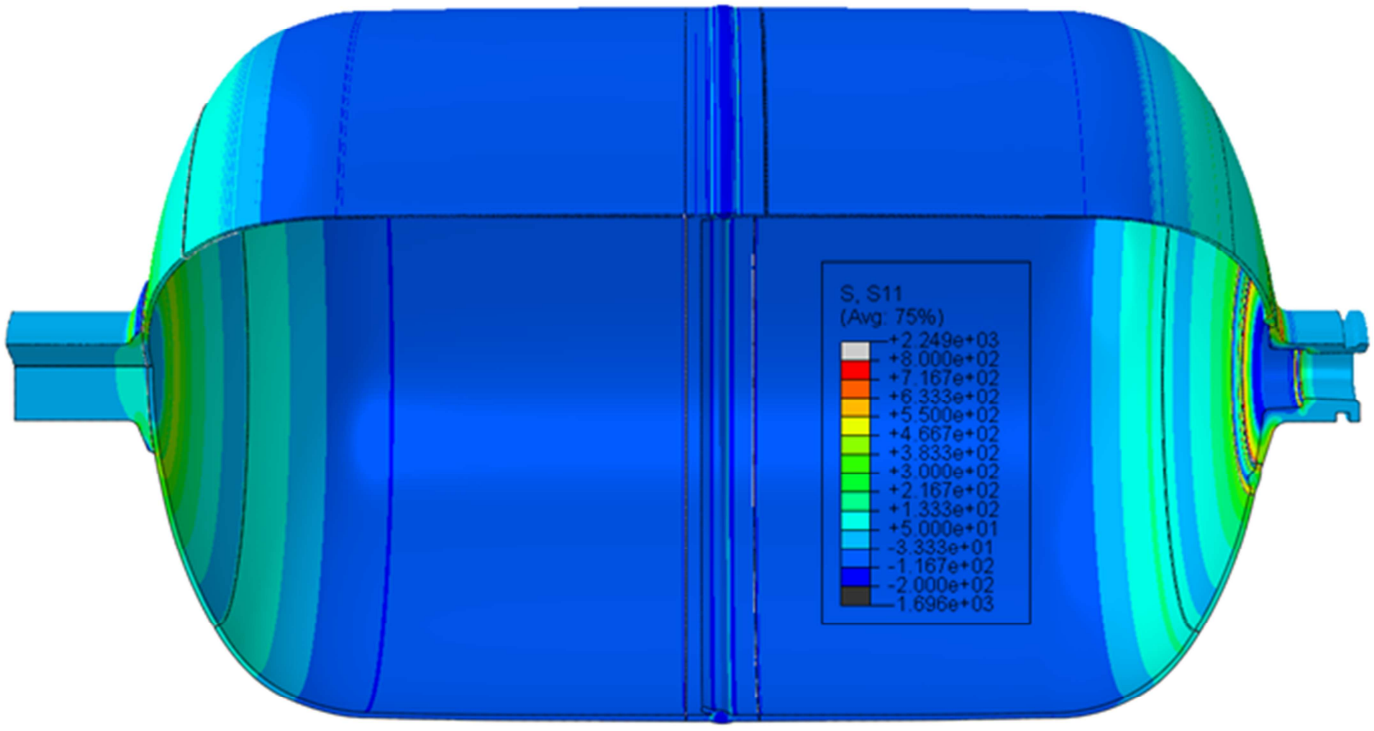
FO-STC-020

Anexo F

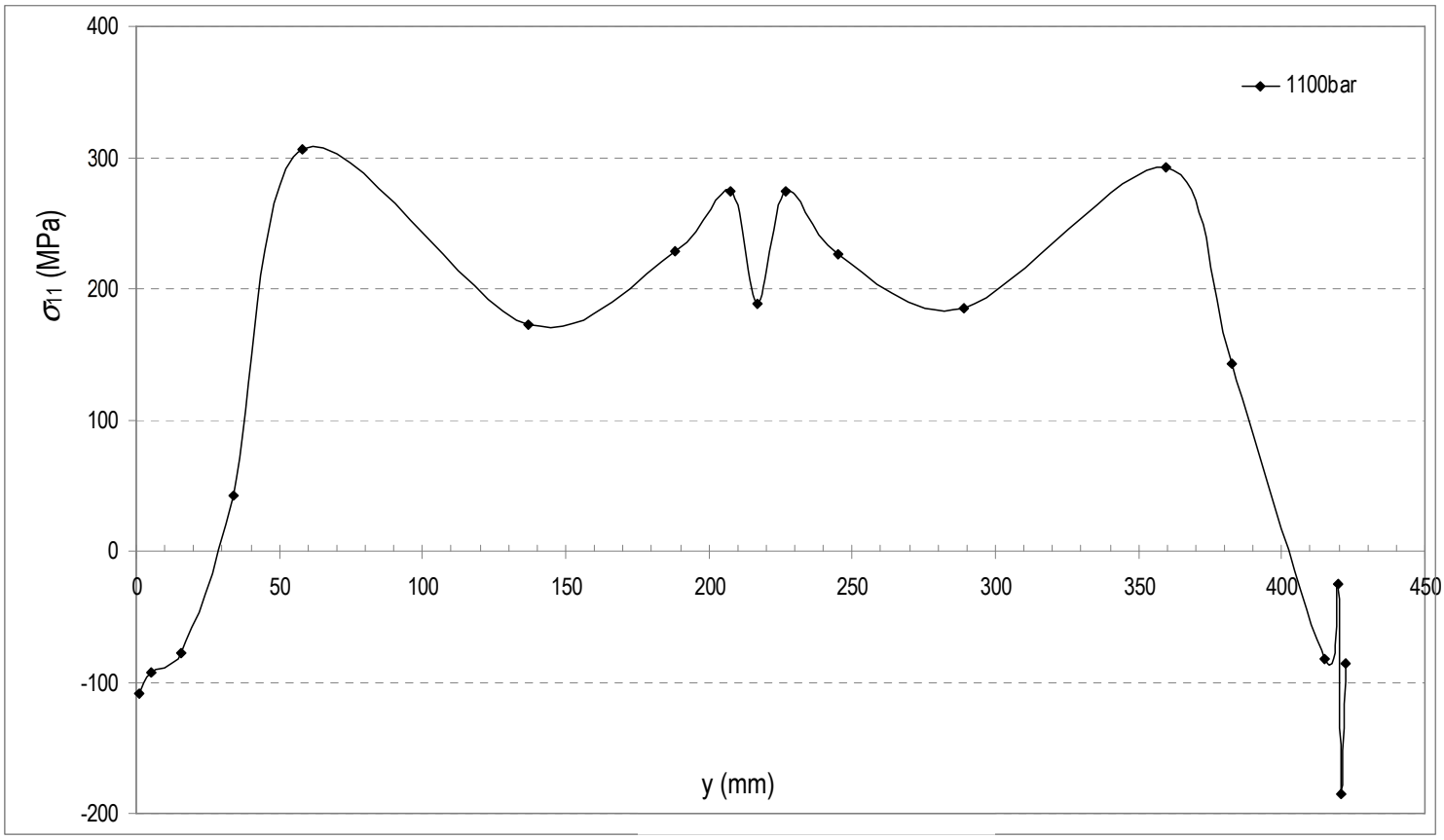
Resultados da Simulação por Elementos Finitos do Reservatório (COPV)

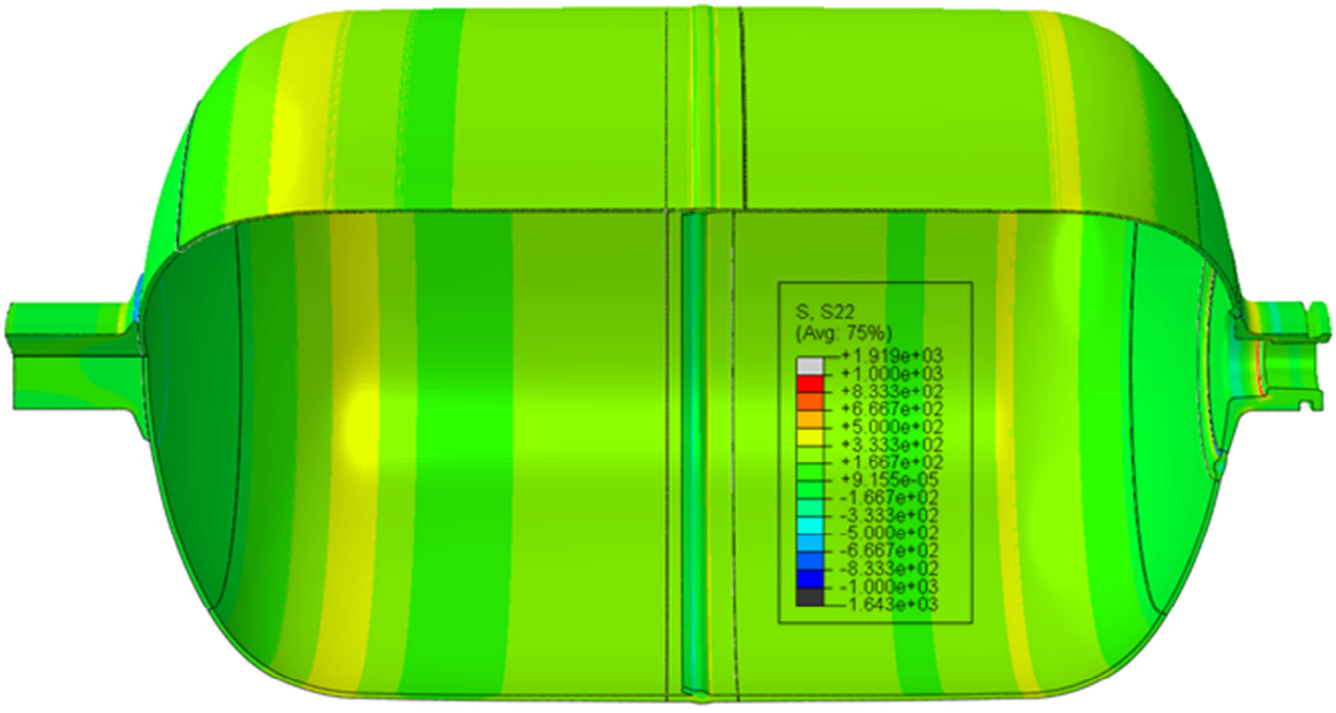
Tensão σ_{11} ao longo do eixo do reservatório com uma pressão interna de 1100bar





Tensão σ_{22} ao longo do eixo do reservatório com uma pressão interna de 1100bar





Tensão σ_{33} ao longo do eixo do reservatório com uma pressão interna de 1100bar

