

Carlos Xavier Azevedo Soares

Estudo e desenvolvimento de reservatório para armazenamento de hidrogénio



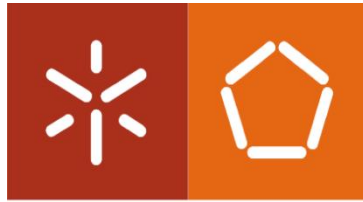
Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carlos Xavier Azevedo Soares

**Estudo e desenvolvimento de reservatório
para armazenamento de hidrogénio**

Outubro de 2021





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carlos Xavier Azevedo Soares

**Estudo e Desenvolvimento de Reservatório
para Armazenamento de Hidrogénio**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor João Pedro Lourenço Gil Nunes

Engenheiro Miguel Vasconcelos

Outubro de 2021

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho

[Caso o autor pretenda usar uma das licenças Creative Commons, deve escolher e deixar apenas um dos seguintes ícones e respetivo lettering e URL, eliminando o texto em itálico que se lhe segue. Contudo, é possível optar por outro tipo de licença, devendo, nesse caso, ser incluída a informação necessária adaptando devidamente esta minuta]



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

[Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original. É a licença mais flexível de todas as licenças disponíveis. É recomendada para maximizar a disseminação e uso dos materiais licenciados.]

AGRADECIMENTOS

Reservo este espaço para agradecer a todos aqueles que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização do meu curso desde o primeiro até ao último dia, nomeadamente:

À minha família, Mãe, Padrasto e Irmão, principalmente, por todo o apoio e dedicação desde o primeiro momento em que me viram crescer e me ajudaram a ser a pessoa que sou hoje, mas mais importante ainda por me darem as condições necessárias para concluir com sucesso a minha formação - sem eles nada disto seria possível.

Em seguida, ao Rui Gomes, Rui Ribeiro, Ricardo Machado e Vítor Malheiro por todos os momentos que passamos, quer seja a estudar, ou a divertir-nos. Foram pessoas que nunca irei esquecer e que levarei para a vida toda.

À minha namorada, Mariana Lourenço, pelo incentivo que precisava nesta fase final em que, tendo em conta o contexto pandémico que passamos, sem ela poderia não ter a força mental necessária para o superar e concluir a minha dissertação.

Queria também agradecer aos amigos de infância, Abigail Baptista, Inês Tavares e Daniel Pinto da Costa pelo apoio e por estarem sempre disponíveis para tudo.

Ao Engenheiro Mário Silva e Guillaume Barros por todo o apoio e ajuda em termos de dificuldades encontradas ao longo da dissertação.

Gostaria finalmente de agradecer:

Ao Professor Doutor João Pedro Nunes, orientador da dissertação, pelo acompanhamento e ajuda dada na resolução de problemas ao longo do trabalho.

Ao engenheiro Miguel Vasconcelos, coorientador desta dissertação, pela disponibilidade sempre apresentada e pelo apoio em dúvidas e noutros obstáculos no decorrer do trabalho.

A todo o departamento de compósitos, em especial à Helena Rocha e ao Rafael Alves pela ajuda essencial durante o trabalho experimental e pelo bom ambiente que sempre causaram, mas acima de tudo pelo conhecimento que me passaram ao longo deste tempo.

Ao PIEP pela possibilidade de realização da dissertação.

À diretora de curso, Carla Martins por estar sempre presente para qualquer problema e por ter sempre uma palavra amiga nos momentos mais difíceis.

Por último, agradecer à Universidade do Minho e à cidade de Guimarães por me acolherem nos últimos 6 anos.

Muito obrigado a todos!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Neste projeto, realizado no PIEP- Polo de Inovação em Engenharia de Polímeros, no âmbito de um projeto de parceria com a indústria, desenvolveu-se um depósito em material compósito para armazenamento de hidrogénio. No projeto, para além de se ter tido em consideração as dificuldades levantadas pelo acondicionamento do Hidrogénio, estudaram-se o método de produção do reservatório, as suas dimensões e os materiais a serem utilizados na sua construção.

A produção do reservatório será efetuada por enrolamento filamentar sobre um *liner* em alumínio adquirido externamente. O alumínio foi escolhido como *liner* para evitar a permeabilidade do reservatório hidrogénio. No enrolamento filamentar, que é um processo usado no fabrico de peças de revolução em compósito, enrolam-se mechas de fibras contínuas impregnadas com resina em torno de um mandril rotativo. Neste trabalho optou-se por fabricar reservatórios em compósito para hidrogénio com dois tipos de parede resistente: uma em termoendurecível (epóxido) reforçado com fibras de carbono e, alternativamente, outra em termoplástico (Poliamida 12) reforçado com o mesmo tipo de fibras.

No presente caso, o próprio *liner* em alumínio é que foi colocado entre o cabeçote fixo e o móvel da máquina de enrolamento para que pudesse ser simultaneamente usado como mandril. Durante o enrolamento, fizeram-se passar mechas contínuas de fibra de carbono sendo depositadas com as orientações desejadas sobre o mandril (*liner*) através do olhal para posteriormente ser feita a infusão de resina no mesmo. Alternativamente, também foi utilizada como matéria-prima uma fita termoplástica de resina de poliamida 12 (PA 12) reforçada com fibras contínuas de carbono. A utilização de um termoplástico como matriz permitirá que os reservatórios fabricados se tornem bastante mais sustentáveis por, contrariamente do que acontece com os termoendurecíveis, os termoplásticos poderão ser reprocessados e mais facilmente reciclados.

Para concluir foi desenvolvido um reservatório de aproximadamente 1L de volume para armazenar Hidrogénio a 300bar de pressão. Após conclusão dos ensaios é possível observar que o material termoendurecível é o mais resistente em termos de Tração e Compressão sendo o material escolhido para o reservatório final.

PALAVRAS-CHAVE

Hidrogénio; Pressão; Reservatório; Termoendurecível; Volume.

ABSTRACT

In this project, carried out at the PIEP - Polymer Engineering Innovation Pole, as part of a partnership project with the industry, a pressure vessel in composite material for hydrogen storage was developed. In the project, in addition to considering the difficulties raised by the conditioning of hydrogen, the method of production of the pressure vessel, its dimensions and the materials to be used in its construction were studied.

The production of the pressurized vessel will be made by filament winding on an aluminium liner acquired externally. Aluminium was chosen as the liner to avoid permeability of the hydrogen through the aluminium walls. In filament winding, which is a process used in the manufacture of composite revolved parts, slivers of continuous fibres impregnated with resin are wound around a rotating mandrel. In this case, it was decided to manufacture hydrogen composite tanks with two types of resistant wall: one in thermosetting (epoxide) reinforced with carbon fibres and, alternatively, another in thermoplastic (Polyamide 12) reinforced with the same type of fibres.

In the present case, the aluminium liner itself was placed between the fixed and mobile head of the winding machine so that it could be used simultaneously as a mandrel. During winding, continuous strands of carbon fibre were deposited in the desired orientations on the mandrel (liner) through the eyelet and after that an infusion of resin was made. Alternatively, a thermoplastic tape made of polyamide 12 (PA 12) resin reinforced with continuous carbon fibres was also used as raw material. The use of a thermoplastic as a matrix will allow the manufactured reservoirs to become much more sustainable because, contrary to what happens with thermosets, thermoplastics can be reprocessed and more easily recycled.

To conclude, a pressure vessel of approximately 1L volume was developed to store hydrogen at 300bar pressure. After completion of the tests, it is possible to observe that the thermosetting material is the most resistant in terms of traction and compression, being the material chosen for the final pressure vessel.

KEYWORDS

Hydrogen; Pressure; Pressure Vessel; Thermosetting; Volume;

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabela.....	xv
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. PIEP	3
1.3. Estrutura da Dissertação	4
2. Estado de Arte	5
2.1. Reservatórios Pressurizados	5
2.2. Materiais Compósitos.....	7
2.3. Matriz	8
2.3.1. Termoendurecíveis	9
2.3.2. Termoplásticos	9
2.4. Reforço	9
2.4.1. Fibras de Vidro	11
2.4.2. Fibras Aramida	11
2.4.3. Fibras de Carbono	12
2.5. Enrolamento Filamentar	12
2.6. Sistemas de Impregnação	13
2.7. Ângulos de Enrolamento.....	16
2.8. Tipos de Mandril	17
2.9. Tipos de Máquinas de Enrolamento Filamentar.....	18
2.9.1. Eixo Horizontal	18
2.9.2. Eixo Vertical.....	18
2.10. Infusão de Resina por Vácuo.....	19

3.	Procedimento Experimental.....	20
3.1.	Matérias Primas	20
3.1.1.	Liner em Alumínio	20
3.2.	Prepregs de Matriz Termoplástica.....	20
3.3.	Material com Matriz Termoendurecível	21
3.4.	Dimensionamento do laminado	21
3.5.	Simulação de Enrolamento Filamentar Cadwind	22
3.6.	Enrolamento Filamentar	23
3.6.1.	Descrição do equipamento	23
3.6.2.	Preparação de Provetes.....	24
3.7.	Caracterização Física e Mecânica	28
	Ensaio de Tração	28
	Ensaio de Compressão.....	28
4.	Apresentação De Resultados	30
4.1.	Conceção do Reservatório	30
4.2.	Enrolamento Filamentar de Placas	32
4.3.	Ensaio Mecânico.....	33
4.3.1.	Ensaio de Tração	33
4.3.2.	Ensaio de Compressão	39
4.4.	Enrolamento Filamentar dos Reservatórios	45
4.5.	Validação do Dimensionamento do Estratificado	50
5.	Conclusões.....	53
6.	Recomendações para Trabalhos Futuros	55
	Bibliografia	56
	ANEXOS.....	58
	Anexo I- Ficha Técnica da Fibra T 62% C10051 / PA10033 0.14 x 5 da Suprem™	59
	Anexo II- Ficha Técnica da Fibra T700S da Torayca.....	61
	62
	Anexo III- Ficha Técnica da Resina Biresin Cr83 da Sika	63
	Anexo IV- Ficha Técnica do Desmoldante Mikon W-64+ da Munch Chemie International.....	65

.....	66
Anexo V- Norma EN13923:2005 “Filament Wound FRP Pressure Vessels”	67
.....	68
Anexo VI- Norma ASTM D3039 D3039M “Test Method For Tensile Properties”	69
Anexo VII- Norma ASTM D695-02A “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics”	71
Anexo VIII- Norma ISO 14126:1996 “Fibre-Reinforced Plastic Composites- Determination of Compressive Properties in the In-Plane Direction”	73
Anexo IX- Folha de Cálculo para Cálculo de Estratificado	75
Anexo X- Folha de Cálculo para Cálculo de Estratificado	77
Anexo XI- Provetes de Tração Após Ensaios.....	79
Anexo XII- Máquina Universal de Ensaios Mecânicos <i>SHIMADZU AGX-50KN</i>	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Diferentes tipos de calotes usadas em reservatórios para armazenamento de líquidos e/ou gases [9]	7
Figura 2- Sistema de Impregnação Fechado.....	14
Figura 3- Dois tipos de sistemas abertos; à esquerda Drum-type, à direita Dip-type.....	15
Figura 4- Tipos de Enrolamento Filamentar[18]	16
Figura 5- Fita Termoplástica utilizada para enrolamento de reservatórios e provetes	21
Figura 6- Simulação de CADWIND para Enrolamento de Placa Plana	22
Figura 7- Máquina Utilizada na realização do Enrolamento de Liners e de Placas.....	24
Figura 8- Estrutura de Madeira utilizada para calibração da máquina.....	24
Figura 9- Placa de aço desenhada para enrolamento filamental e produção de provetes.....	25
Figura 10- (a) Placa inserida na máquina para começar enrolamento; (b) Começo do enrolamento ...	25
Figura 11-Enrolamento Completo da Placa.....	26
Figura 12-Placa desenhada após otimização de processo.....	26
Figura 13- Construção de placas com fitas pré-impregnadas	27
Figura 14- Enrolamento "Dry-Winding"	27
Figura 15- Dimensões do Proвете para Materiais de Espessura abaixo de 3.2mm.....	29
Figura 16- Tipos de falha aceitáveis apresentadas na norma ISO14126:1999	29
Figura 17-Reservatório Desenhado Inicial (esquerda) e Reservatório Final (direita)	30
Figura 18- Reservatório Final em Alumínio para Enrolamento Filamentar	31
Figura 19- Ficha técnica do reservatório comprado par utilização ao longo do projeto	31
Figura 20- Placa Enrolada para Corte de Provetes de PA 12 reforçada com fibras de carbono.....	32
Figura 21- (a) Placa com fibras de carbono enroladas a seco (b) Placa preparada para a Infusão de resina a vácuo	33
Figura 22-Curvas Tensão-Deformação do liner em Alumínio	33
Figura 23- Curvas tensão-deformação dos provetes de PA12 reforçada com fibras de carbono a 0° ...	35
Figura 24- Curvas tensão-deformação nos provetes de PA12 reforçada com fibras de carbono a 90° .	36
Figura 25-Curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios dos provetes em epóxido reforçado com fibras de carbono a 0°	37
Figura 26-Curvas tensão-deformação nos provetes em resina epóxida reforçada com fibras de carbono orientadas a 90°	38

Figura 27-Curvas força/deslocamento obtidas em compressão nos compósitos de resina epóxida reforçada com fibras de carbono orientadas a 0°	40
Figura 28- Curvas força/deslocamento obtidas em compressão nos compósitos de Poliamida 12 (PA) reforçada com fibras de carbono orientadas a 0°	40
Figura 29- Curvas força/deslocamento obtidas nos ensaios compressão realizados transversalmente à direção das fibras (90°) nos compósitos de matriz epóxida.....	42
Figura 30-Curvas força/deslocamento obtidas nos ensaios compressão realizados transversalmente à direção das fibras (90°) nos compósitos de matriz termoplástica (PA 12).	42
Figura 31- Exemplo de Falha "Through Thickness Shear"	45
Figura 32-Cabeça de deposição usada com o prepregs de matriz termoplástica	46
Figura 33- Primeira cabeça de deposição usada Figura 34- Segunda cabeça de deposição usada ...	47
Figura 35-Cabeça de deposição final.....	47
Figura 36- Reservatório Completo com Material de Matriz Termoplástica	48
Figura 37- Reservatório Completo com Material de Matriz Termoendurecível	49
Figura 38- Corte Feito no Reservatório para Verificar Preenchimento da Resina	49
Figura 39- Ficha Técnica da Fibra Suprem™ T 62% C10051 / PA10033 0.14 x 5	60
Figura 40- Ficha Técnica Fibra T700S da Torayca	62
Figura 41- Ficha Técnica da Resina Biresin CR83 da Sika	64
Figura 42- Ficha Técnica do Desmoldante Mikon W-64+ da Munch Chemie International	66
Figura 43- Norma para Dimensionamento de Estratificado	68
Figura 44- Norma para Realização de Ensaio de Tração.....	70
Figura 45- Norma para Realização de Ensaio de Compressão	72
Figura 46- Norma para Análise das Falhas nos Ensaio de Compressão	74
Figura 47- Cálculo do Estratificado segundo Norma EN13923:2005.....	76
Figura 48- Cálculo do Estratificado utilizando valores obtidos em ensaios mecânicos segundo Norma EN13923:2005.....	78
Figura 49- Provetes TP90 com Quebras após Ensaio Figura 50-Provetes TE90 com Quebras após Ensaio	80
Figura 51- Provetes TEO após ensaio Figura 52- Provetes TPO após Ensaio	80
Figura 53- Máquina de Testes Universal Presente nas Instalações do PIEP	82

ÍNDICE DE TABELA

Tabela 1- Propriedades Típicas das Fibras.....	10
Tabela 2- Geometria dos Provetes para Ensaios de Tração	28
Tabela 3- Dados Recolhidos da Análise das Curvas Tensão-Deformação	34
Tabela 4- Dados obtidos dos ensaios de tração nos provetes de PA 12 reforçada com fibras de carbono a 0°.....	35
Tabela 5- Dados obtidos dos ensaios de tração nos provetes de PA 12 reforçada com fibras de carbono orientadas a 90°	36
Tabela 6- Características mecânicas em tração obtidas nos provetes epóxido reforçado com fibras de carbono a 0°	37
Tabela 7- Características mecânicas em tração dos provetes em epóxido reforçado com fibras de carbono orientadas a 90°	38
Tabela 8- Características mecânicas em compressão para os compósitos de matriz termoendurecível e termoplástico na direção das fibras de reforço, determinadas a partir das curvas força-deslocamento registadas nos ensaios	41
Tabela 9- Dados Recolhidos da Análise das Curvas Força Deslocamento de Material com Matriz Termoendurecível e Termoplástico Enrolado a 90°	43
Tabela 10- Tipos de falha verificados nos provetes ensaiados e respetiva validação	44
Tabela 11- Dados de Tensões para Validação de Dimensionamento	50
Tabela 12- Dados de Deformação para Validação de Dimensionamento	50
Tabela 13- Dados de Deformação para Validação de Materiais	51

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

- B_S - Área de secção da fibra
- ε_c - Deformação no enrolamento circunferencial
- ε_h - Deformação no enrolamento helicoidal
- $\varepsilon_{máx}$ - Deformação máxima admissível
- ε_{lim} - Deformação máxima do *liner*
- ρ_f - Densidade da fibra
- ρ - Densidade do laminado
- ρ_r - Densidade da resina
- D_i - Diâmetro interno
- t_c - Espessura de enrolamento circunferencial
- t_h - Espessura de enrolamento helicoidal
- W- Espessura do *roving*
- K- Fator de design
- [A1, A5] - Fatores parciais de design
- S- Fator de Segurança
- m_f - Fração mássica de fibra
- m_m - Fração mássica de resina
- v_f - Fração volúmica de fibra
- v_m - Fração volúmica de resina
- HDT-*Heat deflection temperature (resin)*
- b- Largura da camada
- E_l- Módulo de Elasticidade no sentido longitudinal
- E_t- Módulo de Elasticidade no sentido transversal
- n_c - Número de enrolamentos circunferenciais
- n_w - Número de enrolamentos longitudinais
- N_r - Número de *rovings*
- PS- Pressão de serviço
- X_t - Resistência máxima à tração longitudinal
- Y_t - Resistência máxima à tração transversal
- TS- Temperatura de Serviço

σ_c - Tensão no enrolamento circunferencial

σ_h - Tensão no enrolamento helicoidal

$\sigma_{UTS} = \frac{X_t}{K}$ - Tensão máxima admissível

N_\emptyset - Tensão nominal longitudinal

N_θ - Tensão nominal transversal

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do mestrado em Engenharia de Polímeros, orientado pelo Professor João Pedro Lourenço Gil Nunes, do plano de estudos do último ano do Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros e foi realizado no PIEP- Polo de Inovação em Engenharia de Polímeros, com orientação do Engenheiro Miguel Vasconcelos.

A motivação que me levou a selecionar este projeto foi poder trabalhar na área dos compósitos e, simultaneamente, também contatar com a indústria de modo a conseguir ter uma visão mais exata destes ambientes e das problemáticas que diariamente é necessário resolver.

O enrolamento filamentar é um método contínuo e de baixo custo usado no fabrico de peças em compósito com geometria cilíndrica e/ou de revolução. Embora inicialmente as máquinas de enrolamento fossem comandadas mecanicamente e apenas conseguissem produzir formas simples, elas sofreram uma forte evolução nos últimos anos, tornando-se cada vez mais versáteis com a introdução de tecnologias de comando numérico (CNC), permitindo o fabrico em termos económicos de peças com geometrias mais complexas e assimétricas. A tecnologia é usada para a produção de componentes para uma ampla área de mercados, tais como: as indústrias automóvel, aeronáutica, desportiva e militar. Reservatórios pressurizados, tanques, eixos, mancais, secções de fuselagem, raquetes de ténis, mastros, entre outros, são hoje exemplos de peças produzidas através da tecnologia de enrolamento filamentar [1].

O comportamento mecânico das estruturas produzidas por enrolamento filamentar é sobretudo influenciado pela orientação da deposição das fibras. Essa orientação (ângulo de enrolamento) é determinada pela combinação entre a velocidade de rotação do mandril e a velocidade de deslocamento transversal do carrinho de deposição da fita ou das mechas de fibra (rovings). Uma determinada estrutura pode ter as suas diversas camadas depositadas com diferentes ângulos de enrolamento, obtendo-se assim laminados com comportamentos mecanicamente distintos. O ângulo ideal de enrolamento depende da grandeza e da natureza da(s) carga(s) aplicada(s) [2].

Nesta dissertação efetuar-se-á uma seleção de materiais, tais como, material a usar como *liner*, tipos de fibras de reforço e matriz polímera a utilizar. Irá ser efetuada uma simulação de enrolamento filamentar no programa CADWIND, de maneira a gerar um código de comando para o equipamento de enrolamento presente nas instalações do PIEP e proceder-se-á à deposição das fibras no reservatório.

Efetuar-se-á também um levantamento de normas para o cálculo do estratificado e para a realização de ensaios mecânicos necessários para a solução encontrada. Após enrolamento do reservatório, será efetuado um estudo para as possibilidades em que o reservatório possa vir a ser utilizado.

1.1. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo o estudo e desenvolvimento de um reservatório capaz de armazenar hidrogénio a elevadas pressões ($\pm 30\text{MPa}$) produzido em material compósito fabricado por enrolamento filamentar na máquina instalada no PIEP. Este método de fabrico é um método que permite deposição com elevada precisão e com a orientação desejada.

Esta ideia de produção tem em vista dar continuidade ao projeto já realizado na UC “Projeto Individual” e visa passar da teoria à prática no que toca ao desenvolvimento do reservatório e para isso é necessário fazer algumas alterações quanto a certos conceitos estudados anteriormente, tais como, alteração das calotas do reservatório, novo cálculo para estratificado mediante norma adequada ao pretendido e uma melhor compreensão do *software* CADWIND.

Posto isto, antes de se passar à prática procedeu-se a um estudo mais aprofundado de alguns pontos, tais como:

- Como evitar eventuais fugas do hidrogénio num reservatório construído em material compósito;
- Como diminuir o peso final do reservatório;
- Quais as vantagens e desvantagens em usar um *liner* em alumínio;
- Definição das dimensões finais do reservatório;
- Definição de ciclos de vida a considerar;
- Realização dum desenho CAD do reservatório para posterior fabrico de protótipos;
- Estudo do comportamento a impacto do reservatório em caso de queda;
- Fabrico de protótipos do reservatório por enrolamento filamentar.

1.2. PIEP

O PIEP- Polo de Inovação em Engenharia de Polímeros, é uma associação privada sem fins lucrativos situada em Guimarães, no Campus de Azurém da Universidade do Minho. Foi criado a 18 de abril de 2001 por iniciativa do setor de plástico e moldes e numa colaboração entre a Universidade do Minho, através do Departamento de Engenharia de Polímeros (DEP), e o IAPMEI.

O PIEP tem como missão ser uma referência na inovação na engenharia de polímeros, assegurando uma resposta em tempo oportuno às necessidades de I&DT dos seus associados e clientes, com base num conhecimento diferenciado nos diversos domínios tecnológicos estratégicos, e com vocação para converter ideias em produtos.

Sendo uma instituição vocacionada para “Converter Ideias em Produtos”, fazem parte do portfólio de I&DT do PIEP inúmeras soluções por ele desenvolvidas em colaboração com o setor industrial.

São ainda principais objetivos da atividade do PIEP:

- Contribuir para o reforço da competitividade da indústria de plásticos e moldes, através do desenvolvimento de tecnologias próprias e conceção das mesmas;
- Potenciar uma cultura e uma prática efetiva de I&DT no setor através da disponibilização dos seus recursos humanos, infraestrutura física e informação técnica necessárias;
- Responder, em tempo oportuno às necessidades I&DT das empresas;
- Formalizar a ligação entre a indústria do setor, a Universidade do Minho e a sua rede de contactos internacionais;
- Promover a participação das empresas nacionais em projetos de I&DT europeus;
- Evidenciar a capacidade endógena nacional de responder, em tempo útil, a desafios específicos de inovação;
- Fomentar o desenvolvimento de produtos próprios ou participar em consórcios de empresas nacionais com esse produto;
- Melhorar a qualidade dos recursos humanos em engenharia de polímeros, sobretudo na atividade I&DT aplicada.

Por fim, o PIEP constitui-se como um parceiro de referência para a inovação no seio do tecido produtivo nacional e internacional do setor de plástico e afins, permitindo-lhe materializar novas ideias, base do desenvolvimento económico e sustentável e da competitividade industrial [3], [4].

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos.

O presente capítulo é constituído por uma introdução, objetivos do trabalho a executar, apresentação da entidade onde o mesmo será efetuado e, por fim, este pequeno resumo da estrutura da dissertação.

No capítulo 2 descreve-se o estado de arte relativamente a materiais, produtos e tecnologias existentes e que podem ser aplicadas no trabalho a desenvolver.

O capítulo 3 inclui o procedimento experimental usado durante os trabalhos realizados, nomeadamente, no que se refere à seleção de matérias primas aplicadas e metodologia, normas, e equipamentos empregues nos ensaios experimentais.

No capítulo 4 descrevem-se mais aprofundadamente o equipamento de enrolamento filamentar, o *software* e o procedimento de geração de trajetórias de enrolamento das camadas do estratificado utilizados neste trabalho, bem como, as técnicas de preparação de matérias-primas empregues na construção de protótipos.

No capítulo 5 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios a que foram submetidos os reservatórios, nomeadamente, inflamabilidade, calcinação, permeabilidade e resistência ao impacto.

As conclusões deste trabalho são apresentas no capítulo 6 e por último no capítulo 7 estão apresentadas recomendações para trabalhos futuros.

2. ESTADO DE ARTE

Materiais compósitos são todos os formados por dois ou mais materiais distintos a nível macroscópico. Embora uma grande variedade de materiais correspondam a esta definição, este trabalho restringe-se apenas e só aos materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras longas que pudessem ser usados a construção de reservatórios para armazenamento de gases sob pressão [5].

Normalmente são constituídos por duas fases, a matriz, que tem como função a manutenção das fibras nas orientações desejadas e garantir a sua proteção contra abrasão e efeitos ambientais, bem como a transferência e distribuição das tensões entre elas. As fibras constituem, por sua vez, o chamado reforço, que como o próprio nome indica suporta a maioria dos esforços a que o compósito estará exposto e lhe confere maior dureza, resistência mecânica, tenacidade e rigidez.

Os compósitos, têm vindo a ser cada vez mais utilizados na engenharia como consequência das suas excelentes propriedades mecânicas, reduzido peso, isolamento térmico, etc.

Tendo em conta os processos de fabrico a utilizar na construção dos reservatórios, torna-se necessário fazer uma seleção rigorosa e criteriosa de materiais e de todas as outras variáveis de processamento, tais como, conteúdo relativo dos constituintes, direções de orientação das fibras que se deverão vir a usar. Nas seções seguintes abordam as matérias primas e tecnologias disponíveis e mais adequadas a poderem vir a ser utilizadas no fabrico dos reservatórios que se pretendem desenvolver neste trabalho [6].

2.1. Reservatórios Pressurizados

Um reservatório pressurizado é uma casca fechada, que contém um material líquido ou gasoso no seu interior sujeito a pressão interna/externa. Tradicionalmente usam-se mais no seu fabrico materiais metálicos, tais como, o aço, ligas de alumínio, ligas de titânio ou, em casos mais específicos, o vidro ou o plástico. O seu projeto envolve normalmente o estudo dos requisitos que terão de suportar ao longo do tempo, a escolha dos materiais que apresentem as características mais adequadas a corresponder a essas exigências e a validação ou comprovação do seu comportamento por meio de ensaios [7]. Os testes efetuados seguem normalmente um conjunto de normas internacionais estabelecidas para o propósito do reservatório. O reservatório final, sobretudo se sujeito a pressão, deve ser uma estrutura extremamente fiável e capaz de garantir a maior segurança possível. Estas exigências e a forte concorrência que atualmente caracteriza o mercado exigem que o projetista tenha, para além de uma

importante experiência das tecnologias e regras básicas a utilizar no fabrico, um rigoroso conhecimento dos esforços instalados na parede dos reservatórios e do comportamento dos materiais utilizados. Só assim será efetivamente possível garantir o cumprimento de todos requisitos exigidos e, simultaneamente, minimizar riscos e os custos em matéria-prima e de fabrico.

A geometria a utilizar é um dos fatores mais importantes a ter em consideração no projeto de um reservatório. Habitualmente opta-se por usar formas de revolução e raios de concordância generosos, o que contribui para uma redução bastante significativa das tensões e da concentração das mesmas em zonas indesejáveis das paredes dos reservatórios e, conseqüentemente, para a minimização da espessura e do peso do reservatório. Durante a segunda metade do séc. XX, abriram-se novas possibilidades de melhoramento do desempenho dos reservatórios com o advento da aplicação de materiais compósitos na sua construção e aparecimento do enrolamento filamentar como tecnologia de transformação. A aplicação destes novos materiais compósitos e métodos de fabrico permitiram reduzir acentuadamente o peso e custo de fabrico dos reservatórios sob pressão, ao mesmo se aumentava significativamente as suas propriedades mecânicas.

A imaginação e experiência dos projetistas aliada à utilização das novas técnicas avançadas de cálculo por computador, como sejam, a análise por diferenças finitas e/ou por elementos finitas, permitiram também encontrar rapidamente soluções cada vez mais económicas e apropriadas para reservatórios mais adequados a diferentes aplicações [8].

Finalmente, importa ainda referir, que o projeto dum reservatório implica uma análise muito cuidada dum conjunto amplo e complexo de fatores, muitos dos quais estabelecidos por normas existentes, onde se destacam, pelo menos, os seguintes:

- i. Tempo de vida do reservatório;
- ii. Tecnologia de fabrico a usar;
- iii. Materiais a aplicar;
- iv. Pressão interior/exterior de armazenamento
- v. Ciclos de pressão durante a vida
- vi. Temperatura de armazenamento
- vii. Dimensionamento;
- viii. Condições de utilização;
- ix. Acessórios a utilizar;
- x. Manutenção;
- xi. Normas a cumprir.

Na figura 1 estão ilustrados os diferentes tipos de calotes tipicamente usadas em reservatórios para armazenamento de produtos líquidos e ou gasosos.

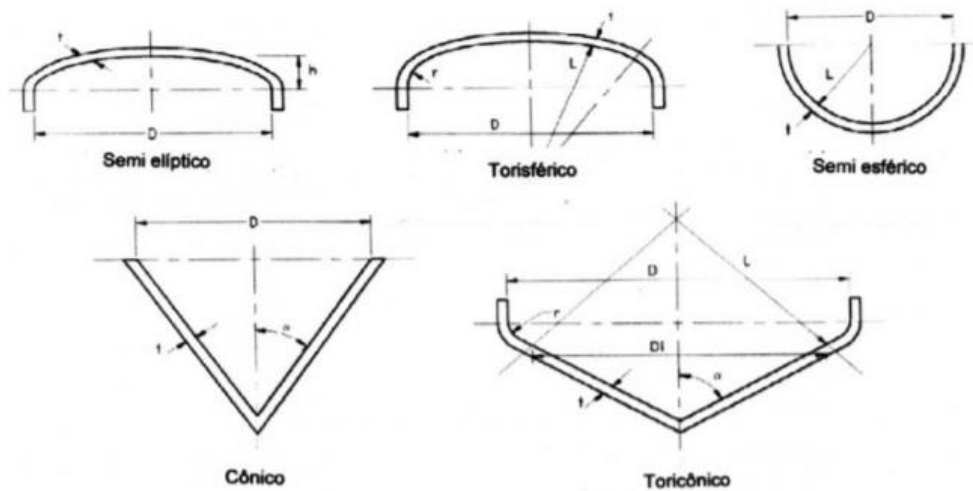


Figura 1- Diferentes tipos de calotes usadas em reservatórios para armazenamento de líquidos e/ou gases [9]

2.2. Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são formados por dois ou mais materiais distinguíveis a nível macroscópico. De entre a diversidade de materiais possíveis, este trabalho apenas abordará os materiais poliméricos reforçados com fibras. Trata-se de materiais que apresentam normalmente excelentes valores de resistência, rigidez mecânica e de resistência à corrosão e densidade inferior à maioria dos materiais tradicionais. Por apresentarem excelentes propriedades mecânicas e menor peso, os materiais compósitos têm vindo a demonstrar serem mais capazes de satisfazer os requisitos mais exigentes das aplicações avançadas nos mercados aeronáutico, aeroespacial e militar [10].

Embora reforço e matriz determinem diferentes propriedades ao compósito final, as características deste último resultam da combinação dos seus constituintes desde que haja uma boa interação entre a matriz e as fibras. A transferência de cargas da matriz para as fibras faz com que o compósito final se comporte mecanicamente muito melhor do que a matriz individualmente.

Nesta dissertação far-se-á uma ligeira abordagem às matérias primas e às tecnologias mais utilizadas na produção de reservatórios em materiais compósitos, tais como o enrolamento filamentar.

2.3. Matriz

O tipo de matriz a usar num material compósito é normalmente selecionado tendo em conta alguns dos seus requisitos de serviço, tais como, a sua aplicação, temperatura de serviço, resistência à corrosão e desgaste, tempo de vida útil, etc.

As matrizes poliméricas usadas podem ser dos seguintes dois tipos:

- Termoendurecíveis;
- Termoplásticos.

Os termoplásticos sofrem sempre passagem do estado sólido ao líquido (fundem) com o aumento de temperatura, tornando-se num líquido viscoso que pode ser escoado através da ação de pressão. Por outro lado, os termoendurecíveis tornam-se sólidos infusíveis (nunca mais sofrem fusão) após passarem por uma reação de polimerização e reticulação durante a sua transformação, que normalmente se designa por cura ou endurecimento.

As matrizes termoendurecíveis são resinas que se encontram habitualmente no estado líquido à temperatura ambiente e antes da sua transformação. Algumas das suas principais propriedades são as seguintes:

- Excelente resistência a solventes e outros químicos corrosivos;
- Resistência ao calor e temperaturas elevadas;
- Resistência à fadiga;
- Possibilidade de adequar a sua flexibilidade à aplicação pretendida;
- Excelente adesão às fibras;
- Excelentes características de acabamento.

Nos compósitos, as resinas termoendurecíveis são bastante mais utilizadas do que as termoplásticas por a sua menor viscosidade antes da cura facilitar muito a impregnação das fibras de reforço, o que permite reduzir significativamente os custos de produção. Estes custos também beneficiam do facto de elas poderem ser processadas a menores pressões e a temperaturas muito mais reduzidas que os termoplásticos.

No que toca a matrizes termoplásticas, elas encontram-se normalmente no estado sólido à temperatura ambiente e podem ser sempre transformadas num líquido viscoso após aquecimento acima da temperatura de fusão, voltando novamente ao estado sólido após arrefecimento [11] e as suas vantagens mais relevantes são:

- Maior resistência ao impacto;
- Podem ser reprocessadas;
- Criam ambientes de transformação muito mais limpos
- Originam menor libertação de solventes.

2.3.1. Termoendurecíveis

Os termoendurecíveis atualmente mais utilizados na produção de material compósito são as resinas de poliéster insaturado (UP), viniléster (VE), époixidas (EP) e fenólicas (PF). As resinas de poliéster insaturado utilizam-se na grande maioria dos produtos mais comuns devido ao menor custo, maior facilidade de processamento e boa resistência mecânica e à corrosão destas resinas.

As resinas époixidas são normalmente consideradas como as resinas mais “requintadas” utilizadas nos materiais compósitos. Embora o seu preço seja 2 a 3 vezes mais elevado que todas as outras resinas termoendurecíveis, são utilizadas no fabrico de produtos com melhor desempenho muitas vezes usados em indústrias de ponta, como a aeronáutica, aeroespacial e militar, entre outras, dado apresentarem características mecânicas e de adesão às fibras superiores.

2.3.2. Termoplásticos

Os termoplásticos são utilizados desde há muito tempo como matrizes de compósitos de fibras curtas, face à inexistência de tecnologias que permitissem que elas pudessem impregnar fibras longas de maneira eficiente. A inadequada impregnação das fibras pelos termoplásticos e a fraca adesão fibra/matriz consequentemente obtida resultavam na produção de compósitos com propriedades mecânicas relativamente baixas. No entanto, existem para os compósitos algumas vantagens que resultam da substituição das matrizes termoendurecíveis por termoplásticas, como sejam: maior tenacidade e, portanto, tolerância ao dano, ao impacto e às vibrações superior, maiores deformações na rotura e ductilidade, ciclos de fabrico mais curtos e maior facilidade de reciclagem, reparação e reprocessamento.

2.4. Reforço

As fibras de reforço são uma “peça-chave” dos compósitos por suportarem praticamente todos os esforços a que o material fica sujeito, lhe conferirem elevada resistência e outras importantes propriedades, tais como, dureza e resistência à temperatura e fluência. Dependendo dos requisitos de

projeto, é quase sempre possível selecionar uma fibra de reforço apropriada para que a peça fabricada garanta as exigências pretendidas.

Os principais fatores que determinam a eficiência das fibras de reforço selecionadas são:

- As orientações com que as fibras são colocadas;
- O comprimento e quantidade das fibras;
- A interação entre a fibra e a resina (interface);
- As propriedades mecânicas das fibras.

Uma boa interface entre a fibra e a resina é essencial para assegurar um bom funcionamento do compósito, tornando-se necessário garantir uma boa adesão entre ambos, sendo esta determinada pelas matérias-primas usadas e pelo tratamento superficial das fibras.

O facto de as fibras terem elevada resistência e módulo na sua direção longitudinal confere "anisotropia" aos compósitos, característica que pode ser uma mais-valia em projetos onde a maioria das fibras foram orientadas na direção de carregamento. Isso minimiza a quantidade de material a utilizar, nomeadamente, nas zonas da peça onde haja menor ou nenhuma carga [12].

A Tabela 1 apresenta algumas das propriedades principais de diferentes tipos de fibra.

Tabela 1- Propriedades Típicas das Fibras

Propriedade	Unidade	Fibras de Reforço					
		Vidro			Carbono		Aramida
		E	S	R	Pitch	PAN	Kevlar 29
Densidade	-	2.56	2.49	2.58	2.0	1.8	1.44
Calor Específico	kJ/kg·K	0.9	0.73	-	-	-	1.1
Tensão de Rotura	GPa	3.6	4.5	4.4	1.5	2.8	2.8
Módulo	GPa	76	86	85	380	270	62
Coefficiente de expansão térmica	10 ⁻⁶ /°C	4.9			-1.3	-0.6	-2.0
Tensão de rotura específica	kN·m/kg	1400	1800	1700	750	1555	1944
Módulo específico	MN·m/kg	29.6	34.5	32.9	190	150	43.0
Diâmetro das fibras	µm	3-20	8-13	5-24	10-11	7.5	12

2.4.1. Fibras de Vidro

As fibras de vidro são os reforços mais utilizados na indústria dos compósitos, uma vez que apresentam boas propriedades mecânicas, elétricas, químicas, térmicas e não têm um custo muito elevado. Apresentam como principais desvantagens a sensibilidade à humidade e uma menor resistência mecânica e densidade superior às outras fibras disponíveis.

As fibras de vidro classificam-se, de acordo com a sua composição química, em tipos E, C, S, R e T. As fibras de tipo E são as fibras que apresentam menor custo (1,5-3 €/kg) e também as mais utilizadas em compósitos.

As fibras tipo C são as que apresentam melhor resistência química. Utilizam-se, por isso, em mantas de superfície aplicadas na camada externa de laminados para servirem de barreira química aos produtos químicos agressivos que contactam com o compósito [13].

As fibras tipo S, R e T apresentam melhores propriedades mecânicas e foram desenvolvidas para serem aplicadas em produtos para as indústrias aeroespacial e de defesa onde, por vezes, se utilizam em armaduras à prova de bala. São produzidas em menores quantidades e têm preços bastante mais elevados (18-30 €/kg).

As Fibras tipo E estão disponíveis em três formas:

- Mantas
- Tecidos
- Mechas de fibras (rovings)

2.4.2. Fibras Aramida

As fibras aramida são fibras poliméricas orgânicas fabricadas a partir de poliamidas aromáticas para-orientadas e polímero orgânico. As primeiras fibras aramida foram colocadas no mercado pela Dupont® sob o nome comercial de Kevlar®

Estas fibras têm uma aparência brilhante de cor dourada e apresentam resistência mecânica elevada, associada a uma baixa densidade. Apresentam uma excelente resistência ao impacto e à abrasão, mas comportam-se mal em compressão, degradam-se sob ação de raios UV e são difíceis de maquinar.

As fibras de aramida estão apenas disponíveis nas formas de mechas contínuas de fibras (rovings) e de tecidos com preços que variam entre 22,5-38 €/kg.

2.4.3. Fibras de Carbono

As fibras de carbono, apesar de bastante caras, são normalmente utilizadas em estruturas de engenharia avançadas, que exigem componentes com rigidez muito elevada e peso reduzido. Podem derivar do Poliacrilonitrilino (PAN), do Petróleo (*Pitch*) ou da Celulose (*Rayon*). Normalmente, as fibras do tipo PAN são as mais utilizadas por apresentarem propriedades mais uniformes.

Após fabrico, as fibras de carbono sofrem normalmente um tratamento superficial que permite melhorar a sua interação com matriz e as protegem durante o manuseamento e processamento.

As fibras de carbono apresentam maior rigidez específica do que qualquer outra fibra disponível, excelente resistência à tração e compressão e elevada resistência à corrosão, fluência e fadiga. As suas principais desvantagens são uma resistência ao impacto inferior às fibras de vidro e aramida.

Encontram-se geralmente disponíveis no mercado 4 tipos de fibra de carbono:

- Fibras de Ultra Alto Módulo (UHM);
- Fibras de Alto Módulo (HM);
- Fibras de Módulo Intermédio (IM);
- Fibras de Alta Resistência (HS).

As fibras HM e UHM apresentam características particularmente frágeis, por serem mais rígidas, e têm um custo mais elevado.

2.5. Enrolamento Filamentar

No enrolamento filamentar, filamentos contínuos são depositados sobre um mandril após passarem por um banho de resina. Podem também ser usados filamentos pré-impregnados, o que dispensa o uso do banho de resina. O mandril é normalmente um corpo de revolução que tem a forma pretendida para o interior da peça a produzir.

A orientação das fibras depositadas durante o enrolamento depende das velocidades relativas de rotação do mandril e do deslocamento do carrinho que deposita as fibras.

Os três tipos mais comuns são o enrolamento helicoidal, na qual os filamentos são depositados com ângulo relativamente o eixo do mandril; enrolamento circunferencial no qual os filamentos são aproximadamente depositados perpendicularmente relativamente ao eixo do mandril; e, por último, o

enrolamento polar que permite deposições dos filamentos em quase todas as direções de modo a que se possam produzir, em simultâneo, a parte cilíndrica e as calotes de reservatórios.[14]

Diferentes tipos de enrolamento podem ser usados em passagens sucessivas e a orientação é feita à medida das necessidades específicas de cada peça e requisitos de projeto.

Uma das principais condições indispensáveis para fabricar reservatórios inovadores com o processo é a seleção adequada das matérias-primas a usar na produção. Uma boa combinação da matriz e das fibras de reforço permite a obtenção dum produto final com as propriedades e características únicas exigidas para a aplicação em causa.[15]

As principais vantagens habitualmente apontadas ao enrolamento filamentar são:

- Obtenção de elevados teores de fibra e a otimização da sua orientação;
- Permitir reforçar a peça com fibras contínuas orientadas em duas direções sem necessidade de utilizar tecidos;
- Ser um método de fabrico rápido e económico;
- Obtenção de excelentes propriedades estruturais dos laminados, por as fibras poderem ser colocadas com as orientações mais adequadas a resistirem aos esforços aplicados.

Também são apontadas algumas limitações ao processo, tais como:

- Fabrico de peças limitado a geometrias convexas;
- Os mandris das peças de grande dimensão poderem ter custo elevado;
- Limitações ao acabamento exterior da peça por não existir molde exterior;
- Exigir algum investimento em termos de equipamento e *software* de controlo.

2.6. Sistemas de Impregnação

O enrolamento filamentar é normalmente classificado em 2 tipos mediante o sistema de impregnação usado:

- O enrolamento por via húmida (*wet winding*);
- O enrolamento por via seca (*dry winding*).

No enrolamento por via húmida, as mechas de fibra de reforço são impregnadas pela resina antes de serem depositadas no mandril. Neste caso, geralmente a matriz consiste num termoendurecível de baixa viscosidade, que permite impregnar por completo as fibras durante a passagem por um banho de resina.

Neste tipo de enrolamento, antes da sua passagem pelo banho de resina, as mechas de fibras são alimentadas a partir de rolos pré-tensionados que asseguram a sua boa impregnação e compactação na deposição durante a deposição sobre o mandril de enrolamento.[16]

Embora este processo apresente um custo baixo e garanta uma fácil manutenção, conduz a algum desperdício de resina e a uma maior exigência no controlo da pré-tensão a aplicar. A impregnação por via húmida usa habitualmente dois sistemas principais que se encontram descritos a seguir: os sistemas fechados e abertos.

Sistemas Fechados

O funcionamento do sistema fechado (ver Fig. 2) consiste em sifão onde são inseridas na extremidade, as fibras e a resina, havendo posteriormente a sua impregnação, por pressão, na passagem pela curva inferior do sifão. Uma das vantagens deste sistema é ocorrer uma impregnação limpa, assim como um projeto mais compacto podendo o mesmo ser montado junto ao olho de deposição, impedindo assim grande perda de resina. É uma técnica em constante desenvolvimento ao longo dos anos permitindo assim aumento de pressão da resina e garantindo uma melhor impregnação. A Figura 2 apresenta um sistema de impregnação fechado.

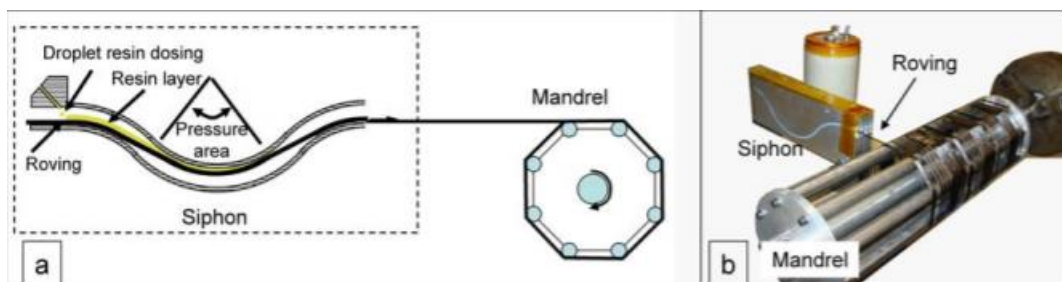


Figura 2- Sistema de Impregnação Fechado

Sistemas Abertos

Os sistemas de impregnação abertos podem ser divididos em dois tipos: *drum-type* e *dip-type* (ver Fig. 3). O sistema *drum-type* consiste na compactação do roving contra um rolo, onde é criado um filme por um sistema calibrador que remove os excessos de resina. O sistema *dip-type* consiste no mergulho do roving na resina e a passagem por uma série de alfinetes para completar a impregnação.

As principais diferenças entre os dois é a velocidade e a qualidade de impregnação sendo a impregnação mais lenta, mas com maior qualidade no sistema *drum-type*.

Os sistemas abertos são atualmente mais utilizados na indústria por serem mais facilmente e rapidamente reparáveis e permitirem uma operação mais simplificada.

Na Figura 3 apresenta os dois tipos de sistemas abertos acima referidos.

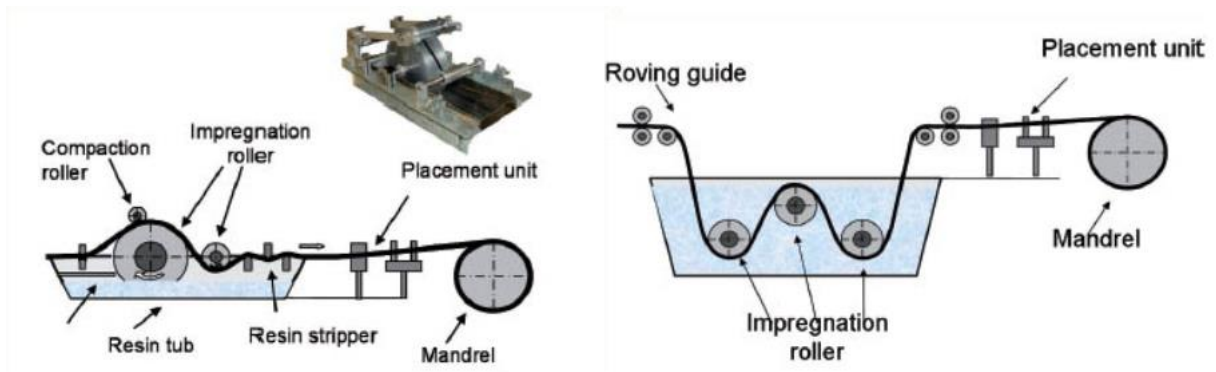


Figura 3- Dois tipos de sistemas abertos; à esquerda Drum-type, à direita Dip-type

Enrolamento por via-seca

No enrolamento por via seca, pelo contrário, deposita-se no mandril uma pré-mistura de fibras de reforço já totalmente ou parcialmente impregnadas pela matriz, que pode ser do tipo termoendurecível ou termoplástico.

Se a matriz for do tipo termoplástico, a banda passa, antes da sua deposição, por um forno (muitas vezes de UV) que permite fundir a matriz termoplástica que, depois, tem de impregnar as fibras de reforço ou de garantir a consolidação final do laminado. De facto, nalguns casos de os reforços ainda não se encontra totalmente impregnados (*towpregs* ou *commingled fibers*, por exemplo) e noutros (*tapes* e *prepregs* de matriz termoplástica, por exemplo) eles já se encontram totalmente impregnados.

A utilização de matrizes termoplásticas permite um enrolamento mais limpo do que as termoendurecíveis por não existir a fase de impregnação da resina. É também um processo mais dispendioso que o anterior pelo facto de a matéria prima ter um preço mais elevado e o material ter de ser aquecido.

No enrolamento por via seca também se poderão utilizar pré-impregnados de matriz termoendurecível, normalmente designados por *prepregs* ou *tapes* de matriz termoendurecível, nomeadamente no fabrico de peças para aplicações de elevado desempenho, onde propriedades mecânicas são um requisito essencial. Neste tipo de enrolamento, são utilizados reforços impregnados com resinas termoendurecíveis. Estes *prepregs* têm de ser armazenados a baixa temperatura para não sofrerem o processo de cura da matriz. A cura só se inicia após enrolamento através do uso de aquecimento direto no mandril, posterior num forno ou a utilização de ambos.

2.7. Ângulos de Enrolamento

Como atrás se referiu, o tipo de enrolamento filamentar é ainda, muitas vezes, classificado de acordo com ângulo de deposição nos seguintes três tipos:

- Enrolamento helicoidal;
- Enrolamento circunferencial;
- Enrolamento polar;

No enrolamento helicoidal as bandas são depositadas alternadamente com ângulos predeterminados até que a superfície do mandril seja totalmente preenchida (ver Figura 4a).

No enrolamento circunferencial as bandas são depositadas com um ângulo muito perto de 90° relativamente ao eixo do mandril (Figura 4c), sendo as bandas sucessivamente depositadas com um avanço igual à sua largura.

Estes dois tipos anteriores de enrolamento exigem normalmente a utilização das máquinas de enrolamento mais simples, habitualmente designadas por máquinas de enrolamento helicoidal, que apenas apresentam dois movimentos coordenados, a rotação do mandril e a translação do carro de deposição da fibra paralelamente ao eixo do mandril

Já no enrolamento polar, as fibras podem ser colocadas segundo uma grande variedade de ângulos e mesmo variar o ângulo de deposição ao longo do mandril por forma a produzir reservatórios completos munidos de fundos (Figura 4b). Este tipo de enrolamento exige a utilização de máquinas de enrolamento de comando numérico (CNC), muito mais complexas e com diversos eixos independentes. Algumas delas garantem mesmo o movimento rotacional do mandril em várias direções.[17][18]

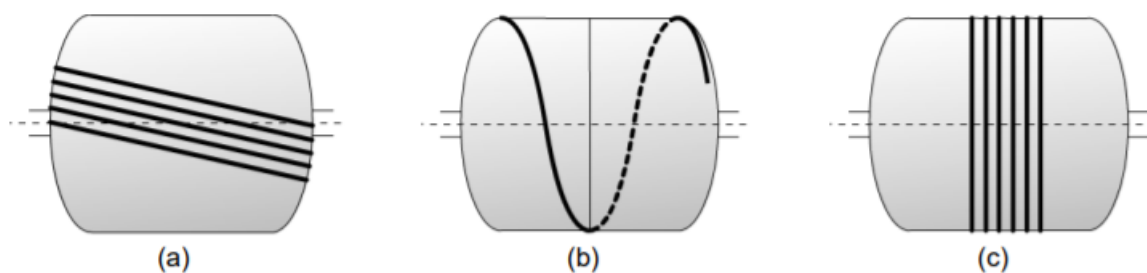


Figura 4- Tipos de Enrolamento Filamentar[18]

Neste trabalho será utilizada uma máquina de enrolamento polar com seis eixos independentes existente no PIEP, que foi projetada e construída em Portugal no âmbito de um projeto de colaborativo entre o PIEP e duas empresas industriais.

2.8. Tipos de Mandril

Os mandris usados no enrolamento filamentar podem ser bastante simples, complexos e serem construídos em diversos materiais. Referem-se a seguir alguns dos principais aspectos que devem ser tidos em conta na escolha do mandril a utilizar no enrolamento:

- Durabilidade;
- Condutividade e expansão térmica;
- Tolerâncias geométricas;
- Peso;
- Resistência ao calor;
- Deflexão;
- Preço.

Os mandris usados no enrolamento filamentar são normalmente de quatro tipos:

- Mandris perdidos;
- Mandris solúveis ou insufláveis;
- Mandris retráteis;
- Mandris com saída.

Os mandris perdidos fazem parte do produto final a fabricar, como *liner* interior. Usam-se quando as cadências de produção são elevadas e o custo de remoção do *liner* ser mais elevado do que o manter ao produto final. [19]

Os mandris solúveis, como o seu nome indica, podem ser dissolvidos após o fabrico da peça final. São normalmente fabricados em areia ou outro material semelhante que possa ser aglutinado por uma substância solúvel. Eles são removidos através de pequenos orifícios concebidos para o efeito, sendo apenas necessário água ou outro líquido adequado à dissolução do aglutinante usado. Os mandris insufláveis, com funcionamento muito semelhantes aos anteriores, são fabricados em elastómero que pode ser insuflado por ar ou outro gás sob pressão. Uma vez produzida a peça final, o ar/gás é retirado do interior do elastómero que é então removido através de um pequeno orifício concebido para esse efeito.

Por sua vez, os mandris retráteis têm uma estrutura que pode ser reduzida ou desmontada por ação mecânica após a peça final ter sido produzida por enrolamento filamentar.

Finalmente, os mandris com saída permitem a desmoldagem da peça sob aplicação de uma força de desmoldagem. São tipicamente usados para produção de tubos com pequeno a médio diâmetro interior

(tipicamente tubos de diâmetro interior inferior a 600 mm) e apresentam conicidade (diâmetro de uma das extremidades superior ao da oposta). Nestes mandris é normalmente necessário usar uma substância o material desmoldante sobre o mandril para que a remoção da peça final seja fácil.

2.9. Tipos de Máquinas de Enrolamento Filamentar

Nas máquinas de enrolamento, nomeadamente as de enrolamento polar, o mandril pode ainda estar montado sobre um eixo de rotação horizontal ou vertical. As máquinas de eixo horizontal estão especialmente adaptadas para a realização dos enrolamentos circunferencial e helicoidal. São muito versáteis e encontram-se bem difundidas na indústria, podendo ser bastante sofisticadas relativamente aos graus de liberdade de movimentos, sobretudo para permitirem realizar enrolamentos polares. A máquina usada no presente trabalho permite, por exemplo, seis graus de movimento (rotação do mandril, três movimentos de translação e duas rotações do mecanismo de deposição). Usando este tipo de técnica, se empregarem dois carros de deposição o sistema fica com onze graus de liberdade.

As máquinas que têm o mandril montado sobre um eixo vertical servem, sobretudo, para realizar enrolamentos polares. Enquanto o mandril roda em torno de dois eixos, o braço de deposição das mechas de fibra de reforço, realiza uma trajetória circular em torno do eixo do mandril.[1], [14]

2.9.1. Eixo Horizontal

Adaptados para realizar preferencialmente enrolamento circunferencial e helicoidal. É uma técnica muito versátil e difusa na indústria. A mais sofisticada poderá ter até seis graus de liberdade (rotação do mandril, três movimentos de translação e duas rotações do mecanismo de deposição) e pode ser utilizada para realizar peças de grandes dimensões, possuindo um elevado índice de produtividade. Se este tipo de técnica utilizar dois carros de deposição, fica com onze graus de liberdade.

2.9.2. Eixo Vertical

Servem para realizar enrolamento polar e helicoidal. O mandril pode rodar em torno do seu eixo enquanto o braço de deposição se move com trajetória circular em torno de um eixo perpendicular ao eixo do mandril.

2.10. Infusão de Resina por Vácuo

A infusão de resina oferece a vantagem de se usarem fibras padrão e sistemas de resina levemente modificados para criar componentes com muito poucas imperfeições, conteúdo de fibra bastante elevado e homogêneo e custo inferior a outros sistemas semelhantes. É um processo de fabrico relativamente rápido podendo até a cura do laminado ser efetuada à temperatura ambiente ou a baixas temperaturas dependendo da escolha da resina. Requer alguma atenção, principalmente no que diz respeito ao escoamento da resina devido à complexidade das linhas de alimentação e vácuo e por poderem ocorrer falhas no sistema de criação de vácuo.

A teoria básica da infusão de resina consiste no princípio de que ao se colocar um volume sob vácuo qualquer fluido terá a preencher o espaço sob vácuo rapidamente. No caso dos compósitos, os espaços sob vácuo criados entre as fibras secas tenderão a ser preenchidos pela resina que é “sugada” pelo sistema de vácuo[20],[21].

Uma boa infusão terá de ter em conta diversos aspetos na montagem do sistema e uma sequência lógica desses mesmo projetos. A infusão de resina pode realizar laminados com diversas espessuras, mas é necessária atenção redobrada em peças demasiado espessas pois requerem maior cuidado na montagem do processo.

Os meios de fluxo têm como função direcionar a resina a partir dos recipientes de alimentação. No cimo da peça, é colocado um *peel ply*, em seguida uma rede de distribuição que seja permeável para facilitar a distribuição da resina por toda a peça. Posteriormente liga-se o tubo de alimentação da resina (*Feed Pipe*), que faz a ligação entre o recipiente da mesma e um tubo de distribuição da resina (*Feed Distribution Pipe*).

É ainda utilizado outro componente importante que consiste no escape da resina (*Resin Trap*), que impede que o excesso de resina se escape para a bomba de vácuo.

Para finalizar a bomba de vácuo, que é um dos suportes principais do sistema, é então acionada e o sistema deverá garantir a existência de vácuo no laminado até que a infusão esteja totalmente finalizada. É aconselhada a utilização de bombas de vácuo especialmente projetadas para este propósito.

Para manter o laminado sob vácuo, ele deve ser cuidadosamente envolvido por um saco de vácuo apropriado [20], [22].

A infusão requer cuidados especiais de preparação devido à diversidade de escoamentos e direções possíveis para o mesmo. Um bom planeamento, simulações/testes pode ser feito para minimizar os riscos, e assegurar a inexistência de problemas.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Matérias Primas

Tendo-se decidido usar um molde não recuperável (e, portanto, um *liner*) na execução do reservatório, foi necessário selecionar o material e o método de obtenção (compra/fabrico) para *liner* e, depois, as matérias primas a usar no fabrico da parede estrutural. De seguida serão descritas as soluções encontradas e utilizadas para o desenvolvimento do projeto. De sublinhar, que serão também realizados reservatórios com matriz termoplástica e termoendurecível.

3.1.1. Liner em Alumínio

Tendo em conta a extremamente pequena molécula do hidrogénio e evitar fugas de permeabilidade, escolheu-se usar uma camada de alumínio no *liner*. Decidiu-se, por isso, avaliar a possibilidade de usar um *liner* totalmente em alumínio. O alumínio é um material relativamente leve, capaz de evitar a passagem de hidrogénio através dele e de fabrico relativamente barato. Não existindo no PIEP capacidade para produzir peças em alumínio, optou-se por contactar então uma empresa norte-americana para efetuar uma encomenda uma de 80 liners de alumínio. Esta solução foi adotada devido à pouca oferta a nível nacional e também porque o custo de fabrico a nível seria mais elevado.

3.2. Prepregs de Matriz Termoplástica

Neste trabalho, como já referido anteriormente será utilizado um pré-impregnado de matriz termoplástica reforçada com fibras de carbono na produção de reservatórios. O material selecionado foi a fita termoplástica Suprem™ T 62% C10051 / PA10033 0.14 x 5, presente na figura 5 que é uma fita composta por Poliamida 12 (PA12-2159) reforçada com fibras de carbono T700SC-60E capaz de garantir as propriedades consideradas adequadas para os reservatórios que se pretendem fabricar. A ficha técnica da fibra encontra-se no Anexo I.



Figura 5- Fita Termoplástica utilizada para enrolamento de reservatórios e provetes

3.3. Material com Matriz Termoendurecível

Foi também utilizada uma matriz termoendurecível na execução do reservatório. Neste caso, a matriz selecionada foi uma resina epóxida, Biresin® CR83 da Sika, com boas características mecânicas e resistência à temperatura. As características desta resina podem ser consultadas no Anexo III.

Para fibras de reforço usar neste caso, foram selecionadas fibras de carbono tipo PAN, Torayca®T700S-12000, da Toray®, de alta resistência (HR). Estas fibras caracterizam-se por terem uma percentagem de carbono de 97-98%, densidade de 1.75-1.9 kg/m³ e mechas de 800 Tex. Outras características destas fibras podem ser consultadas no Anexo II.

3.4. Dimensionamento do laminado

Para dimensionamento do laminado foi seguida a norma EN13923:2005, *Filament wound FRP pressure vessels - Materials, design, manufacturing and testing*, que especifica dois tipos de métodos a usar no enrolamento filamental de reservatórios pressurizados. De acordo com a norma, apenas o material depositado por enrolamento filamental (parede estrutural) deve ser levado em conta no cálculo da resistência e da rigidez do reservatório. Um método A, pode ser usado para cálculo casca cilíndrica e das calotes com base em resultados obtidos em protótipos. Um método B, onde a casca cilíndrica e as calotes são calculadas com base na teoria dos laminados. O projeto e produção de reservatórios pressurizados por enrolamento filamental, de acordo com a norma acima descrita, envolve a utilização das equações presentes na norma anexada no Anexo V.

Introduzidos os fatores de segurança e as propriedades do reforço calcularam-se os esforços nominais na direção helicoidal, $N\theta$, e longitudinal, $N\phi$, a espessura das camadas de enrolamento helicoidais, e circunferenciais, t_w e t_c , respetivamente, e o número de camadas a considerar n_w e n_c .

Para usar os critérios de validação especificados pela norma, calcularam-se as tensões helicoidais e circunferenciais, respetivamente, σ_h e σ_c que não podem ser superiores à tensão máxima admissível, σ_{uts} , também calculada por $\frac{Xt}{K}$, onde K é o fator de segurança global. As deformações a que o estratificado fica sujeito na direção helicoidal, ϵ_h , e circunferencial, ϵ_c , também não poderão exceder a deformação máxima admissível a considerar, ϵ_{max} .

3.5. Simulação de Enrolamento Filamentar Cadwind

Para a realização do código a fornecer à máquina de enrolamento filamentar foi utilizado o *software* CADWIND existente no PIEP. Inicialmente, após definição dos parâmetros a utilizar estudou-se o enrolamento de uma placa plana com fibras aproximadamente enroladas de modo circunferencial (90°) de onde foram, posteriormente, cortados provetes 0°, 45° e 90° para ensaio. Para esse efeito, simulou-se o seu enrolamento no CADWIND e, posteriormente, gerou-se o respetivo código para inserção na máquina de enrolamento.

Foi também efetuada a simulação do enrolamento filamentar do reservatório com o intuito de gerar o código para enrolar o mesmo, usando neste caso o laminado que já tinha sido previamente calculado em Excel. Na figura 6, é possível observar os parâmetros colocados no *software* para gerar o código inserido na máquina de enrolamento.

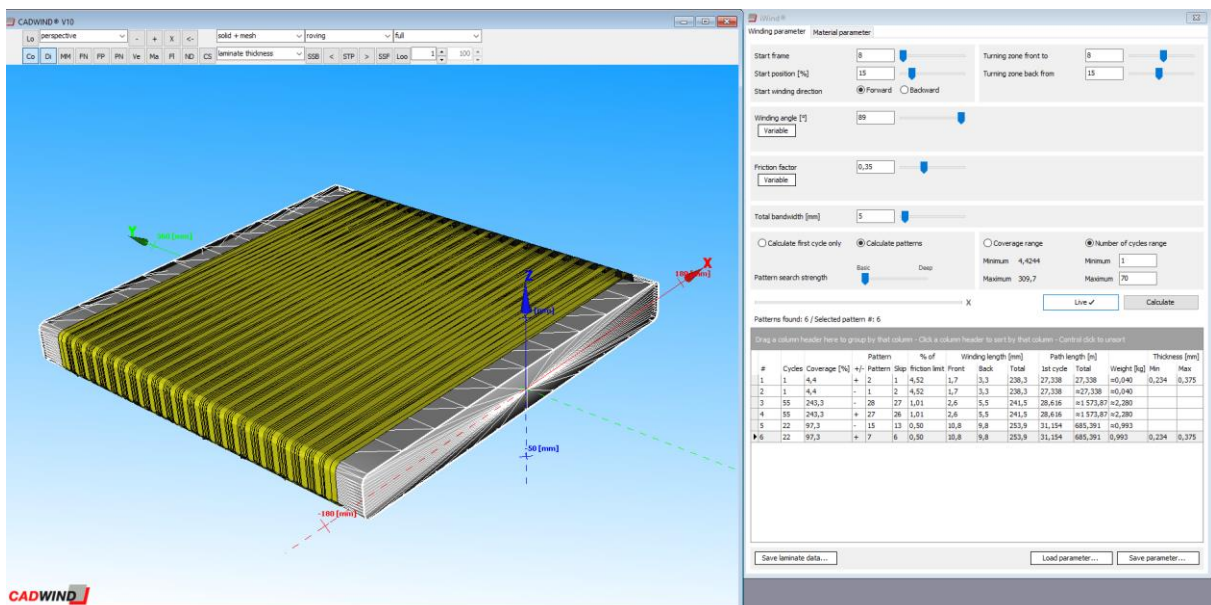


Figura 6- Simulação de CADWIND para Enrolamento de Placa Plana

3.6. Enrolamento Filamentar

O equipamento a ser utilizado nesta dissertação encontra-se instalado no laboratório de processamento do PIEP e é uma máquina de enrolamento polar com seis eixos independentes desenvolvido no âmbito de um projeto de I&DT, em parceria do PIEP, Gilótica e Vidropol.

Nos seguintes tópicos será efetuada uma sucinta explicação do funcionamento do equipamento, e serão apresentados os trabalhos a utilizar na produção dos laminados.

3.6.1. Descrição do equipamento

Como já mencionado anteriormente, é uma máquina de controlo numérico com 6 eixos independentes, capaz de enrolar diversas estruturas compósitas. O equipamento tem os seguintes sistemas:

- I. Sistema de alimentação dos *Tows*;
- II. Sistema de impregnação;
- III. Quadro de controlo dos movimentos dos eixos;
- IV. Controlo do movimento do olhal de deposição das fibras.

Quanto aos seis eixos de movimentação, cada um tem a sua função específica, sendo eles a rotação do mandril da máquina e os 5 eixos de movimento do olhal de deposição dos *tows*:

- Eixo X, deslocamento longitudinal da carruagem;
- Eixo Y, movimento transversal do braço que suporta o olhal de deposição;
- Eixo Z, movimento da carruagem na vertical;
- A, movimento de rotação do mandril;
- B e C, rotação do olhal em torno do eixo Y e Z.

É possível observar na figura 7 a máquina utilizada neste projeto.



Figura 7- Máquina Utilizada na realização do Enrolamento de Liners e de Placas

3.6.2. Preparação de Provetes

Irão ser preparados os provetes planos através de enrolamento filamentar sobre uma chapa de aço (mandril) com as dimensões de 300x300x30 mm. Por esse mesmo motivo, foi necessário adaptar a máquina para o efeito, dado ela não se encontrar preparada para enrolar estruturas paralelepípedicas. Para isso, começou por se realizar uma estrutura de madeira com as mesmas dimensões da chapa de aço que pudesse se colocada na máquina de modo a validar o código. Na Figura 8 apresenta-se a estrutura de madeira usada.



Figura 8- Estrutura de Madeira utilizada para calibração da máquina

Uma vez calibrada a máquina, foi então introduzida na mesma a placa de aço, que previamente tinha sido desenhada em *Solidworks*. A chapa usada pode ser vista na Figura 9.



Figura 9- Placa de aço desenhada para enrolamento filamental e produção de provetes

Uma vez colocada a placa de aço na máquina de enrolamento (ver figura 10 (a)), aplicou-se de forma homogênea um desmoldante sobre a mesma, deixando-se em seguida secar durante 5 minutos. O material usado com desmoldante foi o Mikon W-64+ da Munch Chemie International e foi aplicado de maneira uniforme pela placa.

Efetuuou-se, seguidamente, o enrolamento da placa para a produção de provetes, tal como é possível observar na figura 10(b).

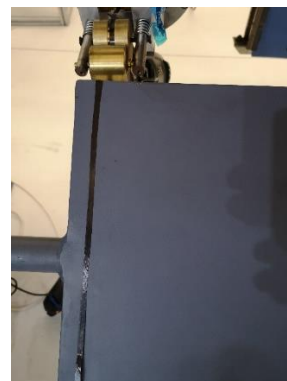
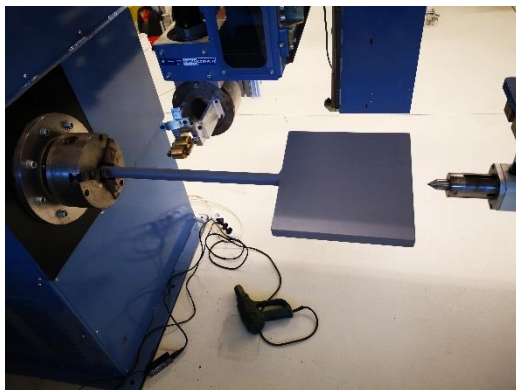


Figura 10- (a) Placa inserida na máquina para começar enrolamento; (b) Começo do enrolamento

Posteriormente, produziu-se uma placa com espessura de 2mm usando um laminado com 22 camadas enroladas circunferencialmente de acordo com o código gerado no *software CADWIND*, onde se definiu um preenchimento da 97.3%. A Figura 11 mostra uma fase do enrolamento filamental efetuado.

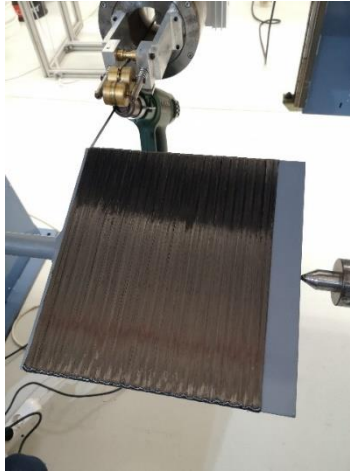


Figura 11-Enrolamento Completo da Placa

Após o enrolamento da placa de aço, foi efetuado o corte dos provetes a 0° , 45° e 90° : Tendo-se verificado que o material se deteriorava quando se cortavam os provetes a 90° e isso impossibilitava a aplicação de extensómetros sobre os mesmos, conclui-se haver necessidade de fabricar um novo mandril que fosse axissimétrico, com dimensões $290 \times 290 \times 290 \text{ mm}$. Construído o novo mandril em aço presente na Figura 12 repetiu-se todo o processo de forma a se poderem cortar os provetes a 0° , 45° e 90° que se pretendiam ensaiar mecanicamente.



Figura 12-Placa desenhada após otimização de processo

Mesmo assim, verificou-se que as placas em compósito de matriz termoplástica enroladas não apresentavam a compactação necessária a permitir o corte dos provetes sendo, neste caso, necessário realizar placas de outra forma. A opção foi cortar fitas do pré-impregnado de matriz termoplástica com dimensões entre 20 e 25 cm, como se mostra na figura 13 e juntá-las por forma a que pudessem ser aquecidas, compactadas e arrefecidas numa prensa de modo a obter uma placa com as dimensões

necessários a permitir o corte dos provetes necessários à realização dos ensaios previstos. Após a compressão e arrefecimento na prensa foi efetuado o corte dos provetes para caracterização mecânica. No caso das placas fabricadas com a matriz termoendurecível, começou por se fazer o enrolamento da fibra a seco (*dry winding*) na placa da figura 14 que, posteriormente, foram impregnados por infusão de resina. Concluída a infusão, realizou-se o corte dos provetes necessários à caracterização mecânica.

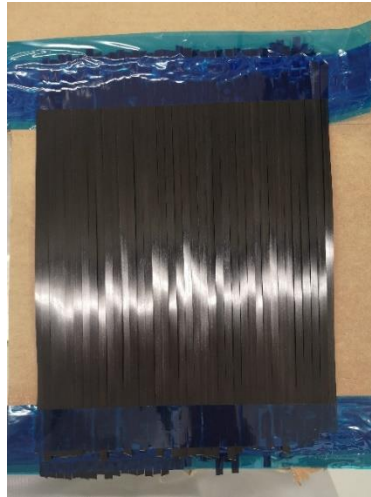


Figura 13- Construção de placas com fitas pré-impregnadas

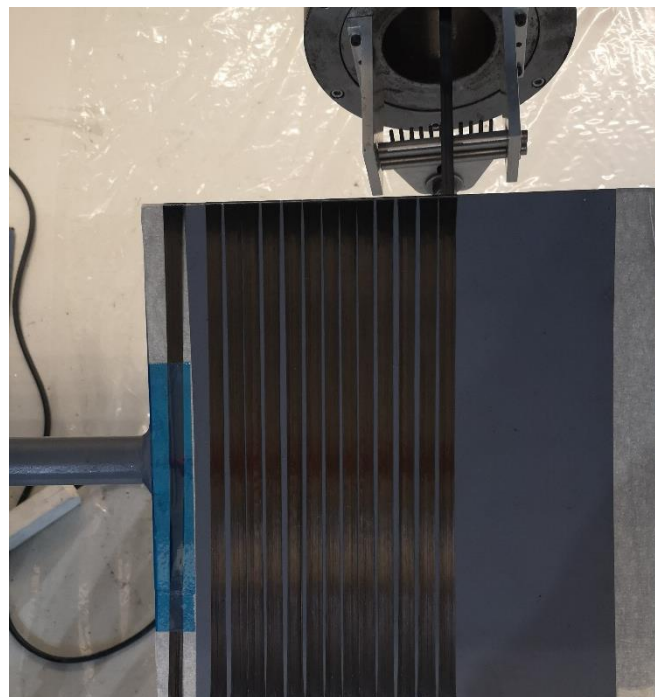


Figura 14- Enrolamento "Dry-Winding"

3.7. Caracterização Física e Mecânica

Para caracterização dos laminados usados, neste trabalho realizaram-se ensaios de tração e compressão. Na realização dos mesmos, usaram-se 5 provetes com as dimensões definidas nas normas de ensaio selecionadas. A máquina SHIMADZU AGX-50KN, equipada com uma célula de carga de 50 KN, utilizada na realização dos ensaios pode ser observada no Anexo XII. Para a realização dos ensaios foi utilizado o extensômetro OMEGA 4/350-XY41, aplicado por colagem nos provetes.

Ensaio de Tração

Os ensaios de tração têm como objetivo determinar as propriedades de tensão dos compósitos.

Para a realização de provetes e a realização dos ensaios de tração, foi seguida a norma ASTM D3039/D3039M inserida no Anexo V. Nesta norma é afirmado que é necessário, no mínimo, 5 provetes por cada condição a menos que sejam obtidos resultados válidos com menos amostras.

Uma vez que há 3 ângulos de enrolamento filamentar é necessário recorrer também à norma para dimensionar os provetes e os *tabs* a aplicar nos provetes, de forma a não danificar o material por esmagamento nas amarras, como indicado na tabela 2.

Tabela 2- Geometria dos Provetes para Ensaio de Tração

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

Ensaio de Compressão

O ensaio de compressão determina as propriedades mecânicas de plásticos rígidos reforçados ou não, incluindo compósitos de elevado módulo, quando exposto a uma compressão com taxas baixas de carga ou deformação. Estes ensaios serão realizados com o intuito de utilizar os valores obtidos para a simulação no software *ABAQUS* e também para saber se em compressão o material se comportava de forma muito diferente que em tração, uma vez que pode ser importante no impacto ou flexão (onde existe simultaneamente compressão e tração).

Para a realização de provetes e a realização de ensaios, será seguida a norma ASTM D695-02a inserida no Anexo VII. É afirmado na norma que no caso de materiais isotrópicos, são necessários pelo menos 5 provetes e em materiais anisotrópicos serão utilizados 10 provetes, 5 com orientação na direção das

fibras (0°) e 5 paralelos ao principal eixo de anisotropia (90°). Na figura 15 é indicado o dimensionamento necessário do provete.

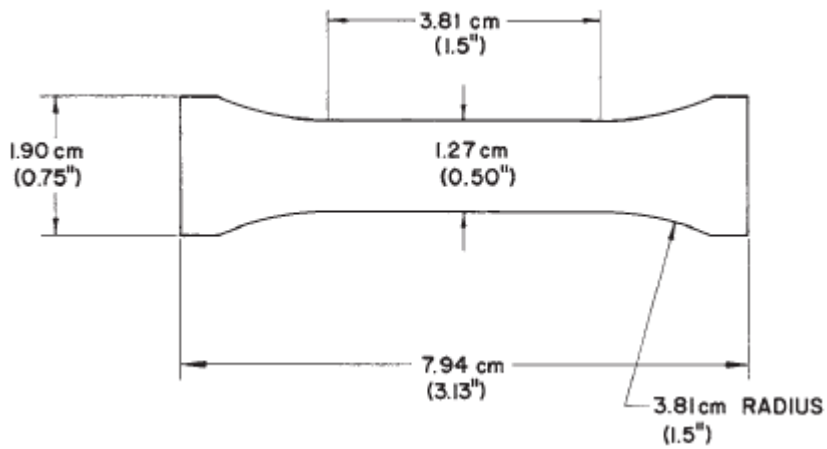


Figura 15- Dimensões do Provete para Materiais de Espessura abaixo de 3.2mm

Na norma ISO 14126:1999, presente no anexo VIII, são anunciados tipos de falhas válidas na realização dos ensaios, estando as mesmas apresentadas na figura 16.

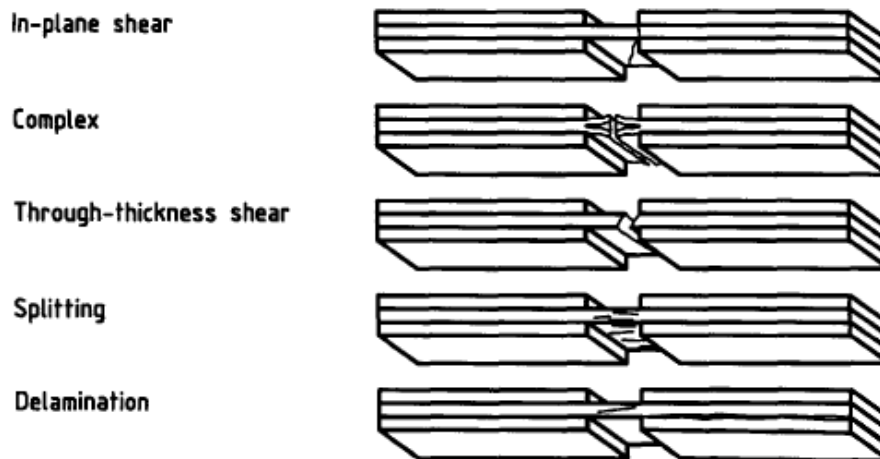


Figura 16- Tipos de falha aceitáveis apresentadas na norma ISO14126:1999

4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos ao longo deste projeto de maneira a retirar as devidas conclusões para finalizar este projeto.

4.1. Conceção do Reservatório

O volume do reservatório foi sendo alterada pela empresa a quem ele se destinava ao longo do projeto, acabando as suas características finais por ser as seguintes (ver figura 19):

- Volume de hidrogénio a armazenar: $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ (1L)
- Pressão interna de serviço: 30 MPa (300 bar)
- Diâmetro interno do reservatório: $\approx 75 \text{ mm}$ (variável de acordo com figura 19);
- Comprimento Total do reservatório com gargalo: 287mm
- Espessura do Reservatório: $\approx 3.5 \text{ mm}$

Começou por se projetar o reservatório com volume superior ao final, de 1L Na Figura 17 apresenta-se um desenho do reservatório inicial e do que foi projetado no final.

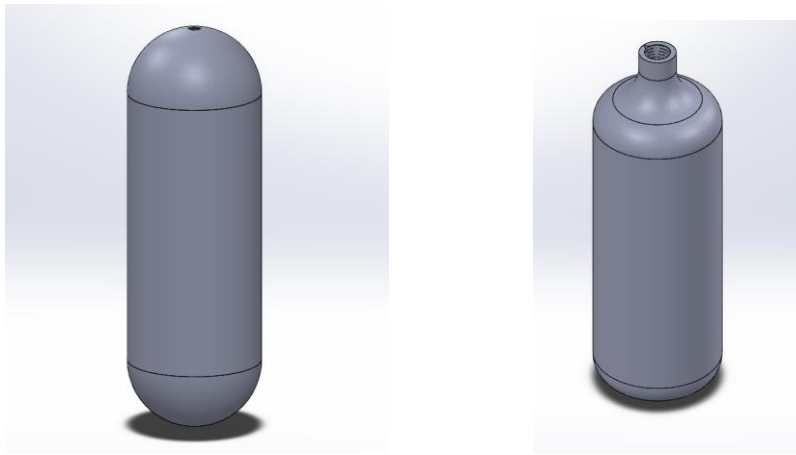


Figura 17-Reservatório Desenhado Inicial (esquerda) e Reservatório Final (direita)

Como é possível observar na figura 17, o reservatório inicial, que se encontra à esquerda, apresentava diversos defeitos, entre os quais a utilização de calotes semiesféricas que originariam demasiados escorregamentos das fibras durante a sua deposição por enrolamento filamentar e, além disso, não tinha ainda definidos os insertos indispensáveis para o enchimento/saída do hidrogénio. Na imagem à direita, já é possível observar o reservatório final projetado com forma bastante mais adequada para ser executada por enrolamento filamentar e contendo as condições indispensáveis à montagem dos acessórios para enchimento/saída do hidrogénio. Esta foi a forma final adotada para construção dos

liners do reservatório, como é possível observar na figura 18. E na figura 19 é possível observarem-se todas as dimensões do mesmo.



Figura 18- Reservatório Final em Alumínio para Enrolamento Filamentar

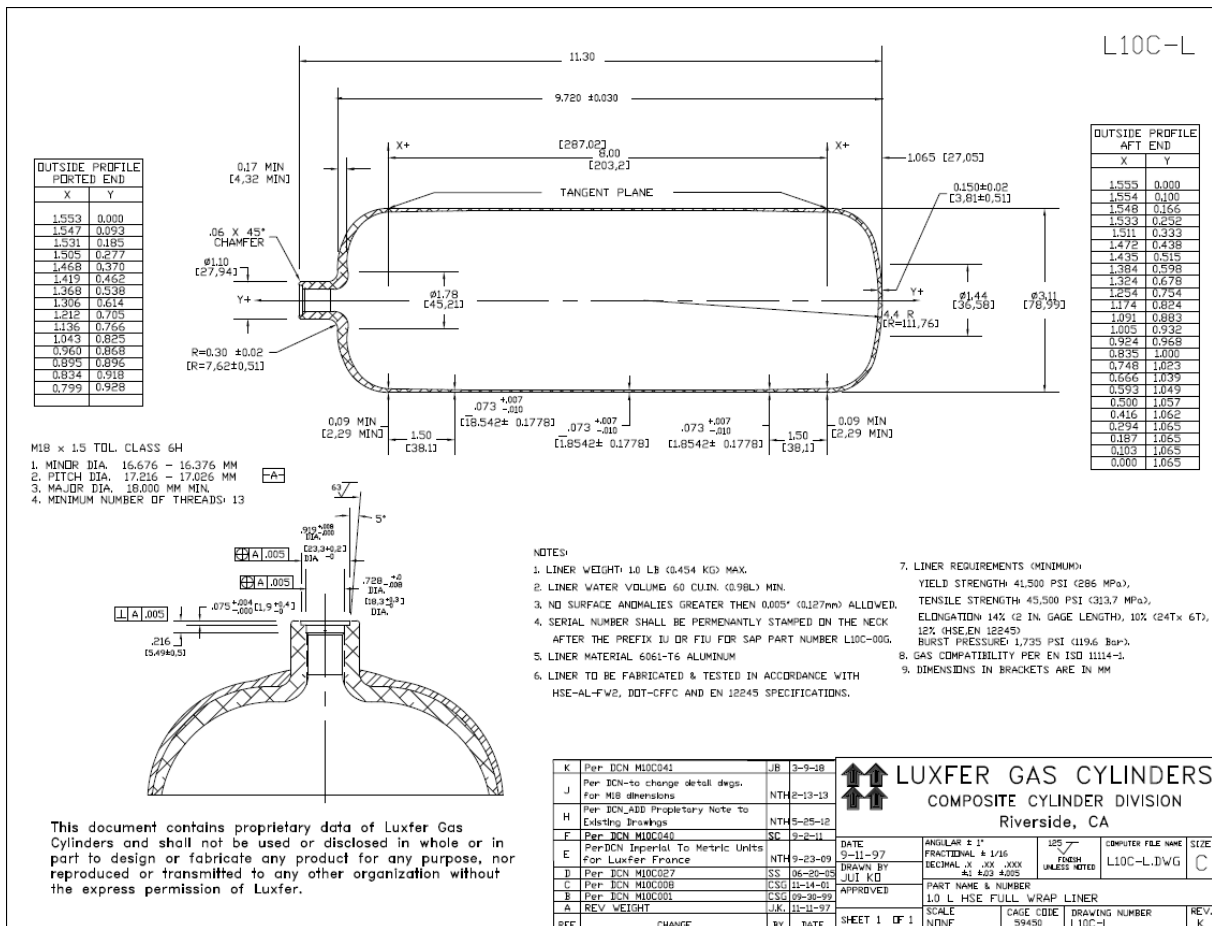


Figura 19- Ficha técnica do reservatório comprado par utilização ao longo do projeto

4.2. Enrolamento Filamentar de Placas

Como referido no capítulo 3, usou-se inicialmente o enrolamento filamentar para fabricar os provetes a serem testados mecanicamente e, posteriormente, no enrolamento dos reservatórios.

A figuras seguintes apresentam aspetos do fabrico dos provetes por enrolamento sobre placas (ver ponto 3.6.2).

A Figura 20 apresenta o enrolamento placas usadas para obtenção dos provetes de matriz termoplástica (PA 12 reforçada com fibras de carbono).

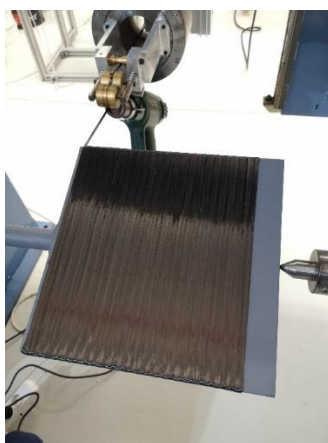
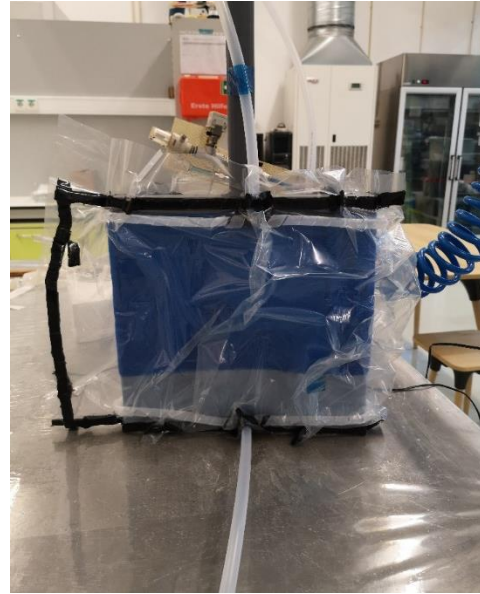


Figura 20- Placa Enrolada para Corte de Provetes de PA 12 reforçada com fibras de carbono

A figura 21 (a) apresenta a placa enrolada, a seco, apenas com fibras de carbono, devido aos escorregamentos constantes que ocorreram durante o seu enrolamento em húmido, e que, posteriormente, foi usada para impregnação das fibras com resina epóxida por infusão a vácuo. A preparação da placa para a posterior infusão a vácuo é também mostrada na figura 21 (b).



Figura 21- (a) Placa com fibras de carbono enroladas a seco



(b) Placa preparada para a Infusão de resina a vácuo

4.3. Ensaio Mecânicos

Com já referido na seção 3.7, para realização dos ensaios mecânicos usou-se uma máquina SHIMADZU AGX-50KN, equipada com uma célula de carga de 50 KN, que se encontra instalada nos laboratórios do PIEP.

4.3.1. Ensaio de Tração

Os resultados obtidos nos ensaios de tração dos provetes de alumínio, realizados a uma velocidade de 5 mm/min, podem ser observados na Figura 22.

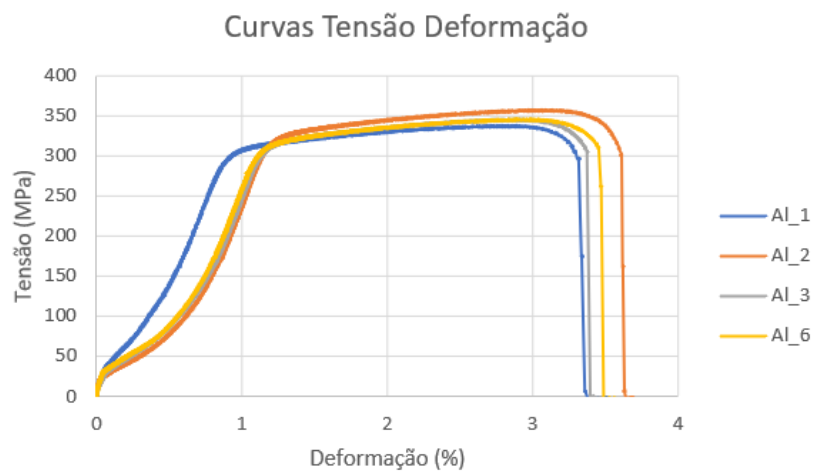


Figura 22-Curvas Tensão-Deformação do liner em Alumínio

Como é possível observar, os provetes apresentaram um comportamento bastante semelhante em todos os ensaios realizados. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nos diferentes ensaios.

Tabela 3- Dados Recolhidos da Análise das Curvas Tensão-Deformação

Provete	Tensão de Cedência (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
AI1	299.71	98.33
AI2	323.51	101.53
AI3	313.26	88.12
AI4*	-	
AI5*	-	
AI6	315.80	92.04
Média	313.07	95.0

Nota: * valores desprezados devido à não colocação de extensômetros no provete inicial

Como é possível observar pela tabela 3 a tensão de cedência média para o liner é de 313.07MPa tendo sido efetuado o cálculo da tensão admissível mediante um coeficiente de segurança de 1.5, sendo a mesma de 208.71MPa. É também possível obter um valor médio do módulo de elasticidade para o alumínio de 95.0 GPa. Através da análise das tensões obtidas nas amostras, é possível observar que não há grande discrepância nos valores, sendo isso um resultado positivo que mostra uma certa homogeneidade do alumínio.

Em seguida, apresentam-se os resultados obtidos nos provetes fabricados com matriz termoendurecível (epóxida) e termoplástica (PA 12), ambas reforçadas com fibras de carbono. Os ensaios efetuados com estes dois materiais foram realizados a uma velocidade de ensaio de 2mm/min.

No anexo X apresentam-se fotografias com o aspeto dos provetes após ensaio. A Figura 23 apresenta as curvas tensão-deformação obtidas durante o ensaio dos provetes fabricados com matriz termoplástica PA 12 reforçada com fibras de carbono enroladas a 0°.

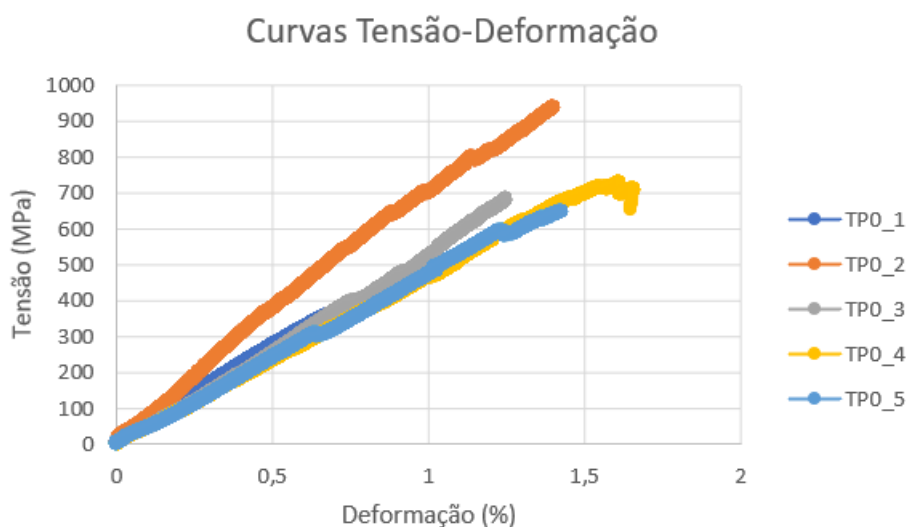


Figura 23- Curvas tensão-deformação dos provetes de PA12 reforçada com fibras de carbono a 0°

A Tabela 4 resume os resultados obtidos a partir das curvas dos ensaios realizados.

Tabela 4- Dados obtidos dos ensaios de tração nos provetes de PA 12 reforçada com fibras de carbono a 0°

Provede	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
TPO_1	452.73	-
TPO_2	938.54	-
TPO_3	682.84	-
TPO_4	730.70	-
TPO_5	647.82	-
Média	690.52	-

É possível observar que a tensão média de ruptura obtida nos provetes de matriz termoplástica (PA12) reforçada com fibras de carbono enroladas a 0° foi de 690,52MPa, sendo calculada para os mesmos com o coeficiente de segurança de 4.356, uma tensão admissível de 158.52MPa. Uma vez que não foi possível colocar extensómetros nos provetes não é possível calcular o módulo de elasticidade para os mesmos.

Na figura 24 apresentam-se também as curvas tensão-deformação obtidas em 3 provetes do mesmo material (PA12 reforçada com fibras de carbono) em ensaios de tração realizados na direção transversal às fibras (fibras a 90°).



Figura 24- Curvas tensão-deformação nos provetes de PA12 reforçada com fibras de carbono a 90°

Como se pode na Figura 24, registaram-se resultados completamente dispares das duas outras amostras nos provetes TP90_3, que se detetou ser devido a uma fratura ocorrida durante a preparação do provete. Por esse motivo, os resultados obtidos no provete TP90_3 acabaram por ser descartados. A Tabela 5 resume os valores das características mecânicas calculadas para os provetes de PA12 reforçada com fibras de carbono orientadas a 90° considerando os ensaios de tração apresentados na Figura 24.

Tabela 5- Dados obtidos dos ensaios de tração nos provetes de PA 12 reforçada com fibras de carbono orientadas a 90°

Proвете	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
TP90_1	8.24	1139.4
TP90_2	8.07	1186.3
TP90_3*	-	-
Média	8.16	1162.9

Nota: * valores desprezados devido a problemas detetados no provete inicial

É possível observar que a tensão de cedência média do material em matriz termoplástica com fibras orientadas a 90° é de 8,16 MPa, a que corresponde uma tensão admissível, calculada com um

coeficiente de segurança de 4.356, de 1.87 MPa. Quanto ao módulo de elasticidade foi obtido um valor de 1162.9 MPa.

Para finalizar a análise dos dados dos ensaios de tração, apresentam-se a seguir os dados registados nos ensaios dos provetes fabricados com a resina epóxida termoendurecível, Biresin® CR83, reforçada com fibras de carbono.

Na Figura 25 apresentam-se as curvas tensão-deformação obtidas a partir dos ensaios realizados com os provetes fabricados em resina epóxida reforçada com fibras de carbono a 0°.

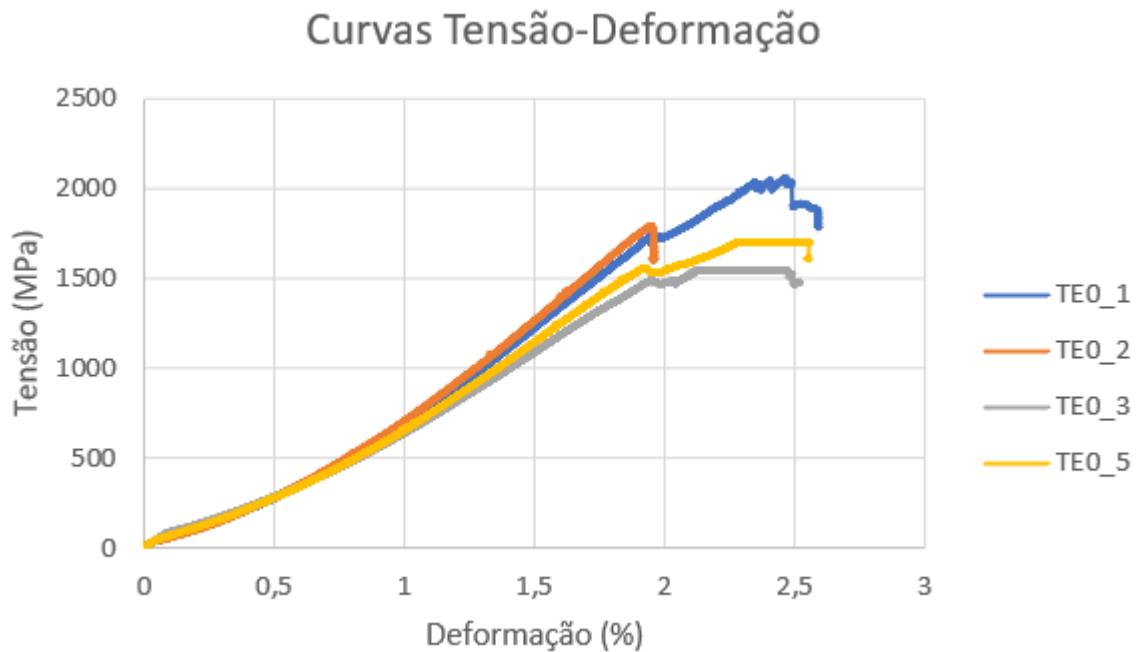


Figura 25-Curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios dos provetes em epóxido reforçado com fibras de carbono a 0°

A Tabela 6 resume as características mecânicas em tração determinadas para o material a partir dos dados obtidos nos ensaios e apresentados na figura anterior.

Tabela 6- Características mecânicas em tração obtidas nos provetes epóxido reforçado com fibras de carbono a 0°

Provede	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
TEO_1	1742.13	225.89
TEO_2	1791.92	238.45
TEO_3	1471.86	198.76
TEO_4*	-	-
TEO_5	1530.49	207.65
Média	1619.10	217.69

Nota: * valores desprezados devido a problemas detetados no provete inicial

É possível observar que a tensão média de rotura obtida nos provetes de resina epóxida reforçada com fibras de carbono orientadas a 0° foi de 1619.10MPa, sendo a tensão admissível calculada com o coeficiente de segurança de 4.356 de 375,14 MPa. Quanto ao valor obtido para o módulo de elasticidade este é 217.69 GPa.

Por último, apresentam-se na Figura 26 as curvas obtidas nos ensaios de tração a que foram submetidos os provetes em resina epóxida reforçada com fibras de carbono orientadas a 90°.



Figura 26-Curvas tensão-deformação nos provetes em resina epóxida reforçada com fibras de carbono orientadas a 90°

Os resultados obtidos para as características mecânicas do material, calculados a partir dos dados mostrados na Figura 26, encontram-se apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Características mecânicas em tração dos provetes em epóxido reforçado com fibras de carbono orientadas a 90°

Proвете	Tensão de Rotura (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
TE90_1	-	-
TE90_2	42.55	1269.4
TE90_3	19.73	1286.3
Média	22.78	1267.9

Nota: * valores desprezados devido a problemas detetados no provete inicial

É possível observar que se obteve uma tensão média de rotura para os provetes em resina epóxida reforçada com fibras de carbono orientadas a 90° de 22,78 MPa, resultando numa tensão admissível para o material, calculada com o coeficiente de segurança de 4.356, de 7.15 MPa. Quanto ao valor do módulo de elasticidade foi obtido um valor de 1267.9 MPa.

Comparando os resultados obtidos nos ensaios de tração dos provetes reforçados com fibras de carbono unidirecionais fabricados em PA 12 (matriz termoplástica) com os fabricados em epóxido (matriz termoendurecível), pode-se concluir que os compósitos de matriz termoendurecível apresentaram quase todas as características mecânicas significativamente mais elevadas que os de matriz termoplástica. Em termos de tensão de admissível, o compósito de matriz termoendurecível apresentou valores cerca de 2,4 vezes superiores (375.14 MPa contra 158.52 MPa) e 3,8 vezes mais elevado (7.15 MPa versus 1.87 MPa), respetivamente, na direção das fibras de carbono e na direção transversal a elas. No entanto, no respeitante ao módulo de elasticidade, enquanto o compósito de matriz termoendurecível apresentou um valor de rigidez de 217.69 GPa na direção das fibras de carbono (não foi possível calcular para o compósito de matriz termoplástica, uma vez que não foi possível aplicar extensómetros nos provetes), obteve-se um valor de rigidez bastante semelhante em ambos os compósitos na direção transversal às fibras (126.79 GPa para o compósito de matriz termoendurecível contra 116.29 GPa no caso do de matriz termoplástica).

4.3.2. Ensaio de Compressão

Neste capítulo são apresentados e discutidos as curva força/deslocamento, as características mais relevantes e o tipo de falhas obtidos a partir dos ensaios de compressão realizados em conformidade com o procedimento descrito na seção 3.7.1.

As Figuras 27 e 28, apresentam as curvas força-deslocamento obtidas nos provetes reforçados com as fibras de carbono orientadas 0°, respetivamente, nos compósitos fabricados em resina termoendurecível epóxida, Biresin® CR83, e nos compósitos de matriz termoplástica (PA12).

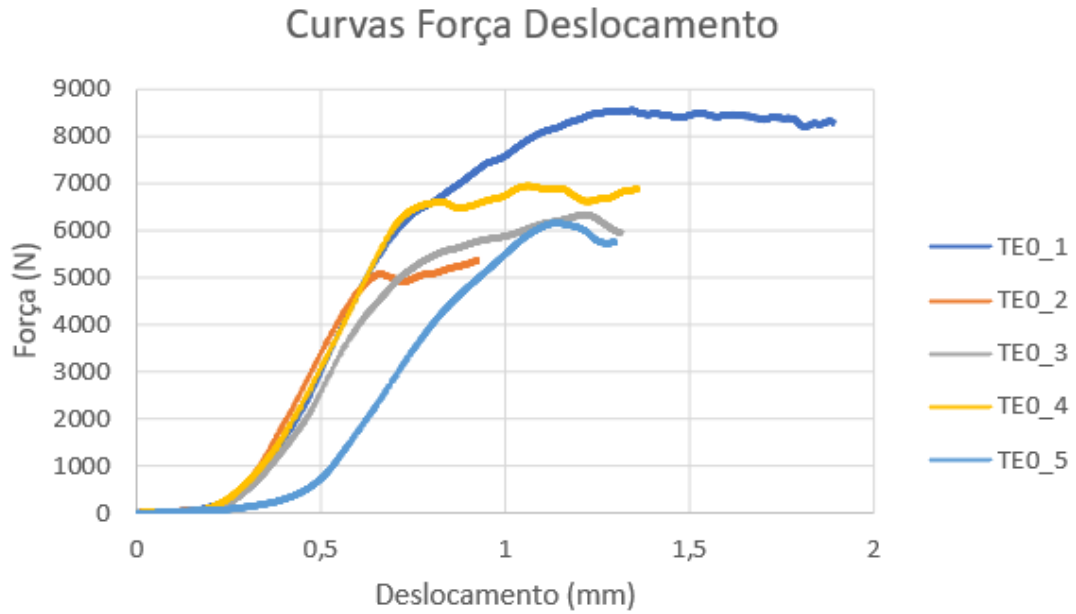


Figura 27- Curvas força/deslocamento obtidas em compressão nos compósitos de resina epóxida reforçada com fibras de carbono orientadas a 0°

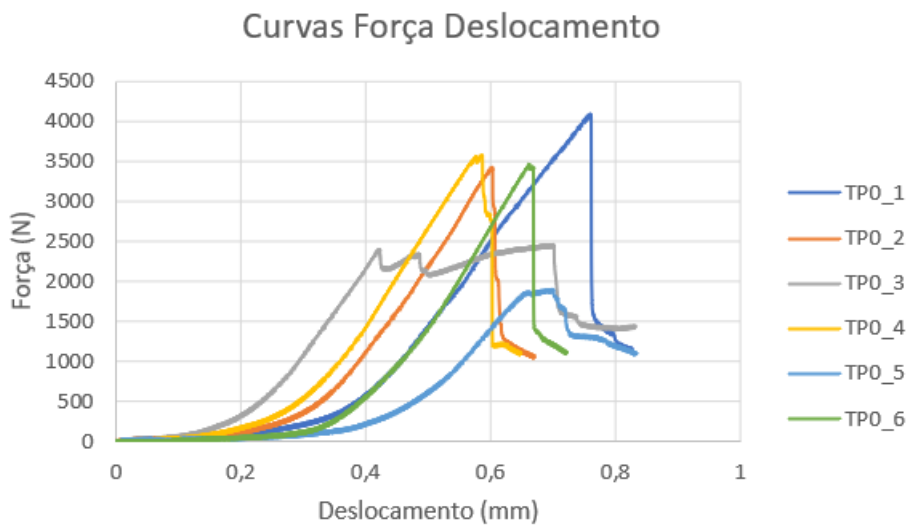


Figura 28- Curvas força/deslocamento obtidas em compressão nos compósitos de Poliamida 12 (PA) reforçada com fibras de carbono orientadas a 0°

Na tabela 8 apresentam-se as características mecânicas obtidas para materiais com os dois tipos diferentes de matriz polimérica, calculadas com base dados apresentados nas duas figuras anteriores.

Tabela 8- Características mecânicas em compressão para os compósitos de matriz termoendurecível e termoplástica na direção das fibras de reforço, determinadas a partir das curvas força-deslocamento registradas nos ensaios

Tipo de Matriz	Provete	Força Máxima (N)	Tensão de rotura (MPa)
Termoendurecível	TE0_1	8555.06	308.15
	TE0_2	5373.90	191.56
	TE0_3	6335.66	246.69
	TE0_4	6947.41	265.65
	TE0_5	6157.41	230.08
	Média	6673.89	248.43
Termoplástico	TPO_1	4083.93	126.65
	TPO_2	3416.98	116.32
	TPO_3	2446.57	87.04
	TPO_4	3577.07	127.28
	TPO_5	1884.65	67.86
	TPO_6	3463.89	121.95
	Média	3145.52	107.85

Como se pode ver, tanto o compósito de matriz termoendurecível como o de matriz termoplástica apresentaram, na direção das fibras de reforço, características mecânicas em compressão inferiores às apresentadas em tração, anteriormente na seção 4.3.1. Já no que diz respeito à comparação entre valores obtidos nos compósitos de matriz termoendurecível e termoplástica, pode-se concluir que os primeiros apresentaram, tal como aconteceu anteriormente em tração (ver seção 4.4.1), melhores características mecânicas em compressão do que os de matriz termoplástica.

As Figuras 29 e 30 apresentam, por sua vez, as curvas força/deslocamento obtidas nos ensaios de compressão realizadas em ambos materiais na direção transversal à das fibras (90°), respetivamente, compósitos fabricados com resina termoendurecível e com matriz termoplástica.

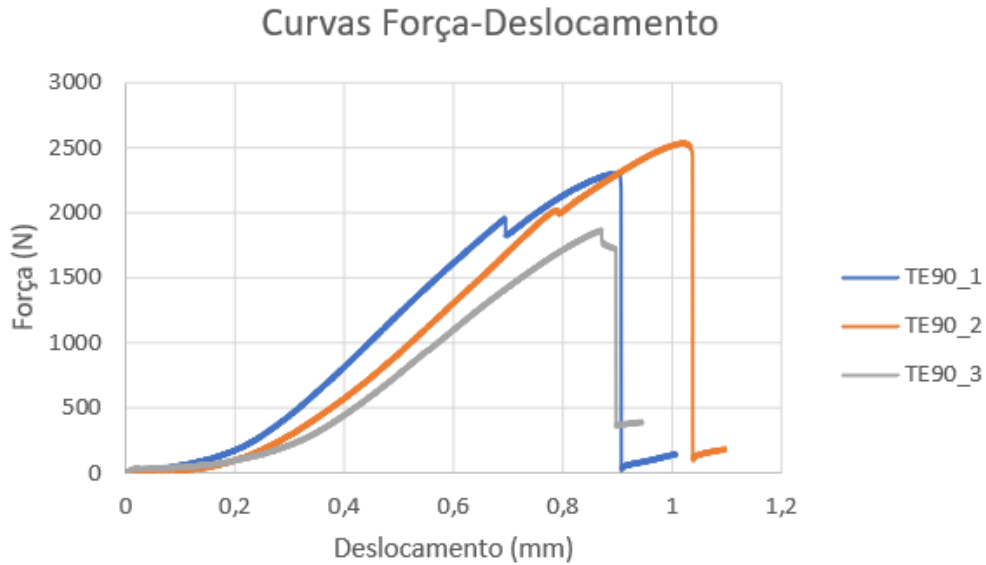


Figura 29- Curvas força/deslocamento obtidas nos ensaios compressão realizados transversalmente à direção das fibras (90°) nos compósitos de matriz epóxida

Como se pode ver na Figura 30, apenas foi possível ensaiar em compressão na direção transversal às fibras de carbono dois provetes com matriz termoplástica em PA12 e, o resultado de um deles (TP90_2) acabou por ter de ser desprezado dado o desenvolvimento da curva obtida claramente indiciar existência de danos no provete, provavelmente, causados durante o seu processo de preparação.

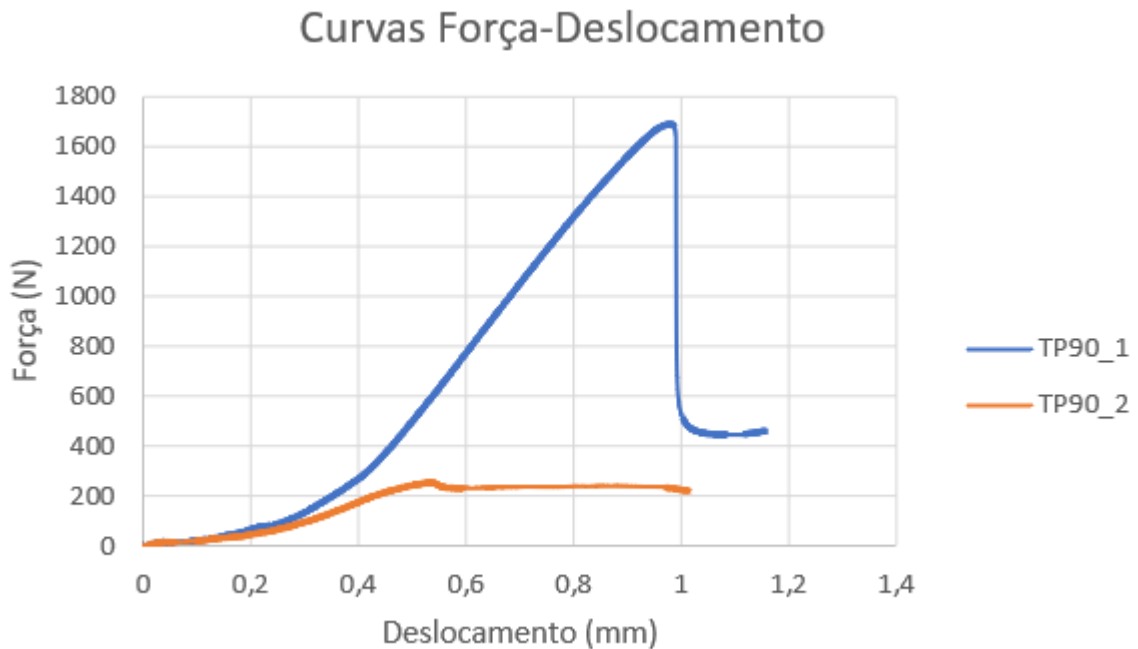


Figura 30-Curvas força/deslocamento obtidas nos ensaios compressão realizados transversalmente à direção das fibras (90°) nos compósitos de matriz termoplástica (PA 12).

Na Tabela 9 são apresentados as características em compressão, na direção transversal à das fibras de carbono, dos provetes fabricados com cada uma das duas matrizes, determinadas a partir das curvas exibidas anteriormente de modo a permitir a sua comparação.

Tabela 9-Dados Recolhidos da Análise das Curvas Força Deslocamento de Material com Matriz Termoendurecível e Termoplástico Enrolado a 90º

Tipo de Matriz	Provete	Força Máxima (N)	Tensão de rotura (MPa)
Termoendurecível	TE90_1	2301.04	109.20
	TE90_2	2533.35	106.79
	TE90_3	1862.22	86.36
	Média	2232.20	100.78
Termoplástico	TP90_1	1691.02	52.44
	TP90_2*	255.19*	8.69*
	Média	1691,02	52,44

*Nota: valores não considerados por deficiência do provete

Como se pode ver pelos valores exibidos na Tabela 9 e como seria expetável, ambos os materiais ensaiados apresentaram, transversalmente às fibras, características mecânicas em compressão inferiores às obtidas anteriormente na direção das fibras. Contudo, contrariamente ao que aconteceu na direção das fibras, pode-se também concluir que ambos compósitos, tanto de matriz termoendurecível como termoplástica, apresentaram características mecânicas superiores às obtidas em tração na anterior secção 4.3.1. É, finalmente, ainda possível concluir que, uma vez mais, os compósitos de matriz epóxida termoendurecível revelaram ter melhores características em compressão que os de matriz termoplástica (PA12).

Para finalizar, apresenta-se na Tabela 10 os tipos de falha encontrados nos provetes após ensaio de compressão de modo a que os resultados pudessem ser validados de acordo com a norma ASTM D695-02^a (ver secção 3.7.1).

Tabela 10- Tipos de falha verificados nos provetes ensaiados e respetiva validação

Tipo de Matriz	Provete	Tipo de Falha	Validação
Termoplástico	TPO_1	Delamination	Válida
	TPO_2	Splitting	Válida
	TPO_3	Splitting	Válida
	TPO_4	Splitting	Válida
	TPO_5	Fissura na Base	Inválida
	TPO_6	Splitting	Válida
	TP90_1	Fissura no Tab	Inválida
	TP90_2	Through Thickness Shear	Válida
	TP90_3	Falha na Produção	Inválida
Termoendurecível	TEO_1	Excesso de Cola	Inválida
	TEO_2	Fissura na Base	Inválida
	TEO_3	Esmagamento na Face Superior	Inválida
	TEO_4	Esmagamento na Face Superior	Inválida
	TEO_5	Esmagamento na Face Superior	Inválida
	TE90_1	Through Thickness Shear	Válida
	TE90_2	Through Thickness Shear	Válida
	TE90_3	Through Thickness Shear	Válida
	TE90_4	Partido	Inválida

Embora os resultados obtidos com dois provetes de matriz termoplástica (TPO_5, TP90_1 e TP90_4) e provetes de matriz termoendurecível (TEO_1, TEO_2, TEO_3, TEO_4, TEO_5 e TP90_4) possam ser considerados inválidos de acordo com o modo de falha que apresentaram, os resultados obtidos do ensaio foram considerados neste trabalho por se ter verificado terem comportamento semelhante aos seus congéneres e não se ter detetado que eles apresentassem defeitos que condicionassem o seu comportamento em compressão.

Na figura 31 mostra-se um exemplo da falha denominada “*through thickness shear*” num dos provetes ensaiados.

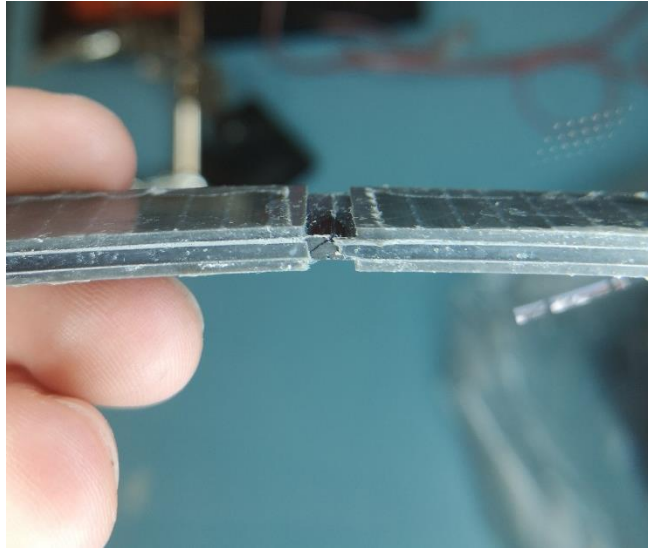


Figura 31- Exemplo de Falha "Through Thickness Shear"

4.4. Enrolamento Filamentar dos Reservatórios

Após montagem do mandril/*liner* na máquina de enrolamento filamentar, procedeu-se ao enrolamento da parte estrutural de reservatórios usando tanto a matriz termoendurecível, de resina epóxida Biresin® CR83 da Sika®, como a fita de prepreg com matriz termoplástica de Poliamida 12 (PA 12), denominado T 62% C10051 / PA10033 0.14 x 5 da Suprem™, ambas usando um reforço de fibras unidirecionais de carbono.

O laminado a ser utilizado para posterior enrolamento de reservatórios será dividido por 3 enrolamentos, sendo eles os seguintes:

- 4 camadas helicoidais a 89° com espessura de aproximadamente 1,2 mm;
- 4 camadas circunferenciais a 15° com espessura de aproximadamente 1,6 mm;
- 4 camadas helicoidais a 89° com espessura de aproximadamente 1,2 mm.

Perfazendo uma espessura final de aproximadamente 4 mm.

Na figura 32, é possível observar o aspeto da cabeça de deposição utilizada no enrolamento do prepreg de matriz termoplástica. Nesta cabeça foram montadas elétricas 2 resistências e uma pistola de aquecimento por sopro por forma a garantir o amolecimento da matriz PA12 e a garantir uma boa compactação do prepregs sobre o mandril/*liner* de alumínio.

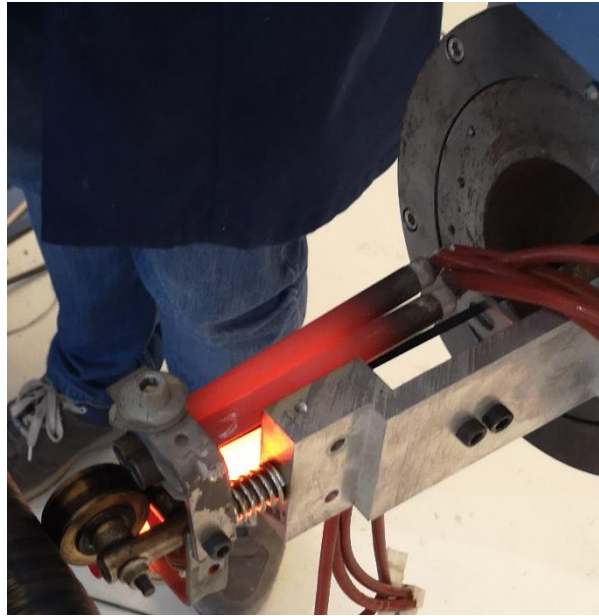


Figura 32-Cabeça de deposição usada com o preregs de matriz termoplástica

Neste trabalho, tentou-se fabricar, sobre o mandril/*liner* em alumínio, a parte estrutural em compósito de matriz epóxida termoendurecível reforçada com fibras de carbono unidirecionais por duas vias: via húmida e via seca, fazendo-se neste último caso, primeiramente a deposição das fibras secas sobre o mandril/*liner* e, posteriormente, a sua impregnação por infusão a vácuo. Face a estes 2 diferentes tipos de fabrico usados, foi necessário desenvolver uma nova cabeça de deposição para o caso do compósito de matriz epóxida reforçada com fibras de carbono. Este processo implicou ensaios nos três tipos de cabeça de deposição mostradas nas Figuras 33, 34 e 35. De facto, no caso do enrolamento de fibras secas, qualquer rugosidade na cabeça de deposição do enrolamento originava o desfiar das fibras e, conseqüentemente, o aparecimento de defeitos indevidos na estrutura compósita.

A Figuras 33 e 34 apresentam os dois primeiros tipos de cabeça de deposição ensaiadas, tendo-se finalmente adotado a geometria final apresentada na Figura 35.



Figura 33- Primeira cabeça de deposição usada



Figura 34- Segunda cabeça de deposição usada



Figura 35- Cabeça de deposição final

A cabeça de deposição final, apresentada na Figura 35, foi projetada por forma a possuir uma geometria que permitisse que ela acompanhasse mais adequadamente o seu movimento relativamente ao do *liner* de modo a evitar que a fibra se desfiasse, tendo em conta o código gerado no CADWIND.

Após definição da cabeças de deposição a utilizar, tanto no caso da utilização do compósito com matriz termoplástica como o de matriz termoendurecível, procedeu-se ao enrolamento das partes estruturais dos reservatórios de maneira a obter protótipos finais para ensaio.

Na Figura 36 é possível observar um protótipo do reservatório final com a parte estrutural construída em matriz termoplástica (PA12) reforçada com fibras de carbono.



Figura 36- Reservatório Completo com Material de Matriz Termoplástica

Por outro lado, na Figura 37 mostra-se um protótipo final dum reservatório com parte estrutural constituída por um compósito em resina epóxida reforçada com fibras de carbono. Trata-se dum reservatório inicialmente fabricado por enrolamento a seco das fibras (processamento por via seca) sobre o mandril/ *liner* após o que se procedeu à sua impregnação por infusão a vácuo da resina epóxida.

Na figura 38 apresenta-se fotografia dum destes últimos reservatórios que se cortou a meio para verificação de inexistência de vazios. Como é possível observar, a olho nu não se detetam vazios na sua parede estrutural e verifica-se que a resina impregnou completamente toda a estrutura fibrosa, sendo necessário recorrer à microscopia para verificar a inexistência total de vazios.



Figura 37- Reservatório Completo com Material de Matriz Termoendurecível



Figura 38- Corte Feito no Reservatório para Verificar Preenchimento da Resina

4.5. Validação do Dimensionamento do Estratificado

Foi efetuado no início do projeto um dimensionamento do estratificado mediante a norma EN13923:2005 sendo efetuada a folha de cálculo presente no Anexo IX que indica as tensões instaladas na direção das fibras, no Anexo X está indicado as tensões a que o reservatório está sujeito mediante os valores obtidos nos ensaios mecânicos, sendo apresentados na tabela 11.

Tabela 11- Dados de Tensões para Validação de Dimensionamento

	Tensão de Instalada na direção das fibras pela norma EN13293:2005 (MPa)	Tensão de Rotura Testada na direção das fibras (MPa)	Tensão Admissível (MPa)
Matriz Termoplástica	734.62	690.52	158.52
Matriz Termoendurecível		1619.10	375.14

Após análise da tabela 11 é possível observar que a tensão de rotura testada no compósito com matriz termoplástica é inferior à tensão instalada o que indica que o material não aguenta a pressão e rebentará. Quanto ao material compósito com matriz termoendurecível, a tensão de rotura é 2.15 vezes superior à tensão instala, indicando que o reservatório pode não rebentar, mas com algum risco uma vez que é necessário baixar o coeficiente de segurança para metade. É então necessário repensar no material a utilizar.

Tabela 12- Dados de Deformação para Validação de Dimensionamento

	Deformação Máxima na direção das fibras pela norma EN13293:2005 (%)	Deformação calculada na direção das fibras pela norma EN13293:2005 (%)	Deformação Testada calculada na direção das fibras (%)
Enrolamento Helicoidal	0.91	0.076	0.081
Enrolamento Circunferencial		0.140	0.148

Analisando a tabela 12 é possível observar que a deformação calculada no começo do projeto é inferior à deformação calculada após a realização dos ensaios mecânicos, mas ambos os valores são bastante inferiores à deformação máxima calculada. Na tabela 13 estão presentes as deformações de rotura dos materiais para efeitos de conclusão dos materiais a utilizar.

Tabela 13- Dados de Deformação para Validação de Materiais

Matriz	Orientação das Fibras (°)	Deformação Máxima pela norma EN13293:2005 (%)	Deformação de Rotura (%)
Termoplástica	0	0.91	1.33
	90		1.13
Termoendurecível	0		1.96
	90		1.1

Após análise da tabela 13 é possível observar que ambos os materiais ultrapassam a deformação máxima permitida, sendo necessário repensar num reforço do material.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos, neste trabalho de dissertação efetuou-se o desenvolvimento e fabrico dum reservatório em material compósito para armazenamento de hidrogénio sob pressão. Começou por se efetuar um levantamento de todas as normas necessárias para dimensionamento do estratificado, condicionamento do hidrogénio e realização de ensaios, entre outras. Posteriormente, decidiu-se estudar a hipótese de realização do reservatório em compósito utilizando, tanto uma resina termoendurecível como um termoplástico como matriz.

Tendo-se selecionado o enrolamento filamentar como método produtivo a utilizar na construção do reservatório, verificou-se a necessidade de ele possuir um *liner* que para além de resistir à corrosão do hidrogénio impedisse que a pequeníssima molécula do gás se pudesse escapar do seu interior por permeabilidade. De entre os materiais que melhor podiam garantir tais requisitos, selecionou-se o alumínio para *liner* já que este material também seria adequado a ser, simultaneamente, usado como mandril no enrolamento filamentar.

Após aquisição de *liners* em alumínio com capacidade de cerca de $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ (1 L), submeteram-se provetes do mesmo material a ensaios de tração que permitiram determinar que o material apresentava uma tensão admissível de 208.71 MPa.

No que diz respeito ao material compósito, decidiu-se usar na parte estrutural dos reservatórios de matriz termoendurecível a resina epóxido, Biresin[®]Cr83 da Sika, reforçada com fibras unidirecionais de carbono, T700S[®] da Torayca. Por outro lado, os reservatórios de matriz termoplástico teriam a sua parte estrutural construída numa fita (tape) prepreg de matriz termoplástica em Poliamida 12 (PA12) reforçada com fibras unidirecionais de carbono fornecida pela Suprem[™], com referência T62% C10051/PA10033 0.14 x 5.

Provetes com fibras unidirecionais de ambos os compósitos (de matriz termoendurecível e termoplástica) foram submetidos a ensaios de tração e de compressão na direção das fibras e transversalmente a estas. Constatou-se que o compósito de matriz termoendurecível apresentava melhores propriedades mecânicas, tanto em tração como em compressão, do que o seu congénere de matriz termoplástica. Enquanto que compósito em epóxido reforçado com fibras de carbono apresentou valores de tensão de rotura na direção das fibras e transversalmente a elas, respetivamente, de 1619.10 MPa e de 22.78 MPa, para as mesmas direções e também em tração o compósito de PA12 reforçado com fibras de carbono apresentou valores, respetivamente, de 690.52 MPa e 8.16 MPa. Do mesmo modo, nos ensaios

em compressão foram obtidos valores de resistência mecânica na direção das fibras e transversalmente a estas nos compósitos de matriz termoendurecível, respetivamente, de 248,4 MPa e 100,8 MPa, enquanto que nas mesmas direções dos de matriz termoplástica se obtiveram apenas valores, respetivamente, de 107,9 MPa e 52,4MPa.

Apesar das vantagens resultantes da utilização da matriz termoplástica em termos de facilidade de fabrico e sustentabilidade, nomeadamente devido às possibilidades de reutilização, face aos resultados obtidos poder-se-á, no entanto, concluir que a utilização do compósito com matriz termoendurecível no fabrico do reservatório deverá atualmente ainda ser considerada mais vantajosa em termos de peso e custo.

Neste estudo, foi ainda possível fabricar reservatórios-protótipo, tanto em matriz termoendurecível como termoplástica, destinados a serem sujeitos a ensaios de rebentamento para validação, que não foi infelizmente possível realizar dentro do período temporal destinado à conclusão da presente tese. Pensa-se que estes testes possam vir a ser realizados muito proximamente.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para que se possam aprofundar melhor alguns dos resultados obtidos nesta dissertação, sugere-se a realização dos seguintes trabalhos em estudos futuros:

- Realizar os ensaios de rebentamento dos reservatórios-protótipo que não foram possíveis efetuar durante o período desta tese, de modo a validar a sua resistência à pressão.
- Repetição dos trabalhos de enrolamento de placas com o processo totalmente otimizado de maneira a obter provetes mais uniformizados;
- Estudo mais profundo da influência das condições de processamento, características da resina e fibras de reforço usados no enrolamento filamentar no teor de reforço obtido nos laminados de revestimento;
- Comparar os resultados, nomeadamente mecânicos, de provetes preparados de forma mais adequada e também sujeitar a ensaio de impacto o laminado final;
- Aplicar pacotes mais avançados do software CADWIND® que permitam fabricar produtos em compósito com formas mais complexas e que garantam um maior rigor na deposição das trajetórias das fibras de reforço;

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. E. R. Lobo, “Estudo e desenvolvimento do comando e controlo para um equipamento industrial automatizado de enrolamento filamental,” Universidade do Minho, 2012.
- [2] G. F. Pereira, “Monitorização de reservatórios produzidos por enrolamento filamental usando sensores ópticos embebidos no compósito,” 2013.
- [3] Piep, “PIEP- A instituição.” [Online]. Available: <http://www.piep.pt/pt/conteudos/conteudo/id/67>. visitado dia 07/03/2020
- [4] Piep, “PIEP- Missão e Visão.” [Online]. Available: <http://www.piep.pt/pt/conteudos/conteudo/id/78>. visitado dia 07/03/2020
- [5] N. Almeida, “Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta,” pp. 1–184, 2012.
- [6] Gurit Holding AG, “Guide to Composites,” Available URL <http://www.netcomposites.com/> ..., p. 74, 2000.
- [7] D. Filipe and D. O. Cravo, “Projeto de reservatórios pressurizados fabricados com fibras de carbono através da técnica de enrolamento filamental,” 2017.
- [8] J. C. V. Pereira, “Reservatórios em material compósito para fluídos sob pressão.” 2007
- [9] T. D. Iecker, “Análise de Tensões em Vasos de Pressão através do Método de Elementos Finitos
Análise de Tensões em Vasos de Pressão através do Método de Elementos Finitos,” 2014.
- [10] L. F. F. Fernandes, “PROJETO DE RESERVATÓRIOS SOB PRESSÃO FABRICADOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS,” 2014.
- [11] T. Johnson, “Thermoplastic vs Thermoset Resins,” *About.Com*, pp. 9–11, 2014.
- [12] L. Juvandes, “Aplicações De Compósitos Frp No Reforço De Estruturas,” *Paginas.Fe.Up.Pt*, pp. 239–270, 2011.
- [13] M. Piovesan, L. L. Bertolotti, S. Altmeyer, and T. H. Vorpapel, “Fibras De Vidro: Caracterização, Disposição Final E Impactos Ambientais Gerados,” *Rev. Eletrônica em Gestão, Educ. e Tecnol. Ambient.*, vol. 10, no. 10, pp. 2112–2121, 2013.
- [14] J. D. R. Marafona, “Enrolamento Filamental: Método para obtenção da trajetória do olhal de deposição com eliminação de colisão.pdf,” FEUP, 2004.
- [15] F. Justulin, “Desenvolvimento de sistema computacional para cálculo de trajetórias no processo de filament winding,” 2008.
- [16] J. Silva, “Pré-impregnados de matriz termoplástica: fabrico e transformação por compressão a

- quente e enrolamento filamentar,” 2005.
- [17] J. Costa, “Materiais Compósitos e Técnicas de Deposição de Fibras,” 2012.
- [18] E. V. M. Valery V. Vasiliev, *Advanced Mechanics of Composite Materials*. 2007.
- [19] José António de Oliveira Simões, “Enrolamento Filamentar - Simulação Visual de trejectórias geodésicas e não-geodésicas.” 1992.
- [20] R. Augusto *et al.*, “Produção de componentes em materiais compósitos por infusão de resina,” *O Sect. Marítimo Port.* , 2008.
- [21] I. Lopes, “Estudo do Processo de Infusão a Vácuo em Materiais Compósitos - Produção de tampa de bagageira para autocarro,” *tese Mestr. - FEUP*, no. Engenharia Metalúrgica e de materiais, p. 63, 2009.
- [22] L. S. Sutherland and C. G. Soares, “O Processo de Infusão de Resina para Aplicações Marítimas (The Resin Infusion Process for Marine Applications),” no. January, 2008.

ANEXOS

**ANEXO I- FICHA TÉCNICA DA FIBRA T 62% C10051 / PA10033 0.14 x
5 DA SUPREM™**

Product number 11240
Product type Tape

Suprem™ T 62% C10051 / PA10033 0.14 x 5
single tow of impregnated uni-directional fibres

Composition
10033 PA12-2150
10051 T700SC-80E

Spool
Spool 250-E PS antrazit

Properties	Units	s : specified Value t : typical value	s : specified Value t : typical value			Standard	Document / description	Number	Date
			nom	min	max				
roving number	fibres 1 fibres 2	[pcs]	1 x 12 k						
fibres linear weight	fibres 1 fibres 2	[g/m]	0.800	0.776	0.824	IT06_TS	2.14		
fibres volume content	fibres 1 fibres 2	[%vol]	62.00	- 3.00	+ 3.00	IT06_TS	2.18		
fibres weight content	fibres 1 fibres 2	[%wt]	74.30	71.83	76.89	IT06_TS	2.16		
polymer linear weight		[g/m]	0.277	0.243	0.314	IT06_TS	2.14		
tape width		[mm]	5.00	- 0.10	+ 0.00	IT06_TS	2.12		
width sample interval		[m]							
tape thickness		[mm]	0.14	0.14	0.15	IT06_TS	2.11		
tape linear weight		[g/m]	1.077	1.043	1.114	IT06_TS	2.14		
tape density		[g/cm ³]	1.502	1.479	1.526	IT06_TS	2.19		
spooling		s	coiled			IT09_TC	2.4		
spool length		[m]	1'000	500	3'000	IT09_TC	3.3		
spool weight		[g]	1'077	538	3'230	IT09_TC	3.4		

History (recent modifications only)

Date	Category	Description
27.05.2019	modified spec	spool type / spool length
16.07.2018	modified spec	adjusted width
16.07.2018	duplicate record	Original record is 10932

Figura 39- Ficha Técnica da Fibra Suprem™ T 62% C10051 / PA10033 0.14 x 5

ANEXO II- FICHA TÉCNICA DA FIBRA T700S DA TORAYCA

TORAYCA® T700S DATA SHEET

Highest strength, standard modulus fiber available with excellent processing characteristics for filament winding and prepreg. This never twisted fiber is used in high tensile applications like pressure vessels, recreational, and industrial.

FIBER PROPERTIES

		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		711 ksi	4,900 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		2.1 %	2.1 %	TY-030B-01
Density		0.065 lbs/in ³	1.80 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 µm	
Yield	6K	3,724 ft/lbs	400 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
	24K	903 ft/lbs	1,650 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	50C		1.0 %	TY-030B-05
& Amount	60E		0.3 %	TY-030B-05
	FOE		0.7 %	TY-030B-05
	Twist	Never twisted		

FUNCTIONAL PROPERTIES

CTE	-0.38 $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Specific Heat	0.18 Cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity	0.0224 Cal/cm $\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$
Electric Resistivity	$1.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

COMPOSITE PROPERTIES *

Tensile Strength	370 ksi	2,550 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.7 %	1.7 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	245 ksi	1,670 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	17.5 Msi	120 GPa	ASTM D-790
ILSS	13 ksi	9 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	10.0 ksi	69 MPa	ASTM D-3039

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

TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

Figura 40- Ficha Técnica Fibra T700S da Torayca

ANEXO III- FICHA TÉCNICA DA RESINA BIRESIN CR83 DA SIKA

Biresin® CR83 Composite resin system

Product Description

Biresin® CR83 is an epoxy resin system with extremely low viscosity designed specifically for the infusion process for the production of high performance fibre reinforced composites parts and moulds. The system has thermal properties up to 80°C. Biresin® CR83 epoxy resin has a low tendency to crystallise.

Application Areas

Biresin® CR83 is especially suited to the infusion and injection processes due to its low viscosity range. It can be used in the marine and general industrial composite areas. Due to its good wetting properties it is particularly suited for use with carbon fibre reinforcement.

Features / Advantages

- 3 hardeners (B) give a wide range of processing times
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Fast infusion and good wet-out of fabrics and non-wovens due to low viscosity and good wetting characteristics even at low temperatures
- All systems DNV GL approved, Certificate No. TAK000019Z
- Glass transition temperatures up to 80°C dependent on curing conditions
- Biresin® CR83 resin (A) has a low tendency to crystallise

Physical Data		Resin (A)		Hardener (B)	
Individual Components		Biresin® CR83	Biresin® CH83-2	Biresin® CH83-6	Biresin® CH83-10
Mixing ratio, parts by	weight	100	30		
Mixing ratio, parts by	volume	100	36		
Colour		translucent	colourless to yellowish		
Viscosity, 25°C	mPa.s	~610	<10	<10	< 10
Density, 25°C	g/ml	1.14	0.95	0.94	0.95
		Mixture			
Potlife, 100 g / RT, approx. values		min	60	180	300
Mixed viscosity, 25°C, approx. values		mPa.s	155	170	155

Processing

- The material and processing temperatures should be in the range 18 - 35°C.
- The mixing ratio must be followed accurately to obtain best results. Deviating from the correct mix ratio will lead to lower performance.
- The final mechanical and thermal values are dependent on the applied postcuring cycles.
- It is recommended to clean brushes or tools immediately after use with Sika Reinigungsmittel 5.
- Additional information is available in "Processing Instructions for Composite Resins".

Figura 41- Ficha Técnica da Resina Biresin CR83 da Sika

**ANEXO IV- FICHA TÉCNICA DO DESMOLDANTE MIKON W-64+ DA MUNCH
CHEMIE INTERNATIONAL**

Release Agent Mikon® W-64+

Description:

Release Agent Mikon® W-64+ is a water-based semi-permanent release agent enabling a straightforward processing of thermoset resins. Due to its well-balanced composition, Release Agent Mikon® W-64+ provides superior release properties and excellent adhesion to the mould's surface. Downstream processing, such as gluing or varnishing, is possible without the need for any further treatments since Release Agent Mikon® W-64+ does not transfer to the moulded parts. The product provides a high gloss surface finish. When Release Agent Mikon® W-64+ is used in production there is no need for any initial mould sealing. The release film is temperature stable up to 450°C (842°F).

Application Fields:

Release Agent Mikon® W-64+ is universally applicable on porous surfaces and releases all commonly used thermoset resins, such as polyester, epoxy and phenolic resins and PUR gelcoats. Especially if processing standards demand a high slip, Release Agent Mikon® W-64+ will be the perfect match.

Application:

Cleaning:

It is recommended to thoroughly clean and dry mould surfaces prior to the application of Release Agent Mikon® W-64+. Our Cleaner Mikon® R-52 will be sufficient. However, Release Agent Mikon® W-64+ is also suitable for touch-up coatings.

Base coat:

Green or freshly repaired moulds can directly be coated with Release Agent Mikon® W-64+. Any initial mould sealing is not required.

Apply Release Agent Mikon® W-64+ by wiping with a soaked, but not dripping, clean lint-free cloth. Commence by applying the release agent to a small surface area of approx. 1 m². After about 30-60 s, when the film is still moist, use a second dry cloth to absorb excess of Release Agent Mikon® W-64+ and proceed by wiping in circular motion until a clear and dry film emerges. In the case of occurring streaks or smears reduce the time before wiping off excess of release agent. We recommend beginning to wipe along the mould's outer border, approaching the inside. This procedure is repeated with the adjacent areas until all parts of the mould are evenly coated. In order to obtain a smooth and homogenous base coat, 2-3 layers of Release Agent Mikon® W-64+ have to be applied. Allow each layer to cure for about 10 min. After the final layer has been applied, Release Agent Mikon® W-64+ should be allowed to cure for about 15-30 min at 60 °C.

Mould touch-up:

Good conditioning of the mould will be achieved if the release agent film is refreshed 2-4 demoulding cycles after the initial base coating process. Since the release film wears during production touch-up coatings should be applied frequently. Release Agent Mikon® W-64+ has been designed to incorporate and chemically bond touch-up layers of itself. Hence, curing time after touch-up reduces to approx. 15 min at room temperature. The required frequency of touch-ups for sufficient release depends on mould configuration and abrasion parameters and must be determined in individual on-site trials. We highly recommend to apply the touch-up prior to an observed decrease in release efficiency. This will significantly reduce mould fouling due to build-ups and lead to extended mould service lives while ensuring a constant high quality of the moulded parts.

Release Agent Mikon® W-64+ can also be touched-up partially, refreshing the release agent film only on those mould areas experiencing higher wear. Touch-up of the complete mould is preferred, though.

Regulatory information on safety and transportation is provided in the material safety data sheet.

Technical product information and data is based on the best information available and does not constitute or imply a warranty or patent infringement of any kind. The user is responsible for testing product suitability prior to product use in production. The data mentioned above do not constitute viable parts of a specification, for which further, separate agreements are necessary.

Figura 42- Ficha Técnica do Desmoldante Mikon W-64+ da Munch Chemie International

**ANEXO V- NORMA EN13923:2005 “FILAMENT WOUND FRP PRESSURE
VESSELS”**

English Version

Filament-wound FRP pressure vessels - Materials, design,
manufacturing and testing

Réceptifs sous pression en PRV par enroulement
filamentaire - Matériaux, conception, fabrication et essais

Fadengewickelte Druckbehälter aus textilaserverstärkten
Kunststoffen - Werkstoffe, Konstruktion, Herstellung und
Prüfung

This European Standard was approved by CEN on 22 September 2005.

CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the Central Secretariat or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the Central Secretariat has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom.



EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG

Management Centre: rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels

**ANEXO VI- NORMA ASTM D3039 D3039M “TEST METHOD FOR TENSILE
PROPERTIES”**



Designation: D 3039/D 3039M – 00^{e1}

Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D 3039/D 3039M; 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.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

^{e1} Note—Eq 5 was revised editorially in December 2002.

1. Scope

1.1 This test method determines the in-plane tensile properties of polymer matrix composite materials reinforced by high-modulus fibers. The composite material forms are limited to continuous fiber or discontinuous fiber-reinforced composites in which the laminate is balanced and symmetric with respect to the test direction.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the inch-pound units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.3 *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 792 Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement²
- D 883 Terminology Relating to Plastics²
- D 2584 Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins³
- D 2734 Test Method for Void Content of Reinforced Plastics³
- D 3171 Test Methods for Constituent Content of Composites Materials⁴
- D 3878 Terminology for Composite Materials⁴
- D 5229/D 5229M Test Method for Moisture Absorption

Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials⁴

- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁵
- E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing⁵
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers⁵
- E 111 Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus⁵
- E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate a Measure of Quality for a Lot or Process⁶
- E 132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature⁵
- E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods⁶
- E 251 Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages⁵
- E 456 Terminology Relating to Quality and Statistics⁶
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁶
- E 1012 Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading⁵
- E 1237 Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages⁵

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology D 3878 defines terms relating to high-modulus fibers and their composites. Terminology D 883 defines terms relating to plastics. Terminology E 6 defines terms relating to mechanical testing. Terminology E 456 and Practice E 177 define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology D 3878 shall have precedence over the other standards.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

NOTE—If the term represents a physical quantity, its analytical dimensions are stated immediately following the term (or letter symbol) in fundamental dimension form, using the following ASTM standard symbology for fundamental

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D30 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D30.04 on Lamina and Laminate Test Methods.

Current edition approved April 10, 2000. Published July 2000. Originally published as D 3039 – 71T. Last previous edition D 3039 – 95a.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.02.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03.

⁵ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

⁶ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

**ANEXO VII- NORMA ASTM D695-02A “STANDARD TEST METHOD FOR
COMPRESSIVE PROPERTIES OF RIGID PLASTICS”**



Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D 695; 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 reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of the mechanical properties of unreinforced and reinforced rigid plastics, including high-modulus composites, when loaded in compression at relatively low uniform rates of straining or loading. Test specimens of standard shape are employed.

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

NOTE 1—For compressive properties of resin-matrix composites reinforced with oriented continuous, discontinuous, or cross-ply reinforcements, tests may be made in accordance with Test Method D 3410.

1.3 *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. A specific precautionary statement is given in Note 11.*

NOTE 2—This test method is technically equivalent to ISO 604.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing²

D 638 Test Method for Tensile Properties of Plastics²

D 883 Terminology Relating to Plastics²

D 3410 Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading³

D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials⁴

D 4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials⁴

D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens⁵

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁶

E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers⁶

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁷

3. Terminology

3.1 General—The definitions of plastics used in this test method are in accordance with Terminology D 883 unless otherwise indicated.

3.2 Definitions:

3.2.1 *compressive deformation*—the decrease in length produced in the gage length of the test specimen by a compressive load. It is expressed in units of length.

3.2.2 *compressive strain*—the ratio of compressive deformation to the gage length of the test specimen, that is, the change in length per unit of original length along the longitudinal axis. It is expressed as a dimensionless ratio.

3.2.3 *compressive strength*—the maximum compressive stress (nominal) carried by a test specimen during a compression test. It may or may not be the compressive stress (nominal) carried by the specimen at the moment of rupture.

3.2.4 *compressive strength at failure (nominal)*—the compressive stress (nominal) sustained at the moment of failure of the test specimen if shattering occurs.

3.2.5 *compressive stress (nominal)*—the compressive load per unit area of minimum original cross section within the gage boundaries, carried by the test specimen at any given moment. It is expressed in force per unit area.

3.2.5.1 *Discussion*—The expression of compressive properties in terms of the minimum original cross section is almost universally used. Under some circumstances the compressive properties have been expressed per unit of prevailing cross section. These properties are called “true” compressive properties.

3.2.6 *compressive stress-strain diagram*—a diagram in which values of compressive stress are plotted as ordinates against corresponding values of compressive strain as abscissas.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties. Current edition approved August 10, 2002. Published October 2002. Originally published as D 695 – 42 T. Last previous edition D 695 – 02.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.02.

⁵ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.03.

⁶ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

⁷ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

Figura 45- Norma para Realização de Ensaios de Compressão

**ANEXO VIII- NORMA ISO 14126:1996 “FIBRE-REINFORCED PLASTIC
COMPOSITES- DETERMINATION OF COMPRESSIVE
PROPERTIES IN THE IN-PLANE DIRECTION”**



INTERNATIONAL STANDARD ISO 14126:1999
TECHNICAL CORRIGENDUM 1

Published 2001-07-15

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION • МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ • ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION

**Fibre-reinforced plastic composites — Determination of
compressive properties in the in-plane direction**

TECHNICAL CORRIGENDUM 1

Composites plastiques renforcés de fibres — Détermination des caractéristiques en compression dans le plan
RECTIFICATIF TECHNIQUE 1

Technical Corrigendum 1 to International Standard ISO 14126:1999 was prepared by Technical Committee ISO/TC 61, *Plastics*, Subcommittee SC 13, *Composites and reinforcement fibres*.

Page 1, subclause 1.4

Replace the second paragraph by the following text:

"ISO 604 (see the bibliography) applies to bulk compounds having fibres shorter than 7,5 mm. This is generally the case with materials intended for injection moulding."

ICS 83.120

Ref. No. ISO 14126:1999/Cor.1:2001(E)

© ISO 2001 — All rights reserved

Printed in Switzerland

Figura 46- Norma para Análise das Falhas nos Ensaios de Compressão

ANEXO IX- FOLHA DE CÁLCULO PARA CÁLCULO DE ESTRATIFICADO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Reservatório de Pressão- Métodos Analíticos (NORMA EN13923:2005)													
2														
3		Inputs			Tabelas				CÁLCULO HELICOIDAL					
4		Outputs												
5									Nφ	563	N/mm			
6	Liner	PE							α	17	º			
7	Di	75	mm						th,1	0,84	mm	≤	t _h	
8	PS	30	Mpa		300	bar			nw	3				
9	TS	70	ºC						th	3,50	mm			
10	S	2												
11	A1	1	EN 13923:2005						CRITÉRIOS DE VALIDAÇÃO					
12	A2	1,1	EN 13923:2005											
13	A3	1,33333	EN 13923:2005						σ _h	175,74		≤	Xt/K	734,62 MPa
14	A4	1,1	EN 13923:2005						ε _h	0,0764		≤	ε _{máx}	0,9091 %
15	A5	1,35	EN 13923:2005											
16	K	4,356												
17	HDT	100	ºC											
18	ε _{lim}	1	%						CÁLCULO CIRCUNFERENCIAL					
19	E1	230000	MPa											
20	E2	15000	MPa						N _θ	1125	N/mm			
21	Xt	3200	MPa						α	1	º			
22	Yt	30	MPa						t _{h,1}	1,53	mm	≤	t _c	
23	Bs	37,1	mm^2						n _e	1,00				
24	b	24	mm						t _c	3,50	mm			
25	pr	1130	kg/m^3											
26	pf	1780	kg/m^3						CRITÉRIOS DE VALIDAÇÃO					
27														
28									σ _c	321,38		≤	Xt/k	734,62 MPa
29									ε _c	0,1397		≤	ε _{máx}	0,9091 %

Figura 47- Cálculo do Estratificado segundo Norma EN13923:2005

ANEXO X- FOLHA DE CÁLCULO PARA CÁLCULO DE ESTRATIFICADO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Reservatório de Pressão- Métodos Analíticos (NORMA EN13923:2005)													
2														
3		Inputs			Tabelas				CÁLCULO HELICOIDAL					
4		Outputs												
5									$N\phi$	563	N/mm			
6	Liner	PE							α	17	º			
7	Di	75	mm						$t_{h,1}$	1,65	mm	\leq	t_h	
8	PS	30	Mpa	300	bar				nw	5				
9	TS	70	ºC						th	3,50	mm			
10	S	2												
11	A1	1	EN 13923:2005						CRITÉRIOS DE VALIDAÇÃO					
12	A2	1,1	EN 13923:2005											
13	A3	1,33333	EN 13923:2005						σ_h	175,74		\leq	Xt/K	371,694 MPa
14	A4	1,1	EN 13923:2005						ϵ_h	0,0807		\leq	$\epsilon_{m\grave{a}x}$	0,9091 %
15	A5	1,35	EN 13923:2005											
16	K	4,356												
17	HDT	100	ºC											
18	ϵ_{lim}	1	%						CÁLCULO CIRCUNFERENCIAL					
19	E1	217690	MPa						$N\theta$	1125	N/mm			
20	E2	15000	MPa						α	1	º			
21	Xt	1619,1	MPa						$t_{h,1}$	3,03	mm	\leq	t_c	
22	Yt	30	MPa						n_c	2,00				
23	Bs	37,1	mm ²						t_c	3,50	mm			
24	b	24	mm											
25	ρ_r	1130	kg/m ³											
26	ρ_f	1780	kg/m ³						CRITÉRIOS DE VALIDAÇÃO					
27														
28									σ_c	321,38		\leq	Xt/k	371,694 MPa
29									ϵ_c	0,1476		\leq	$\epsilon_{m\grave{a}x}$	0,9091 %

Figura 48- Cálculo do Estratificado utilizando valores obtidos em ensaios mecânicos segundo Norma EN13923:2005

ANEXO XI- PROVETES DE TRAÇÃO APÓS ENSAIOS



Figura 49- Provetes TP90 com Quebras após Ensaio

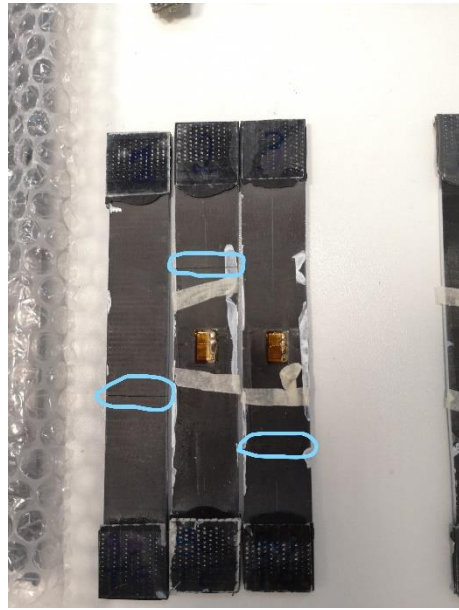


Figura 50-Provetes TE90 com Quebras após Ensaio



Figura 51- Provetes TE0 após ensaio



Figura 52- Provetes TPO após Ensaio

**ANEXO XII- MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS MECÂNICOS *SHIMADZU AGX-
50KN***

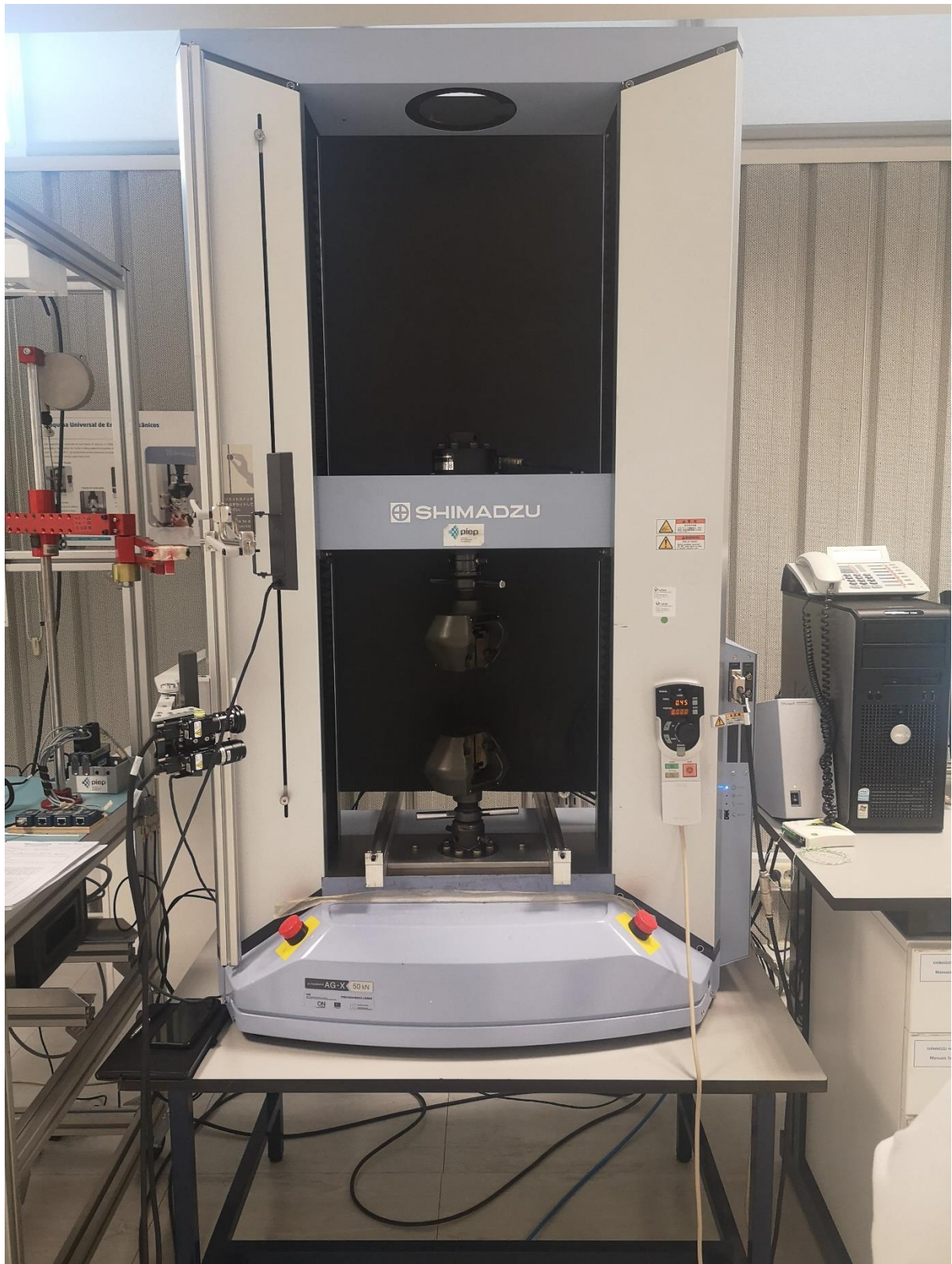


Figura 53- Máquina de Testes Universal Presente nas Instalações do PIEP