



Avaliação de condições de processamento de peças compósitas para a indústria ferroviária

FRANCISCO SIMÕES DO PAÇO

julho de 2025

Avaliação de condições de processamento de peças compósitas para a indústria ferroviária

Francisco Simões do Paço

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Materiais e Tecnologias de Fabrico**

Orientador: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Coorientador: João Miguel Eira Machado

Supervisor da empresa: Ricardo Jorge Braga da Rocha

Júri:

Presidente:

António Gonçalves Magalhães

Vogais:

Jhonny de Sá Rodrigues

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Agradecimentos

À minha família, aos meus pais, à minha irmã e ao meu irmão, por todo o apoio e ajuda que sempre me deram durante todo o meu percurso académico e em especial durante de realização desta dissertação.

Ao meu orientador Professor Raul Campilho e coorientadores Engenheiro Ricardo Rocha e Doutor João Machado por toda a sua orientação, ajuda, disponibilidade e dedicação durante todo este percurso.

Ao Engenheiro João Pedro, Professora Susana Sousa e toda a equipa da UMEC do INEGI pela disponibilidade que sempre tiveram comigo para ajudar no que fosse preciso.

Resumo

Atualmente, devido às preocupações com a ecologia e sustentabilidade procuram-se modernizar ou criar novos métodos de mobilidade na vida cotidiana. Uma das principais indústrias que permite atender estas preocupações é a ferroviária, ao que a sua modernização a nível nacional tomou novas proporções com o aumento do investimento. Esta modernização tomou por caminho a disseminação generalizada do uso de materiais compósitos nesta indústria, que atualmente é reduzido. A presente dissertação teve como objetivo principal a avaliação do fabrico de componentes para material circulante ferroviário em material compósito, através do processo de fabrico de infusão a vácuo. Esta dissertação desenvolveu-se em contexto de estágio no INEGI. De maneira a possibilitar o cumprimento do objetivo desenvolveu-se um estudo do processo de fabrico através da sua aplicação e subsequente avaliação através da caracterização mecânica e física dos materiais compósitos obtidos. Analisou-se a aplicabilidade do processo de fabrico e os seus resultados durante o procedimento experimental deste. Avaliaram-se as propriedades mecânicas através da realização de ensaios de tração, e as propriedades físicas por meio de ensaios de queima e de ensaios de micrografia. Os resultados obtidos por estes ensaios foram analisados, ao que se conclui a viabilidade do fabrico de componentes para material circulante em material compósito pelo processo de fabrico de infusão a vácuo e determina-se qual o melhor material compósito para a aplicação.

Palavras-chave: Materiais compósitos, Infusão a vácuo, VARTM, Ferrovia, Material circulante, Micrografia.

Abstract

Currently, due to concerns about ecology and sustainability, there are attempts to modernize or create new methods of mobility in everyday life. One of the main industries that can meet these concerns is the railway industry, whose modernization at a national level has taken on new proportions with the increase in investment. This modernization has led to the widespread use of composite materials in this industry, which is currently limited. The main objective of this dissertation was to evaluate the manufacturing of components for railway rolling stock in composite material, through the vacuum infusion manufacturing process. This dissertation was developed in the context of an internship at INEGI. To achieve the objective, a study of the manufacturing process was developed through its application and subsequent evaluation through the mechanical and physical characterization of the composite materials obtained. The applicability of the manufacturing process and its results during the experimental procedure were analyzed. The mechanical properties were evaluated through tensile tests, and the physical properties through burning tests and micrograph tests. The results obtained by these tests were analyzed, concluding the feasibility of manufacturing components for rolling stock in composite material through the vacuum infusion manufacturing process and determining the best composite material for the application.

KEYWORDS: Composite materials, Vacuum infusion, VARTM, Railway, Rolling stock, Micrography.

Índice

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xv
Acrónimos e Símbolos.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura.....	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Indústria Ferroviária.....	5
2.1.1. Enquadramento no panorama mundial e nacional	5
2.1.2. Caracterização de sistemas de propulsão e transporte.....	6
2.1.3. Princípios construtivos.....	7
2.1.4. Materiais e sustentabilidade.....	8
2.1.5. Processos de fabrico na indústria	9
2.1.6. Ensaio e normas de fumo e fogo.....	10
2.2. Materiais Compósitos	11
2.2.1. Definição e características	11
2.2.2. Matrizes	12
2.2.3. Reforços	13
2.2.4. Processos de fabrico	14
2.2.5. Ensaio de caracterização	19
2.2.6. Planeamento de experiências.....	20
2.2.7. Previsão de resistência.....	21
2.2.8. Estado da arte	23
2.3. Infusão a Vácuo de Materiais Compósitos.....	24
2.3.1. Princípios do processo	24
2.3.2. Matrizes e reforços para infusão a vácuo	25
2.3.3. Equipamentos e acessórios para processamento	26
2.3.4. Variantes do processo.....	27
2.3.5. Parâmetros do processo	29
2.3.6. Limitações do processo.....	30
2.3.7. Comparação com outros processos.....	31
2.3.8. Estado da arte	33
3. Desenvolvimento	35

3.1. Entidade Acolhedora	35
3.2. Processo de Infusão a Vácuo Utilizado	37
3.3. Análise Crítica e Limitações Encontradas	42
3.4. Objetivos Específicos.....	43
3.5. Requisitos e Limitações	44
3.6. Metodologia Utilizada	45
3.6.1. Plano de ensaios	46
3.6.2. Métodos de ensaio	47
3.7. Procedimento Experimental	47
3.7.1. Fabrico das placas	47
3.7.2. Fabrico dos Provetes.....	54
3.7.3. Ensaio s	57
3.7.3.1. Ensaio s de tração.....	57
3.7.3.2. Ensaio s de micrografia.....	61
3.7.3.3. Ensaio s de queima	68
3.8. Resultados e Análise.....	70
3.8.1. Ensaio s de tração	70
3.8.2. Ensaio s de micrografia	79
3.8.3. Ensaio s de queima	81
3.9. Discussão dos Resultados.....	85
4. Conclusão	93
4.1. Conclusões Finais	93
4.2. Limitações e Trabalhos Futuros	95
Referências.....	97
Declaração de Integridade	105
Anexo A	107
Glossário.....	123

Lista de Figuras

Figura 1 - Locomotiva elétrica [9]	6
Figura 2 - Automotora elétrica [12]	7
Figura 3 - Representação esquemática: a-) construção diferencial e b-) construção integral [7]	7
Figura 4-Representação esquemática da construção híbrida [7]	8
Figura 5 - Tipologias dos reforços fibrosos: a) Roving [22], b) Manta [23], c) Tecido entrelaçado [24], d) Tecido quase unidirecional [25], e) Tecido híbrido [26], f) Malha [27], g) Tecido 3D [28], h) Entrançado [29], i) Pré-formas [30].....	14
Figura 6 - Formatos possíveis das partículas utilizadas como reforço [32]	14
Figura 7 - Representação esquemática da moldação manual [33].....	15
Figura 8 - Representação esquemática de moldação por projeção [18]	15
Figura 9 - Representação esquemática da infusão a vácuo [34]	16
Figura 10 - Representação esquemática da moldação em autoclave [35]	16
Figura 11 - Representação esquemática da moldação por compressão [36].....	16
Figura 12 - Representação esquemática da moldação por injeção [36].....	17
Figura 13 - Representação esquemática da moldação por transferência de resina [36]	17
Figura 14 - Representação esquemática da pultrusão [36]	17
Figura 15 - Representação esquemática do enrolamento filamentar [36].....	18
Figura 16 - Representação esquemática da moldação por centrifugação [18]	18
Figura 17 a) - SMC [37], b) BMC [37] e c) Pré-impregnado de fibra de carbono [38].....	19
Figura 18 - Exemplo de resultado obtido na abordagem RSM [41].....	21
Figura 19 - Representação esquemática do processo de infusão a vácuo [34]	24
Figura 20 - Processo de infusão a vácuo: a) 1º passo, b) 2º passo, c) 4º passo e d) 6º passo ...	25
Figura 21 - a) Bomba de vácuo [58] , b) Armadilha de resina [59] e c) Molde [60]	26
Figura 22 - a) Saco de vácuo [61], b) Fita vedante [62], c) <i>Peelply</i> [63], d) <i>Flow mesh</i> [64], e) Espiral [65], f) Tubo de vácuo [66], g) Alicates para fecho do tubo [67] e h) Conector para espiral e tubo [68].....	27
Figura 23 - Fração volúmica das fibras por processo [46].....	28
Figura 24 - Diagrama de causa e efeito dos parâmetros do processo e resultado [51]	29
Figura 25- Organograma do INEGI [77].....	35
Figura 26- Logótipo do consórcio do projeto [79]	36
Figura 27 - Integrantes do projeto PRR [79]	36
Figura 28- a) Saco de vácuo de 800 x 800 mm ² e b) saco de vácuo de 600 x 600 mm ²	38
Figura 29 - a) <i>Peelply</i> e <i>flow mesh</i> separados e b) <i>peelply</i> e <i>flow mesh</i> integrados	38
Figura 30 - a) Resina H, b) Resina L, c) Resina M e d) Resina B	39
Figura 31 - Tecido utilizado como reforço	40
Figura 32 - a) Saco de vácuo [85], b) <i>peelply</i> [86], c) <i>flow mesh</i> [87] e d) <i>peelply</i> e <i>flow mesh</i> integrados [88].....	41
Figura 33 a) Flashbreaker 1 [89] e b) Airseal 2 [90].	41
Figura 34 – a) Conector em T, b) espiral, c) tubo pneumático e d) mangueira de vácuo.....	42
Figura 35 - Tesoura elétrica.....	48

Figura 36 - Mesa com a área delimitada e preparada	49
Figura 37 - a) Loctite 770- NC e b) Loctite PMC	49
Figura 38 - a) Armadilha de resina e b) bomba de vácuo	50
Figura 39 - Tecidos técnicos posicionados	50
Figura 40 - Pesagem dos componentes	51
Figura 41 - a) Catalisador, b) inibidor e c) acelerador	52
Figura 42 - Injeção da resina	52
Figura 43 - Corte da entrada e da saída de resina	53
Figura 44 - Representação esquemática dos provetes retirados da placa	54
Figura 45 - Provetes de ensaio de micrografia e tração agrupados.....	55
Figura 46 - Micrómetro utilizado na medição dos provetes.....	56
Figura 47 - Temperatura e humidade do laboratório	58
Figura 48- a) Provetes pintados e b) provete em detalhe	59
Figura 49- a) Montagem da luz e câmara do DIC e b) imagem obtida	59
Figura 50 - Provetes após o ensaio de tração	60
Figura 51- a) LabPoli-21 com lixa e pano de polimento montados e b) polimento dos provetes com abrasivo de 1 μm	62
Figura 52- Imagens de teste obtidas no estereomicroscópio com câmara	63
Figura 53- Imagens de teste obtidas no estereomicroscópio com câmara fotográfica digital..	63
Figura 54- Imagem de teste obtida no microscópio	64
Figura 55 - Imagens de teste obtidas no microscópio invertido.....	64
Figura 56 - Exemplo de imagens recortadas para utilização no algoritmo, magnificação 5 x/0,15	65
Figura 57 - Algoritmo pronto a analisar	66
Figura 58 - a) Imagem introduzida; b) imagem binária com artefactos e c) imagem binária limpa	67
Figura 59 - a) Cadinho e b) forno de mufla	69
Figura 60 - curvas σ - ϵ dos provetes LAC	71
Figura 61 - curvas σ - ϵ dos provetes LBC	72
Figura 62 - curvas σ - ϵ dos provetes MAC.....	73
Figura 63 - curvas σ - ϵ dos provetes MBC.....	74
Figura 64 - curvas σ - ϵ dos provetes HAC	75
Figura 65 - curvas σ - ϵ dos provetes HBC.....	76
Figura 66 - curvas σ - ϵ dos provetes BAC.....	77
Figura 67 - curvas σ - ϵ dos provetes BBC.....	78
Figura 68 - a) Imagem sem vazios, provete LB5; b) imagem com alguns vazios, provete BB3; c) imagem com muitos vazios, provete BA1 e d) imagem com vazios de grandes dimensões, provetes LB6	80
Figura 69 - Relação entre o E e o TV	86
Figura 70 - Gráfico de relação entre σ_m e o TV	87
Figura 71 - Relação entre o E e a FVF.....	87
Figura 72 - Relação entre a σ_m e a FVF.....	88
Figura 73 - Gráficos de caixa de bigodes da FVF em função do método de vácuo.....	88

Figura 74 - Gráficos de caixa de bigodes do TV em função do método de vácuo utilizado	89
Figura 75 - Variação da FVF em função da existência de fuga no saco de vácuo	89
Figura 76 - Gráfico de caixa de bigodes do TV em função da existência de fugas no saco de vácuo	90
Figura 77 - Gráfico de caixas de bigodes da FVF por tamanho de saco	90
Figura 78 - Gráfico de caixas de bigodes da FVF por existência de fuga.....	91
Figura 79 - Relação entre TV e método de vácuo sem valor extremo	92

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Materiais utilizados na indústria e a sua reciclabilidade [11-14]	9
Tabela 2 - Materiais e os processos utilizados na indústria ferroviária [7].....	9
Tabela 3 - Tipo de interface e o seu processo de ligação [7]	10
Tabela 4 - Requisito R17 como descrito na norma EN 45545-2 [17]	11
Tabela 5 - Propriedades das fibras mais utilizadas [31]	14
Tabela 6 - Ensaio de caracterização [18, 30]	20
Tabela 7- Estado da arte dos materiais compósitos	23
Tabela 8- Parâmetros mais importantes do processo e a sua influência [69]	30
Tabela 9- Estado da arte sobre a infusão a vácuo	33
Tabela 10 - Codificação dos materiais utilizados	39
Tabela 11 - Código da placa de acordo com o método VARTM.....	40
Tabela 12- Valores de referência de propriedades mecânicas e físicas [80, 81, 82, 83]	40
Tabela 13 - Normas aplicáveis aos ensaios	47
Tabela 14 - Componentes em percentagem de peso da resina	51
Tabela 15 - Massa das placas	55
Tabela 16 - Identificação e quantidade de provetes por placa por ensaio.....	55
Tabela 17 - Largura dos provetes C.....	56
Tabela 18 - Espessura dos provetes C.....	57
Tabela 19 - Espessura dos provetes B.....	57
Tabela 20 - Valores utilizados nos parâmetros	67
Tabela 21 - Valores dos parâmetros nas imagens binárias.....	67
Tabela 22 - Valores das constantes dos provetes	68
Tabela 23 - Resultados da placa LA	71
Tabela 24 - Resultados da placa LB	72
Tabela 25 - Resultados da placa MA	73
Tabela 26 - Resultados da placa MB	74
Tabela 27 - Resultados da placa HA	75
Tabela 28 - Resultados da placa HB	76
Tabela 29 - Resultados da placa BA	77
Tabela 30 - Resultados da placa BB.....	78
Tabela 31 - Resultados obtidos na análise de dados	79
Tabela 32 - Resultados do ensaio de micrografia	80
Tabela 33 - FVF de fibras pelos provetes	81
Tabela 34 - Resultados dos provetes LAA	82
Tabela 35 – Resultados dos provetes LBA	82
Tabela 36 - Resultados dos provetes HAA	83
Tabela 37 - Resultados dos provetes HBA	83
Tabela 38 - Resultados dos provetes MAA	83
Tabela 39 - Resultados dos valores MBA	84
Tabela 40 - Resultados dos provetes BAA.....	84

Tabela 41 - Resultados dos provetes BBA.....	85
Tabela 42 - Propriedades mais importantes e os respetivos valores	86
Tabela 43 - Objetivos e o seu cumprimento	93

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

3D	Tridimensional
ACPVI	<i>Automatically Controlled Pressure Vacuum Infusion</i>
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BMC	<i>Bulk Moulding Compound</i>
CAPRI	<i>Controlled atmospheric pressure resin infusion</i>
CP	Comboios de Portugal
CV	Coeficiente de Variação
DBVI	<i>Double bag vacuum infusion</i>
DCPD	Diciclopentadieno
DoE	<i>Design of Experiments</i>
EN	<i>European Standard</i>
FVF	Fração Volúmica de Fibras
MEKP	<i>Methyl ethyl ketone peroxide</i>
pDCPD	PoliDiciclopentadieno
PEEK	Poliéter-éter-cetona
PI	<i>Pulsed Infusion</i>
PRR	Plano de Recuperação e Resiliência
RFN	Rede Ferroviária Nacional
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
SCRIMP	<i>Seeman's composite resin infusion process</i>
SMC	<i>Sheet Moulding Compound</i>
TV	Teor de Vazios
VAP	<i>Vacuum Assisted Process</i>

Lista de Símbolos

A	Extensão após rotura	%
d	Diâmetro	μm
E	Módulo de elasticidade	GPa

F	Força	Newton
H	Espessura	mm
m	Média	-
s	Desvio Padrão	-
T_g	Temperatura de transição vítrea	°C
W	Largura	mm
γ_{12}	Deformação ao corte	Adimensional
γ_{u12}	Deformação de rotura ao corte	Adimensional
Δ	Variação	-
ϵ	Extensão	Adimensional
ϵ_l	Extensão longitudinal	Adimensional
ϵ_t	Extensão transversal	Adimensional
ν	Coefficiente de Poisson	Adimensional
ρ	Massa volúmica	kg/m ³
ρ_f	Massa volúmica da fibra	kg/m ³
σ	Tensão	MPa
σ_m	Tensão de Rotura	MPa
σ_r	Tensão de cedência	MPa
σ_{uc1}	Tensão de rotura longitudinal à compressão	MPa
σ_{uc2}	Tensão de rotura transversal à compressão	MPa
σ_{ut1}	Tensão de rotura longitudinal à tração	MPa
σ_{ut2}	Tensão de rotura transversal à tração	MPa
τ_{12}	Tensão ao corte	MPa
τ_{u12}	Tensão de rotura ao corte	MPa

1. Introdução

1.1. Contextualização

Os materiais compósitos resultam da combinação de dois ou mais materiais, cujas características são distintas, com o intuito de melhorar os atributos dos materiais combinados. Estes materiais representam assim um caso de particular importância na área dos materiais de engenharia não tradicionais. O exemplo mais comum e conhecido são os compósitos fibrosos, isto é, que resultam da disposição de fibras, que se designam por reforço, num material polimérico, que se designa por matriz, com a finalidade de uma ligação entre estes, o que leva à formação de um novo compósito. Estes materiais possuem características muito interessantes, nomeadamente elevada rigidez específica, alta resistência à fadiga e à corrosão, baixa massa volúmica, facilidade em produzir componentes de geometria complexa, elevada estabilidade dimensional e elevada capacidade de absorção de energia.

Os processos de fabrico mais utilizados para fabricar as peças em materiais compósitos são a moldação manual e moldação por projeção. No entanto, a infusão a vácuo proporciona melhores propriedades mecânicas da peça comparativamente aos outros processos de fabrico de molde aberto. Devido à compactação das fibras, a fração volúmica de fibras é superior e a quantidade de vazios reduzida ou quase nula, permitindo o fabrico de peças de qualquer dimensão e geometrias complexas, apresentando ainda características mecânicas superiores às obtidas com os processos utilizados atualmente.

Nos últimos anos a indústria ferroviária tem vindo a aumentar o seu consumo de materiais compósitos, aproveitando os benefícios proporcionados pelos mesmos. No entanto, tipicamente a estrutura é fabricada em materiais metálicos, os materiais compósitos são apenas semiestruturais e cosméticos, nomeadamente em painéis internos e externos. Com a introdução de novos processos de fabrico, como a infusão a vácuo, é possível fabricar materiais compósitos de alto desempenho para aplicações estruturais ferroviárias. Como tal, é imperativo compreender o efeito e as variáveis deste processo para fabricar componentes com as características adequadas à aplicação estrutural no material circulante.

A infusão a vácuo é um processo de fabrico de materiais compósitos que vem a ser desenvolvido há muitos anos com o intuito de criar um processo de fabrico de molde aberto com resultados análogos aos processos de molde fechado. No entanto, este processo ainda tem um grau de maturação reduzido, o que conduz à necessidade de otimização do processo para possibilitar a sua implementação em componentes estruturais na indústria, designadamente a ferroviária.

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo o estudo de um processo de fabrico nomeadamente a infusão a vácuo, tecnologicamente viável e adequado, para a produção de componentes e estruturas ferroviárias em material compósito, especificamente a máscara frontal. Para levar a cabo este objetivo na dissertação são considerados os seguintes tópicos:

- Contextualização do panorama da indústria ferroviária internacional e nacional;
- Revisão bibliográfica sobre os materiais compósitos (focada nos de matriz polimérica), sobre os processos de fabrico utilizados nos materiais compósitos e sobre o processo de infusão a vácuo;
- Identificação dos requisitos do projeto do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR);
- Fabrico dos materiais compósitos a analisar;
- Realização de ensaios de caracterização mecânica e física dos materiais compósitos;
 - Ensaios de tração;
 - Ensaios de micrografia;
 - Ensaios de queima.
- Análise e obtenção de resultados dos ensaios;
- Discussão dos resultados e análise da viabilidade do processo;
- Seleção do material compósito com melhor performance mecânica, física e de processamento e método de fabrico.

1.3. Metodologia

Este trabalho teve como metodologia na sua elaboração com os seguintes pontos:

- Análise e estudo dos requisitos associados ao projeto do PRR;
- Contextualização teórica dos requisitos, materiais e processos a serem utilizados através da revisão da literatura aplicável;
- Caracterização dos objetivos e metodologia imposta para o decorrer do procedimento experimental;
- Estudo e caracterização da implementação do processo de fabrico;
- Realização de ensaios de caracterização dos materiais compósitos obtidos;
- Descrição e revisão do procedimento experimental;
- Análise dos resultados do procedimento experimental e otimização do processo de fabrico;
- Validação dos requisitos descritos no projeto do PRR.

1.4. Estrutura

A presente dissertação tem a sua estrutura dividida em quatro capítulos diferentes: Introdução, Revisão Bibliográfica, Desenvolvimento e Conclusão. Todos os capítulos apresentam subcapítulos para uma melhor organização e desenvolvimento do tema.

No primeiro capítulo, Introdução, é feita uma introdução e contextualização do trabalho desenvolvido nos seguintes capítulos, através do primeiro subcapítulo Contextualização, do segundo subcapítulo Objetivos, do terceiro subcapítulo Metodologia e do quarto e último Estrutura.

No segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, é apresentada a informação académica e estado da arte necessários ao desenvolvimento da dissertação. Este capítulo é dividido em três subcapítulos. Cada subcapítulo aborda uma das diferentes áreas do tema do trabalho desenvolvido e contextualiza a ligação entre todos. Primeiro é feita uma apresentação sobre a indústria ferroviária, seguida da discussão sobre o uso de materiais compósitos na mesma. De seguida é descrito o tópico dos materiais compósitos nas vertentes de características e fabrico e, por fim, é apresentada uma revisão sobre o processo de fabrico que será utilizado.

No terceiro capítulo, Desenvolvimento, existem nove subcapítulos com o objetivo de organizar e apresentar o trabalho prático desenvolvido. No primeiro subcapítulo é feita a apresentação da entidade acolhedora e o âmbito do estágio. No segundo subcapítulo é descrito o processo de fabrico utilizado. No terceiro subcapítulo são apresentadas a análise crítica e as limitações encontradas neste processo. O quarto subcapítulo apresenta os objetivos específicos do trabalho desenvolvido e o quinto subcapítulo as limitações e requisitos que guiaram o trabalho desenvolvido. O sexto subcapítulo apresenta a metodologia utilizada. O sétimo subcapítulo descreve todo o procedimento experimental desenvolvido, as suas etapas, limitações e obtenção dos resultados que são expostos no subcapítulo oito e discutidos no nono e último subcapítulo deste capítulo.

No quarto e último capítulo, Conclusão, são apresentadas as conclusões sobre todo o trabalho desenvolvido, os seus principais resultados e os trabalhos futuros.

Introdução

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Indústria Ferroviária

Neste capítulo é abordada a indústria ferroviária, os materiais e processos utilizados na indústria.

2.1.1. Enquadramento no panorama mundial e nacional

O transporte ferroviário teve o seu início no século XVI nas minas da Europa, as suas carruagens eram movidas por animais ou homens. Com o advento da locomotiva a vapor no início do século XIX, o transporte ferroviário desenvolveu-se rapidamente primeiro na Europa e depois nos Estados Unidos da América e subseqüentemente pelo mundo [1]. Desde a sua origem a ferrovia é um dos pilares mundiais do transporte, seja para passageiros ou carga. Atualmente, a ferrovia proporciona vários métodos de transporte como os comboios convencionais, os de alta velocidade e os metros. Todos estes métodos representam um transporte eficaz, seguro, económico e energeticamente eficiente com baixas emissões [2].

Atualmente no mundo existem 915473 km de linhas ferroviárias, que transportam anualmente um total de 24716 milhões de passageiros e 9087 milhões de toneladas de carga [3]. A ferrovia transporta 8% de todos os passageiros e 7% da carga transportada do mundo, com o consumo de apenas 2% de toda a energia no sector dos transportes, o que corresponde a menos de 0,6 milhões de barris por dia e aproximadamente 290 TWh (TeraWatt-hora) [2]. As duas fontes de energia utilizadas são o diesel e a eletricidade, com 53% e 47% de peso como fonte de energia, respetivamente [2].

A RFN (Rede Ferroviária Nacional) tem uma extensão total de 3621,6 km, com 2527 km em utilização. Da extensão em utilização, 1791 km são eletrificados, enquanto a restante extensão depende do diesel como fonte de energia [4]. O material circulante da CP (Comboios de Portugal) consiste em 446 unidades das quais 153 são carruagens, 244 são automotoras e 49 são locomotivas [5].

No ano de 2023 a RFN foi responsável pelo transporte de 173267 milhares de passageiros [5] e 9310 milhares de toneladas de carga [6], é uma indústria que demonstra tendências de aumento na sua significância e tamanho o que justifica a expansão prevista do material circulante e extensão da linha [6].

2.1.2. Caracterização de sistemas de propulsão e transporte

O material circulante define-se como todos os veículos e material que utilizam a ferrovia como método de locomoção. Os sistemas de propulsão utilizados podem ser caracterizados como locomotivas ou automotoras, a fonte de energia destes é a eletricidade ou o diesel. Uma locomotiva (Figura 1) é o meio de transporte que permite a tração de vagões e carruagens por um caminho ferroviário, cujo único propósito é integrar a fonte motriz. A sua utilização permite o transporte de cargas elevadas durante longos percursos. Uma automotora (Figura 2) é o meio de transporte que integra motores numa carruagem de passageiros e permite a tração de carruagens integradas. Devido à integração da fonte motriz na carruagem de passageiros há um aumento do espaço utilizável do comprimento total do conjunto o que leva a uma capacidade superior de transporte de passageiros por comprimento do conjunto [7].

As locomotivas ou automotoras a diesel funcionam com um motor térmico do ciclo diesel, o movimento obtido pode ser transmitido para as rodas com uma transmissão mecânica, a qual conecta diretamente o motor com os eixos. A transmissão hidráulica utiliza uma bomba acoplada ao motor térmico para criar pressão hidráulica para os motores hidráulicos nos eixos. Outro método é a transmissão diesel-elétrica que utiliza um gerador acoplado ao motor térmico para gerar eletricidade e alimenta motores elétricos nos eixos [8].



Figura 1 - Locomotiva elétrica [9]

As locomotivas ou automotoras elétricas tem apenas motores elétricos como fonte de movimento, estes motores recebem a energia através de catenárias acima dos trilhos ou carris eletrificados [10]. Os motores podem ser de corrente alternada ou de corrente contínua. Estes têm uma eficiência energética superior e uma relação peso/potência superior comparativamente aos motores térmicos, o que torna este tipo de locomotiva e automotora recomendável em relação às que utilizam diesel. No panorama nacional, devido à extensão da RFN não ser totalmente elétrica, não é possível operar apenas estes veículos.

As carruagens e vagões são veículos sem fonte de movimento próprio, são utilizados conjuntamente com locomotivas. As locomotivas ou automotoras diesel utilizadas na RFN são diesel-elétricas ou diesel-hidráulicas [11].



Figura 2 - Automotora elétrica [12]

2.1.3. Princípios construtivos

Os requisitos do material circulante são definidos de acordo com a norma EN 12663, que define as cargas suportadas pelas diferentes categorias do material circulante em caso de funcionamento normal e em caso de acidentes [7]. A construção das carruagens e automotoras seguem os mesmos princípios, apresentando apenas diferença na gestão de espaço para cumprir os requisitos de cada aplicação. Esta construção pode ser de três tipos: diferencial, integral ou híbrida.

A construção diferencial (Figura 3 a), que foi a primeira a ser utilizada, consiste na utilização de perfis em formatos simples metálicos, principalmente aço, que formam a estrutura que suporta as cargas aplicadas à carruagem ou automotora, nesta estrutura são montadas as chapas dos painéis exteriores e os elementos da configuração. A construção integral (Figura 3 b) consiste em perfis metálicos complexos, principalmente alumínio, com capacidades estruturais e de formar os painéis exteriores da estrutura. Nesta estrutura são montados os elementos da configuração. A estrutura é significativamente mais leve e simples do que a estrutura montada por construção diferencial. Ambos os tipos de construção utilizam como processo de ligação a soldadura [7].

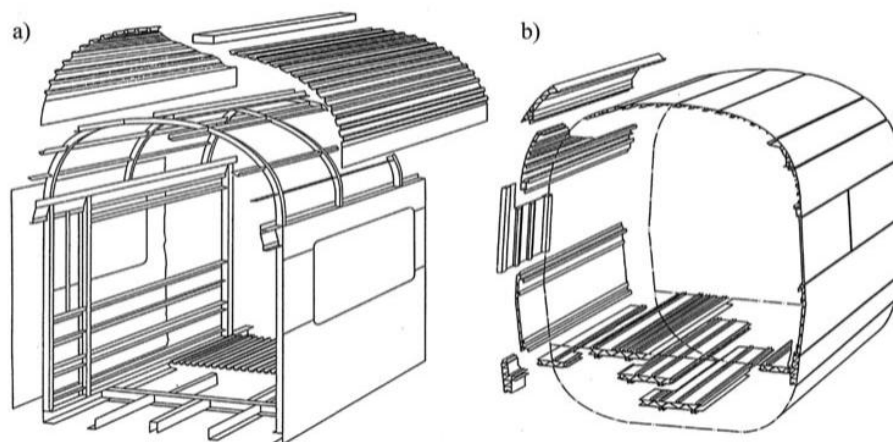


Figura 3 - Representação esquemática: a-) construção diferencial e b-) construção integral [7]

A construção híbrida envolve o uso de materiais metálicos e compósitos e diferentes tipos de ligação para a estrutura, os perfis e painéis têm características estruturais, como na construção diferencial. Os métodos de ligação utilizados são a soldadura, aparafusamento e ligação adesiva [7]. Na Figura 4, é representada esquematicamente uma construção híbrida com identificação dos diferentes materiais e processos de ligação.

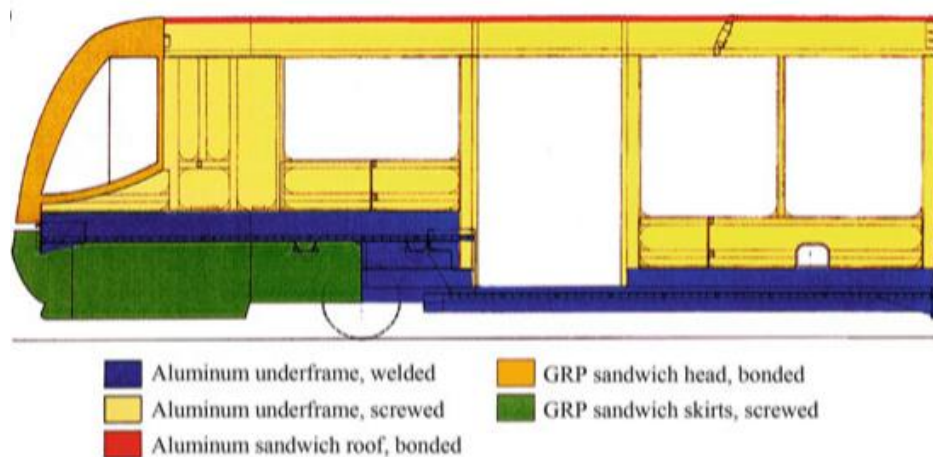


Figura 4-Representação esquemática da construção híbrida [7]

2.1.4. Materiais e sustentabilidade

Na indústria ferroviária os materiais utilizados são muito variados pois não são utilizados materiais apenas para fins estruturais, são também utilizados para equipamentos e acabamentos funcionais e estéticos [7]. Os materiais mais comumente utilizados para fins estruturais na indústria ferroviária são os metais, principalmente o aço e alumínio. No entanto também são utilizados materiais compósitos em algumas aplicações. O uso do aço e do alumínio é sustentável pois estes materiais são totalmente recicláveis [13]. Os materiais utilizados para os acabamentos funcionais e estéticos são maioritariamente polímeros. Estes são utilizados em forma de placas para os revestimentos, tecidos e espumas para os bancos e tintas, alguns destes materiais podem ser reciclados. No caso dos materiais utilizados para estes fins sejam materiais compósitos a sua reciclagem não é possível [13].

Como apresentado na secção 2.1.1, a indústria ferroviária é eficiente e sustentável no seu uso de energia, uma característica importante a manter-se nos materiais utilizados no fabrico do material circulante. A sustentabilidade é a capacidade de sustentação de um material, a sustentabilidade de um material depende da sua energia de processamento, da sua reciclabilidade, regeneração ou reutilização. Um material que apresenta capacidade de ser reciclado, regenerado ou reutilizado e que requer uma quantidade reduzida no seu processamento é um material considerado sustentável. A reciclabilidade de um material é o grau de complexidade que um material apresenta a ser reciclado. Um material pode ser reciclável, mas ter uma fraca reciclabilidade, no caso de o processo de reciclagem ser muito dispendioso ou apresentar um rendimento baixo. Na Tabela 1 é feita uma comparação entre o material utilizado e a sua reciclabilidade [11-14].

Tabela 1 - Materiais utilizados na indústria e a sua reciclabilidade [11-14]

Utilização	Material	Reciclabilidade
Estrutural	Alumínio	Boa
	Aço	Boa
	Aço Inoxidável	Boa
	Material compósito polimérico	Nula
Revestimento	Espuma polimérica	Fraca
	Tecido polimérico	Fraca
	Tinta Polimérica	Nula
	Plástico	Boa

Uma boa reciclabilidade indica que o material é fácil de ser reciclado e apresenta um bom rendimento no processo de reciclagem, uma reciclabilidade fraca significa que o material é difícil de reciclar e apresenta um baixo rendimento no processo de reciclagem. A reciclabilidade nula indica que a reciclagem é impossível.

2.1.5. Processos de fabrico na indústria

Os processos de fabrico utilizados variam de acordo com o princípio construtivo, podem ser divididos em processos para o fabrico dos componentes e de montagem dos componentes. Os processos de fabrico para os componentes podem ainda ser divididos em processos para os componentes metálicos e para os componentes de materiais compósitos. A Tabela 2 permite analisar os processos de fabrico utilizados para cada tipo de material utilizado na indústria ferroviária.

Tabela 2 - Materiais e os processos utilizados na indústria ferroviária [7]

Tipo de material	Material	Processo
Metálico	Aço	Laminagem
		Estampagem
		Quinagem
		Corte abrasivo/ Corte a laser
	Alumínio	Maquinagem
		Extrusão
		Estampagem
		Maquinagem
Compósito	Plástico reforçado com fibra de vidro/carbono	Corte abrasivo
		Laminagem
		Sandwich por autoclave
		Enrolamento filamentar

Os processos de fabrico para a montagem final dos componentes consistem em processos de ligação entres os diferentes componentes. Na Tabela 3 são apresentados os processos de

ligação para cada tipo de interface dos componentes presentes na construção do material circulante [7].

Tabela 3 - Tipo de interface e o seu processo de ligação [7]

Tipo de interface	Processo de ligação
Metal-Metal	Soldadura
	Ligação aparafusada
	Ligação adesiva
Metal-Materiais Compósitos <i>Sandwich</i>	Ligação aparafusada
	Ligação adesiva
Metal- Materiais Compósitos Laminados	Ligação aparafusada
	Ligação adesiva
Entre Materiais Compósitos	Ligação adesiva

2.1.6. Ensaios e normas de fumo e fogo

As normas de fumo e fogo têm como objetivo garantir a segurança dos ocupantes e do próprio material circulante. Estas servem para maximizar a segurança e minimizam os riscos derivados de incêndio. Estas normas focam-se em quatro pontos: a inflamabilidade, calor libertado, fumo libertado e toxicidade da combustão [17].

A norma de fumo e fogo aplicável aos materiais e produtos ferroviários é a norma EN 45545, que tem o objetivo de harmonizar e normalizar os requerimentos sobre 7 áreas diferentes para a proteção contra incêndios em veículos ferroviários. A área 2, EN 45545-2, é a norma aplicável aos materiais utilizados na construção de todos os componentes do material circulante [17].

Para avaliar se um material cumpre esta norma é necessário determinar o nível de risco a que vai estar sujeito, este nível determina os requerimentos a serem cumpridos nos ensaios. O nível de risco é determinado de acordo com a categoria de operação e a categoria de desenho. O nível de risco é avaliado em três categorias HL1 a HL3, a categoria HL1 apresenta menor nível de risco e a categoria HL3 o maior nível de risco. Em Portugal a categoria utilizada é a HL2. Esta categoria é determinada com base em fatores como a classe de material circulante e o comprimento e evacuação presente nos túneis. Para cada nível de risco os componentes devem respeitar os requisitos determinados, na norma EN 45545-2, para poderem ser certificados para operar em cada categoria, estes requisitos encontram-se compreendidos do R1 ao R26 [17]. A categoria de risco determinada condiciona a escolha dos materiais a serem utilizados na construção do material circulante. Os materiais utilizados necessitam apresentar certificações de cumprimento da norma. Esta certificação é garantida para os requisitos apresentados pelo fabricante do material [17].

No caso da construção de um componente exterior de uma automotora em material compósito polimérico, especificamente um material compósito com matriz de poliéster e reforço de fibra de vidro, todos os materiais utilizados para o componente final devem cumprir esta norma, de maneira a garantir que o produto final a cumpre. As resinas escolhidas para o fabrico devem

ser certificadas pela norma para o nível de risco ou superior ao que vai operar. As fibras são naturalmente ignífugas, pelo que a sua certificação não é necessária. O Gelcoat aplicado para acabamento da peça deve também cumprir esta norma. O componente finalizado deve igualmente ser testado de acordo com os requisitos da norma para garantir o cumprimento da norma. De acordo com a norma, um componente exterior é classificado como EX1B, pelo que este deve cumprir o requisito R17, descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Requisito R17 como descrito na norma EN 45545-2 [17]

Perigo	Método de ensaio	Parâmetros	Unidade	HL1	HL2	HL3
Propagação da chama	ISO 5658-2	CFE	kW/m ²	>13	>13	>13
Libertação de calor	ISO 5660-1 a 50kW/m ²	MARHE	kW/m ²	x	<90	<60
Libertação de fumo	ISO 5659-2 a 50kW/m ²	D _s max		x	<600	<300
Toxicidade da combustão	ISO 5659-2 a 50kW/m ²	CIT _g		x	<1,8	<1,5

2.2. Materiais Compósitos

2.2.1. Definição e características

Os materiais compósitos são materiais compostos por dois ou mais materiais heterogêneos com o propósito de melhorar propriedades do material resultante. Esta mistura é feita entre duas fases, a matriz e o reforço, a um nível macroscópico [18]. Quando feita adequadamente, é possível combinar as melhores propriedades de cada material e criar propriedades novas no material obtido [18, 19].

Algumas das propriedades que podem ser melhoradas são [19]:

- Tensão de cedência (σ_f);
- Módulo de elasticidade (E);
- Resistência à corrosão;
- Resistência ao desgaste;
- Massa e propriedades específicas;
- Resistência à fadiga;
- Resistência à temperatura;
- Isolamento térmico, elétrico e acústico.

Os materiais compósitos podem ser classificados em quatro tipos [19]:

- Compósitos fibrosos;
 - Fibras longas;
 - Fibras curtas.
- Compósitos laminados;

- Compósitos de partículas;
- Combinação de tipos de compósitos.

Os materiais compósitos podem ocorrer naturalmente, como por exemplo os ossos, um material compósito cuja matriz é de cristais de apatita e o reforço fibras de proteína de colagénio [20]. Estes também podem ser fabricados utilizando como matriz materiais poliméricos, metais, cerâmicos ou cimentosos. Estes materiais podem ser utilizados individualmente ou combinados para formar compósitos híbridos. Os materiais compósitos mais comumente utilizados são os de matriz polimérica [18, 19].

Os materiais compósitos de matriz polimérica são os mais utilizados devido à facilidade de processamento, baixo custo e a baixa densidade dos materiais poliméricos. Estes apresentam particular importância em aplicações que requerem massa reduzida. Devido a apresentarem uma elevada rigidez específica e resistência específica, estes materiais são adequados a estas aplicações.[18, 19].

2.2.2. Matrizes

A matriz de um material compósito apresenta várias funções tais como, agregar e manter a posição dos reforços, proteger os reforços de desgaste e o ambiente exterior, ajudar a distribuir a carga ao agir como um meio de transferência de tensão e fornecer resistência interlaminar, ao corte, compressiva e à flexão. A matriz determina a estabilidade termomecânica do material compósito. A dissipação da energia proporcionada pela matriz diminui a velocidade de crescimento das falhas e fissuras no reforço [19, 20].

As matrizes poliméricas que são as mais utilizadas dividem-se em dois tipos as termoplásticas e termoendurecíveis. As matrizes poliméricas são as matrizes mais utilizadas, comparativamente às restantes, devido as vantagens oferecidas como baixa densidade, baixo custo, facilidade de processamento, possibilidade de fabrico de geometrias complexas e disponibilidade [18]. Apresentam desvantagens como temperaturas de aplicação baixas, degradação ambiental elevada, baixa resistência mecânica e incompatibilidade de coeficiente de expansão térmica com o reforço.

As matrizes termoendurecíveis utilizam resinas que reagem, nas condições adequadas, para formar um polímero. Devido à sua estrutura molecular, estas não podem ser retrabalhadas com temperatura e não apresentam ponto de fusão. As alterações após a temperatura de transição vítrea (T_g) não são tão acentuadas quanto nas termoplásticas [18-21].

As matrizes termoplásticas, em comparação com as termoendurecíveis, não exigem ciclos de cura, e apenas precisam de arrefecer para apresentar as características finais. Em contraponto, estas exigem temperaturas e pressões de processamento elevadas, apresentam maior resistência ao impacto, melhor tenacidade e menor higroscopicidade. Devido à T_g destes materiais ser relativamente baixa, a sua temperatura de utilização é reduzida, mas esta traz facilidade no processamento e na alteração da geometria [18-21].

Os materiais compósitos de matrizes metálicas apresentam vantagens como temperatura de utilização elevada, resistência elevada a fatores ambientais, rigidez e resistência específicas elevadas, resistência à fadiga elevada em comparação com materiais da matriz, para além de absorção de humidade nula e um coeficiente de expansão térmica baixo. As desvantagens destes materiais compósitos são o custo elevado dos materiais base e processos de fabrico, baixa resistência à corrosão na interface e massa volúmica elevada de alguns metais [19, 21].

Os materiais compósitos de matrizes cerâmicas representam uma gama de utilizações restrita devido à fraca resistência a impacto e baixa σ_r . Contudo, estes apresentam resistência a elevadas temperaturas, inertidade química, E elevado, baixa densidade e elevada resistência à abrasão [20, 21].

2.2.3. Reforços

Os reforços são o componente dos materiais compósitos que suportam a maior parte da carga aplicada, fornecem rigidez e estabilidade, e regulam as propriedades térmicas e elétricas do material compósito. Estes apresentam sempre propriedades superiores à matriz, designadamente no caso das matrizes poliméricas. Os reforços são utilizados em forma de fibras curtas ou longas e partículas. A forma do reforço depende das propriedades esperadas e cargas a aplicar. A tipologia mais importante é a das fibras. Dentro das fibras existem dois tipos, as curtas e as longas, devido às suas secções reduzidas apresentam níveis muito reduzidos de falhas e imperfeições o seu processo de fabrico causa também um grande alinhamento molecular e cristalino o que leva a estas fibras apresentarem propriedades mecânicas muito superiores aos materiais de que são fabricadas [20, 21].

As formas mais comuns das fibras são [18]:

- Roving - um cordão de filamentos em bobine, pode ser utilizado para pultrusão, para produzir mantas, malhas ou fibras curtas (Figura 5 a);
- Mantas - as fibras são dispostas aleatoriamente e agregadas por um ligante, utilizados para baixas propriedades mecânicas (Figura 5 b);
- Tecidos - utilizados para obter propriedades mecânicas elevadas:
 - Tecidos entrelaçados - tecidos com as fibras orientadas perpendicularmente em relação de umas às outras (Figura 5 c);
 - Tecidos quase unidireccionais - as fibras estão predominantemente orientadas a 0° as orientadas em outras direções servem para manter posicionadas as outras (Figura 5 d);
 - Tecidos híbridos - mistura de fibras de diferentes materiais (Figura 5 e).
- Malhas - camadas de fibras alinhadas ligadas sucessivamente (Figura 5 f);
- Tecidos 3D - obtidos por processos de tecelagem para criar painéis e perfis estruturais. (Figura 5 g);
- Entrançados - apresentam uma configuração tubular ou plana (Figura 5 h);
- Pré-formas - peças com geometria garantida por ligantes (Figura 5 i).

Revisão Bibliográfica

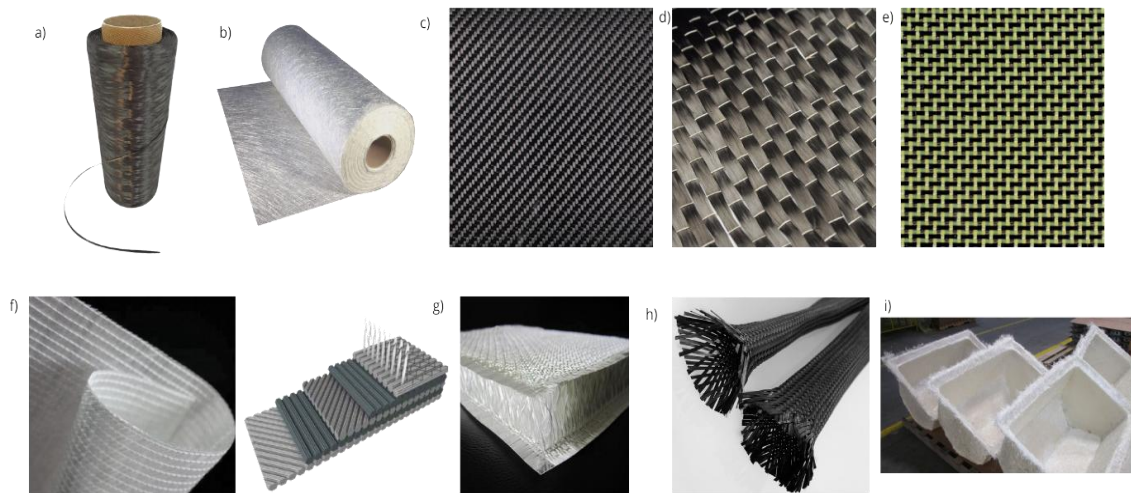


Figura 5 - Tipologias dos reforços fibrosos: a) Roving [22], b) Manta [23], c) Tecido entrelaçado [24], d) Tecido quase unidirecional [25], e) Tecido híbrido [26], f) Malha [27], g) Tecido 3D [28], h) Entrançado [29], i) Pré-formas [30]

As fibras mais utilizadas, nomeadamente as combinadas com as matrizes poliméricas, encontram-se caracterizadas na Tabela 5. Em que d é o diâmetro da fibra, ρ representa a massa volúmica, A a extensão após rotura do material e T a temperatura máxima de utilização.

Tabela 5 - Propriedades das fibras mais utilizadas [31]

Fibras	d (μm)	ρ (kg/m^3)	E (GPa)	σ_r (MPa)	A (%)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Preço (\$/kg)
Vidro R	10	2500	86	3200	4	700	14
Vidro E	16	2600	74	2500	3,5	700	2
Kevlar 49	12	1450	130	2900	2,3	177	70
Grafite HR	7	1750	230	3200	1,3	>1500	200
Grafite HM	6,5	1800	390	2500	0,6	>1500	200
Boro	100	2600	400	3400	0,8	500	500
Polietileno	12	960	100	2400	3,5	70	1,42

As partículas utilizadas como reforço (Figura 6) podem ser metálicas ou não metálicas. Ambas são dispersas aleatoriamente na matriz do composto. Estas partículas são mais utilizadas no reforço de matrizes metálicas e cerâmicas [21].

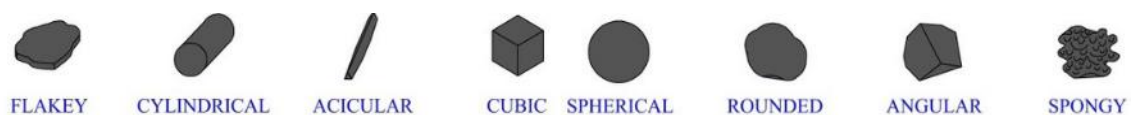


Figura 6 - Formatos possíveis das partículas utilizadas como reforço [32]

2.2.4. Processos de fabrico

Os processos de fabrico aplicados aos materiais compósitos variam de acordo com as exigências do material, sejam estas geométricas, físicas ou requisitos de processamento do material. Estes dividem-se em três tipos, os de molde aberto, os de molde fechado e os contínuos. Os processos

de molde aberto são realizados a baixa pressão e permitem o fabrico de geometrias complexas e de elevadas dimensões. O custo destes é mais baixo devido à maior facilidade de produção dos moldes em relação aos processos de molde fechado. Estes processos são trabalhosos e a qualidade depende diretamente dos operadores. Os processos de molde fechado proporcionam um ótimo acabamento nas duas superfícies, limitam a emissão de compostos voláteis e podem ser automatizados [18, 20]. Os processos de molde aberto mais utilizados são:

- Moldação manual (Figura 7) - Impregnação da matriz no reforço manualmente.

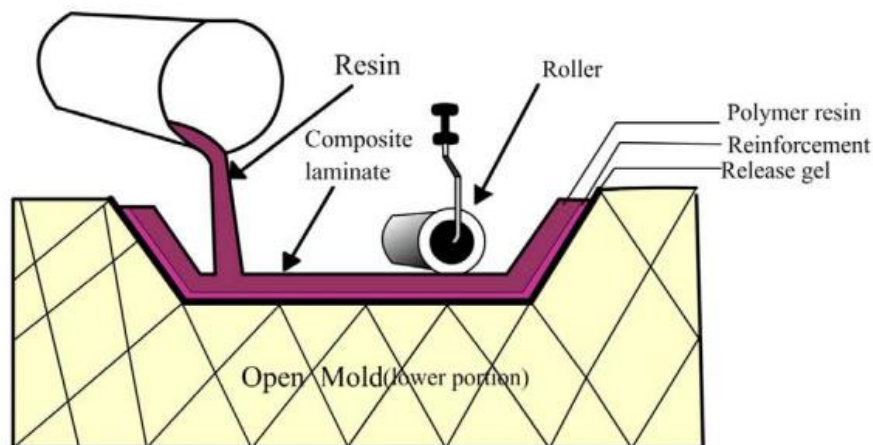


Figura 7 - Representação esquemática da moldação manual [33]

- Moldação por projeção (Figura 8) - Projeção de fibras de reforço misturadas com a matriz sobre o molde.

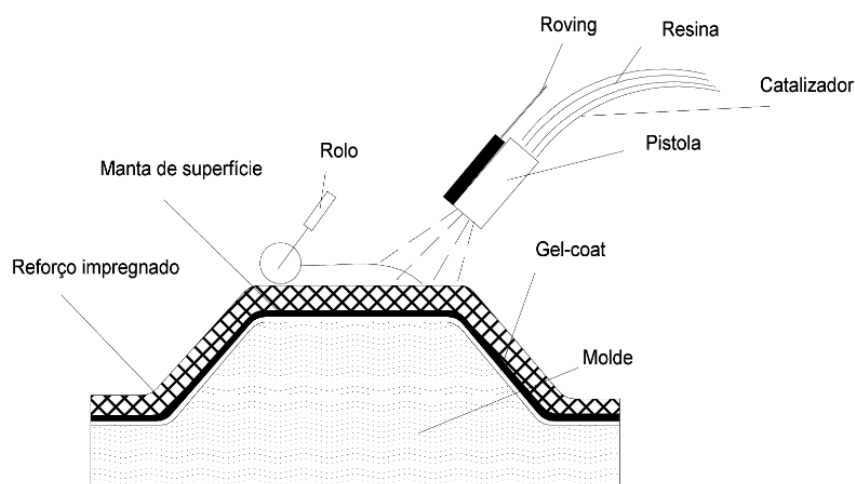


Figura 8 - Representação esquemática de moldação por projeção [18]

- Infusão a vácuo (Figura 9) - Vácuo age como impulsor da matriz para impregnar o reforço.

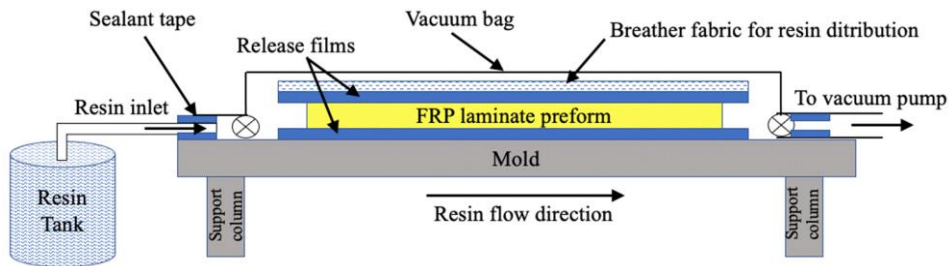


Figura 9 - Representação esquemática da infusão a vácuo [34]

- Moldação em autoclave (Figura 10) - Cura em saco de vácuo em ambiente fechado sobre condições de temperatura e pressão controladas.

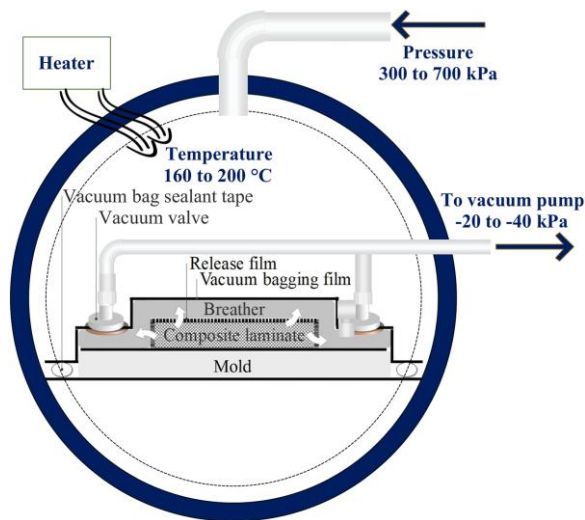


Figura 10 - Representação esquemática da moldação em autoclave [35]

Os processos de molde fechado mais utilizados são:

- Moldação por compressão (Figura 11) - Matriz e reforço são misturados antes de serem colocados no molde que os conforma sob pressão e temperatura.

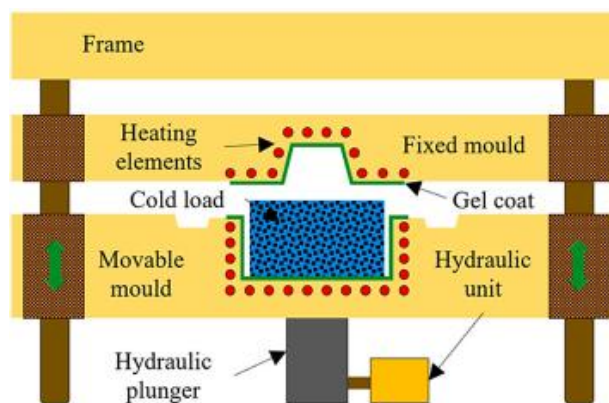


Figura 11 - Representação esquemática da moldação por compressão [36]

- Moldação por injeção (Figura 12) - A matriz é injetada no molde com o reforço posicionado neste. Utilizado com matrizes termoplásticas.

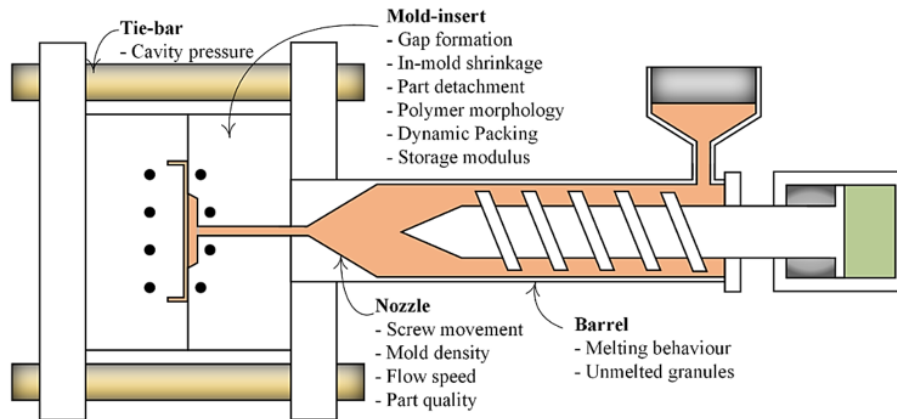


Figura 12 - Representação esquemática da moldação por injeção [36]

- Moldação por transferência de resina (Figura 13) - A matriz é injetada como resina sobre o reforço posicionado no molde. Utilizado com matrizes termoendurecíveis.

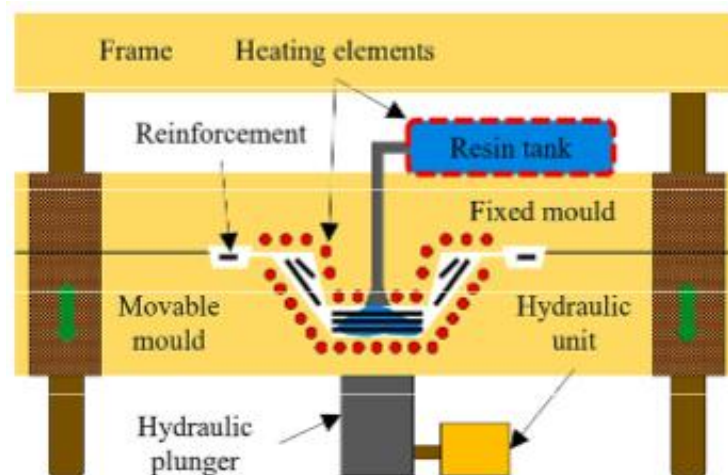


Figura 13 - Representação esquemática da moldação por transferência de resina [36]

Os processos contínuos são:

- Pultrusão (Figura 14) - As fibras longas são impregnadas com a matriz por imersão e formadas passando por fieiras.

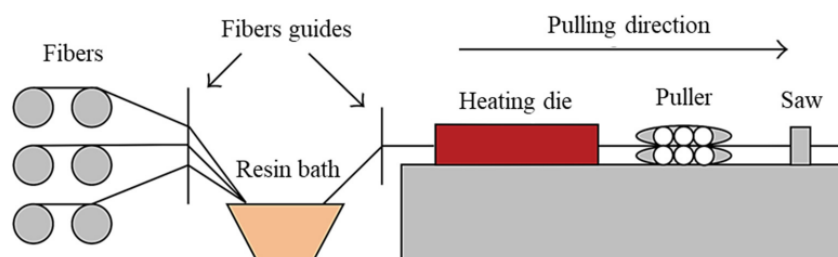


Figura 14 - Representação esquemática da pultrusão [36]

- Enrolamento filamentar (Figura 15) - As fibras longas pré-impregnadas são enroladas em torno de um molde rotativo colocado num mandril.

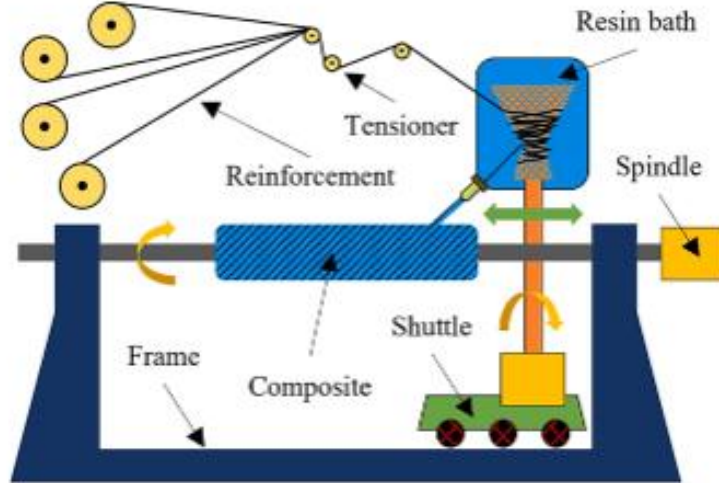


Figura 15 - Representação esquemática do enrolamento filamentar [36]

- Moldação por centrifugação (Figura 16) - As fibras cortadas e matriz em resina são projetadas no interior de um molde cilíndrico em rotação.

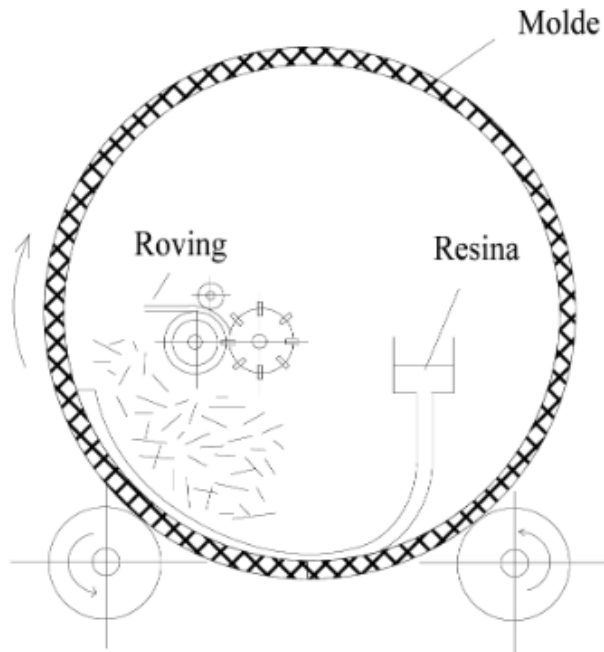


Figura 16 - Representação esquemática da moldação por centrifugação [18]

Os processos de fabrico anteriormente mencionados combinam a matriz e o reforço em momentos específicos durante o seu processamento. No entanto, estes podem também usar materiais pré-combinados. Estes materiais são utilizados nos processos de fabrico já com a matriz e reforço misturados [18, 20]. Estes materiais são sempre uma mistura entre uma matriz polimérica e uma fibra. Os mais comuns são os *Sheet Moulding Compounds* (SMC) (Figura 17 a), os *Bulk Moulding Compounds* (BMC) (Figura 17 b) e os pré-impregnados (Figura 17 c).

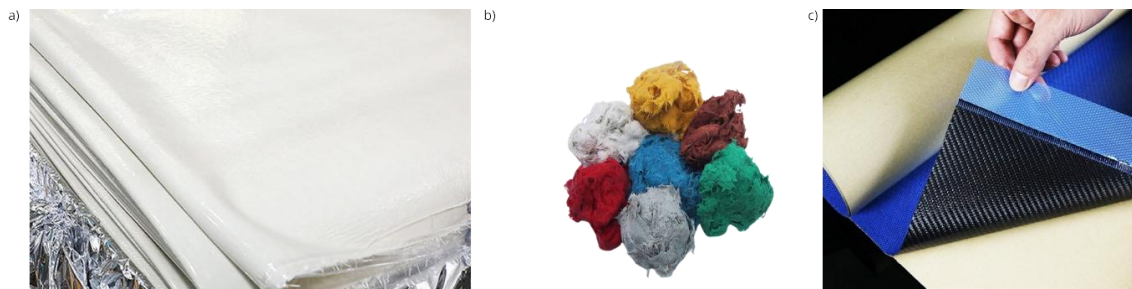


Figura 17 a) - SMC [37], b) BMC [37] e c) Pré-impregnado de fibra de carbono [38]

O SMC e BMC são compostos por uma matriz termoendurecível, de poliéster ou vinilester e por fibras de vidro. Estes são semi-produtos de processamento rápido e exigência moderada. Os SMC são folhas de material compósito pronto a processar e os BMC são uma pasta de material compósito pronta a processar. Estes semi-produtos são processados em molde fechado, por compressão no caso dos SMC e por injeção no caso dos BMC.

Os pré-impregnados consistem em fibras longas e que são impregnadas de resina, termoendurecível ou termoplástica. Estes semi-produtos são aplicados em componentes de exigência elevada. Os processos de fabrico utilizados para este semi-produto são a moldação manual e por vácuo e cura a elevada temperatura, e moldação em autoclave. Estes eliminam as perdas de resina durante o processo de fabrico associadas a uso da matriz e reforço separados [18, 21].

2.2.5. Ensaio de caracterização

Os ensaios de caracterização dos materiais compósitos são importantes para a determinação das propriedades mecânicas, físicas e comportamento à fratura. Todas estas informações são especialmente importantes em aplicações estruturais para garantir o cumprimento dos requisitos. A obtenção das propriedades permite a extrapolação de propriedades teóricas de componentes através de fórmulas matemáticas empíricas. Todos estes ensaios são regidos por normas regulatórias. Os ensaios são feitos em laminados do material compósito a partir destes laminados são recortados provetes para os ensaios a efetuar. Existem também ensaios específicos para a matriz e para o reforço permitindo a determinação de propriedades individualmente [19-21]. As etapas dos ensaios, tanto a realização como a análise dos dados obtidos, são realizadas pelos procedimentos determinados nas normas.

Os ensaios físicos permitem determinar propriedades físicas do material compósito. Estes ensaios são importantes para determinar o Teor de Vazios (TV) e a Fração Volúmica de Fibras (FVF), duas propriedades importantes para determinar a qualidade do material obtido. Os ensaios mecânicos permitem determinar as propriedades mecânicas do material compósito, permitem comprovar valores calculados teoricamente ou como base para estimar novas propriedades. Os ensaios de fratura permitem determinar propriedades relacionadas à resistência à delaminação do material compósito. Na Tabela 6 são apresentados os ensaios de caracterização mais comuns [19-21].

Tabela 6 - Ensaio de caracterização [18, 30]

Tipo de ensaio	Método de ensaio	Propriedade obtida
Físico	Deslocamento de líquido	Densidade
	Remoção de matriz por queima ou dissolução	Teor de fibras
		TV
		FVF
<i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC)	T_g	
Mecânico	Ensaio de tração	E Módulo de Poisson Tensão de rotura à tração
	Ensaio de compressão	Módulo de elasticidade de compressão Tensão de rotura à compressão
	Ensaio de corte	Módulo de elasticidade de corte Tensão de cedência ao corte
	Ensaio de flexão	Módulo de elasticidade de flexão Tensão máxima de flexão
Fratura	Ensaio de fratura	Taxa de libertação de energia

2.2.6. Planeamento de experiências

O planeamento de experiências ou *Design of Experiments* (DoE) é uma metodologia que permite planear, executar e analisar experiências de maneira sistematizada e eficiente. O DoE utiliza várias técnicas estatísticas para otimizar parâmetros de um processo para alcançar os melhores valores possíveis, de acordo com as especificações e um processo com o mínimo de variação possível [40]. O DoE pode ser dividido em três abordagens: a abordagem do DoE clássico, *Response Surface Methodology* (RSM) e abordagem Taguchi. Estas abordagens são utilizadas para processos de fabrico a serem otimizados, estas abordagens não são as únicas, mas sim as mais utilizadas na área da engenharia [40].

A abordagem do DoE clássico utiliza o método *Analysis of Variance* (ANOVA) para determinar a influência dos parâmetros do processo a partir de resultados das experiências. O método ANOVA é utilizado para decompor a variância dos resultados de maneira a demonstrar o efeito de cada um dos fatores, variáveis do processo e o erro experimental [40].

No caso da abordagem RSM, um conjunto de técnicas avançadas de DoE permite entender e otimizar melhor a resposta. Esta abordagem é usada, frequentemente, para refinar modelos após a determinação dos fatores importantes por meio de filtragem de experiências ou experiências fatoriais, especialmente quando existe suspeita de curvatura na superfície de

resposta. Esta abordagem utiliza uma função quadrática para modelar uma superfície de resposta com curvatura (Figura 18) o que permite mais detalhe na análise [31, 32].

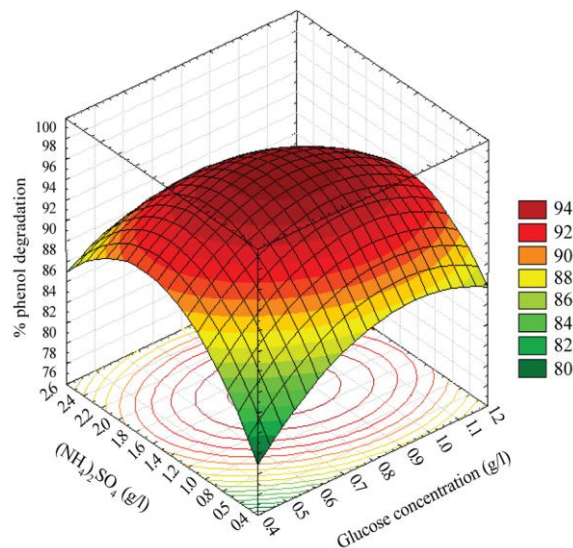


Figura 18 - Exemplo de resultado obtido na abordagem RSM [41]

A abordagem Taguchi é uma técnica de DoE que permite reduzir o número de experiências necessárias. Com a redução do número de experiências é possível obter resultados mais rapidamente e minimizar o efeito dos fatores não controlados. O objetivo desta técnica é determinar os parâmetros que levam aos valores desejados com o mínimo de variação. Esta técnica é utilizada para controlo de qualidade de um processo [40].

A implementação de um DoE deve seguir os seguintes passos [31, 32]:

- 1) Definir o objetivo do DoE;
- 2) Identificar e selecionar as variáveis do processo;
- 3) Determinar a abordagem a utilizar;
- 4) Aplicar a abordagem;
- 5) Verificar os resultados;
- 6) Analisar os resultados.

Após obtenção dos resultados do DoE implementado, devem ser feitas as alterações necessárias às variáveis do processo com base nos resultados obtidos, e repetido este processo para avaliar as alterações até os resultados obtidos serem os desejados [31, 32].

2.2.7. Previsão de resistência

Os materiais compósitos possuem estruturas laminadas em quase todas as suas aplicações. A camada é a base do comportamento mecânico e da resistência de um material compósito. A previsão da resistência de um material compósito é um dos passos mais importantes do dimensionamento de um componente ou estrutura. As propriedades mecânicas dos materiais compósitos são estimadas em dois domínios, o da macromecânica e o da micromecânica. A micromecânica é o estudo do comportamento mecânico de um material compósito com base na matriz e no reforço. A macromecânica é o estudo do comportamento de um material

compósito constituído por várias camadas. A previsão da resistência baseia-se em cálculos teóricos que utilizam fórmulas empíricas da macro e micromecânica para calcular a resistência final do material compósito. Esta depende da resistência individual da matriz e do reforço. A influência da resistência de cada componente é proporcional à fração volúmica de cada um, tal como definido pela Lei das Misturas [18, 21].

Os cálculos comuns de mecânica dos materiais não se aplicam aos materiais compósitos devido a estes não serem isotrópicos e homogêneos, pelo que estes apresentam as suas próprias teorias de comportamento e cálculos. Para estes cálculos são utilizadas matrizes que permitem a decomposição dos esforços e propriedades mecânicas nas orientações corretas tendo em conta a orientação das camadas do laminado. Estas permitem calcular tensões instaladas por solicitações axiais, o que não engloba todas as solicitações [18, 21].

As solicitações num laminado são muitas das vezes multiaxiais, o que requer critérios específicos para determinar a tensão de rotura (σ_m). Os mais comumente utilizados são o critério de tensão máxima, o critério de deformação máxima e o critério de Tsai-Hill. O critério de tensão máxima (equação (1)) prevê a rotura quando um dos componentes do tensor atinge a σ_m , enquanto o critério de deformação máxima (equação (2)) determina que a rotura ocorre quando uma das deformações atinge o respetivo valor de rotura. A nomenclatura utilizada em ambas as equações é a seguinte: σ_{ut1} tensão de rotura longitudinal à tração, σ_{uc1} tensão de rotura longitudinal à compressão, σ_{ut2} tensão de rotura transversal à tração, σ_{uc2} tensão de rotura transversal à compressão, τ_{u12} tensão de rotura ao corte, σ_1 tensão longitudinal, σ_2 tensão transversal, τ_{12} tensão ao corte, ε_{ut1} deformação de rotura longitudinal à tração, ε_{uc1} deformação de rotura longitudinal à compressão, ε_{ut2} deformação de rotura transversal à tração, ε_{uc2} deformação de rotura transversal à compressão, γ_{u12} deformação de rotura ao corte, ε_l deformação longitudinal, ε_t deformação transversal, γ_{12} deformação ao corte. Ambos estes critérios são não interativos, já que estes não consideram os efeitos combinados dos vários componentes do tensor [18, 21].

$$\begin{aligned} -\sigma_{uc1} < \sigma_t < \sigma_{ut1} \\ -\sigma_{uc2} < \sigma_l < \sigma_{ut2} \\ |\tau_{12}| < \tau_{u12} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} -\varepsilon_{uc1} < \varepsilon_t < \varepsilon_{ut1} \\ -\varepsilon_{uc2} < \varepsilon_t < \varepsilon_{ut2} \\ |\gamma_{12}| < \gamma_{u12} \end{aligned} \quad (2)$$

O critério de Tsai-Hill (equação (3)) é um critério interativo que considera a interação entre todas as propriedades mecânicas e indica a rotura tendo em conta todos os esforços aplicados e propriedades mecânicas [18, 21].

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{u1}^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_{u1}^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{u2}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{u12}^2} = 1 \quad (3)$$

Quando o resultado desta equação é inferior a um não ocorre a rotura do laminado, enquanto no caso de ser superior ou igual a um ocorre a rotura do laminado. Apesar de estes critérios serem os mais utilizados para a previsão da rotura de um compósito, existem outros critérios com este propósito. Estes podem ser calculados manualmente ou com o apoio de computadores para aceleração do processo [18, 21].

2.2.8. Estado da arte

O estado da arte sobre os materiais compósitos é apresentado na Tabela 7. Este consiste em estudos recentes que apresentam novos desenvolvimentos através da análise de artigos.

Tabela 7- Estado da arte dos materiais compósitos

Autor	Trabalho desenvolvido
Ashrith et al [36]	<p>Este artigo de revisão analisa o fabrico e caracterização dos materiais compósitos fibrosos em aplicações de engenharia. O estudo reforça a importância do uso do processo de fabrico correto e o seu impacto nas propriedades mecânicas do material compósito final. Os autores apresentam o uso de fabrico aditivo como processo de fabrico de materiais compósitos para aplicações de engenharia. As observações mais importantes do estudo são:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A fração volúmica dos materiais compósitos com reforço de fibras de carbono varia entre 10 a 64 %, de fibras de vidro de 30 a 80 %, de fibras de aramida de 5 a 54 % e de fibras naturais de 20 a 80 %; • O fabrico de materiais compósitos poliméricos com reforço de aramida é facilmente obtidos por variados métodos de fabrico aditivo; • Materiais compósitos poliméricos com reforço de fibra de carbono podem ser fabricados com métodos de fabrico aditivo como <i>Fused Filament Fabrication</i>, <i>Fused Deposition Modeling</i> e <i>Selective Laser Sintering</i>; • Materiais compósitos híbridos de fibra de vidro e de fibras naturais como sisal, banana, algodão, bambu, folha de ananás, linho e juta com resinas poliméricas de epóxi, polipropileno, poliéster, vinilester e fenol-formaldeído apresentam boas características e possível uso como materiais de engenharia.
Muhammad Ateeq [42]	<p>Este artigo de revisão analisa a viabilidade e os processos de reciclagem e refabricação de materiais compósitos de fibra de carbono. O autor avaliou os métodos mecânicos, químicos e térmicos para reciclagem dos materiais compósitos de fibra de carbono e os efeitos da reciclagem nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais compósitos. Neste estudo é concluído que o material reciclado pode ser utilizado para processos de fabrico aditivo como o <i>Fused Deposition Modeling</i> e que a reciclagem destes materiais compósitos traz benefícios económicos.</p>
Zhou et al [43]	<p>Este estudo teve como objetivo analisar os efeitos da remoção de material e dano à saída da furação de um material compósito de fibra de carbono/PEEK. Para este fim foi estabelecido um modelo analítico microscópico de corte para descrever a remoção das fibras frágeis e matriz dúctil. As conclusões principais do estudo são as seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • O modelo foi eficaz em prever o dano e remoção de material com um erro de 8 %; • A borda de corte causa deformação fora do plano nas fibras superficiais e gera fissuras. A margem de corte causa fratura das fibras por dobragem e induz a propagação de fissuras em modo III; • O aumento da espessura do corte, aumenta a rigidez de apoio das fibras à superfície, levando à alteração de falha por dobragem à falha por corte ao longo do plano reduzindo os danos de saída.

Tabela 7 - Estado da arte dos materiais compósitos (continuação)

Garcia Filho et al [44]	Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade de um material compósito de fibras de piaçá e matriz epóxida como substituto de laminados de Kevlar para aplicações balísticas. Para avaliar as capacidades balísticas destes compósitos foram fabricados laminados deste material compósito. Estes laminados foram depois atingidos com um projétil de 7.62 mm. Os danos causados por este projétil foram avaliados e quantificados. Os resultados demonstram que estatisticamente a energia absorvida pelo material em estudo foi igual à do Kevlar e o parâmetro de velocidade limite apresenta a mesma ordem de magnitude do Kevlar. No estudo foi então concluído que este material compósito pode substituir o Kevlar devido ao seu peso, custo e impacto ambiental inferior.
Walsh et al [45]	Este artigo teve como objetivo comparar materiais compósitos <i>sandwich</i> com peles de fibra de carbono e núcleo de aglomerado de cortiça expandida com uma estrutura <i>sandwich</i> semelhante com apenas alteração do núcleo, sendo este em espuma de polimetacrilimida, é utilizada em aplicações industriais, aeroespaciais e médicas. A comparação dos dois núcleos foi feita através de ensaios mecânicos e de vibrações. Os ensaios mecânicos foram o ensaio de flexão a três pontos, de acordo com a norma ASTM D7250, de impacto de baixa velocidade, de acordo com a norma ASTM D7136. O ensaio de vibrações foi feito de acordo com a norma ASTM E756-05. OS resultados demonstraram que: <ul style="list-style-type: none"> • O módulo de flexão da estrutura com núcleo de cortiça foi inferior, em cerca de 29 vezes, o que limita o uso deste material; • A absorção de vibrações foi superior no núcleo de cortiça, o que minimiza a propagação de vibrações e aumenta a vida útil; • A absorção de impactos a baixa velocidade do núcleo de cortiça foi superior, já que este apresenta menos deformação e danos.

2.3. Infusão a Vácuo de Materiais Compósitos

2.3.1. Princípios do processo

O processo de infusão a vácuo (Figura 19) é um processo de molde aberto que utiliza o vácuo para impregnar as fibras de reforço com a resina polimérica da matriz.

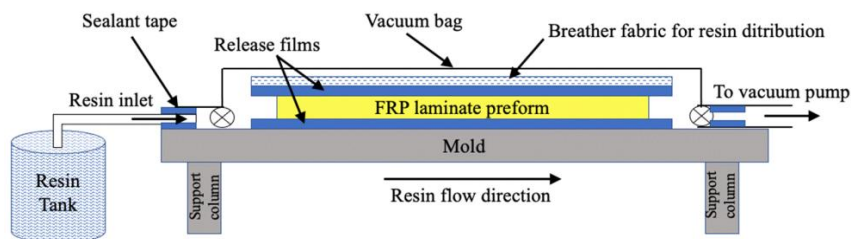


Figura 19 - Representação esquemática do processo de infusão a vácuo [34]

Este processo é viável apenas para materiais compósitos poliméricos fibrosos. O processo consiste em utilizar a diferença de pressão estabelecida para impregnar as fibras do reforço com a resina polimérica. Para ser eficaz, este processo de fabrico necessita de manter o vácuo durante todo o processo. O vácuo causa uma diferença de pressão com a pressão ambiente, o que leva à impulsão da resina pelas fibras. A infusão a vácuo de materiais compósitos apresenta múltiplas variações, através da alteração de etapas ou equipamentos utilizados no processo,

enquanto a base do processo se mantém constante [18, 21, 33-35]. O processo pode ser descrito pelos seguintes passos [49]:

1. Posicionamento das fibras de reforço no molde;
2. Posicionamento do *peelply*, *flow mesh* e saco de vácuo sobre as fibras de reforço,
3. Estabelecimento do vácuo no saco de vácuo;
4. Introdução da resina no saco de vácuo para impregnar as fibras;
5. Corte da admissão de resina depois da impregnação total das fibras;
6. Cura da resina sob vácuo;
7. Desmoldagem do material compósito.

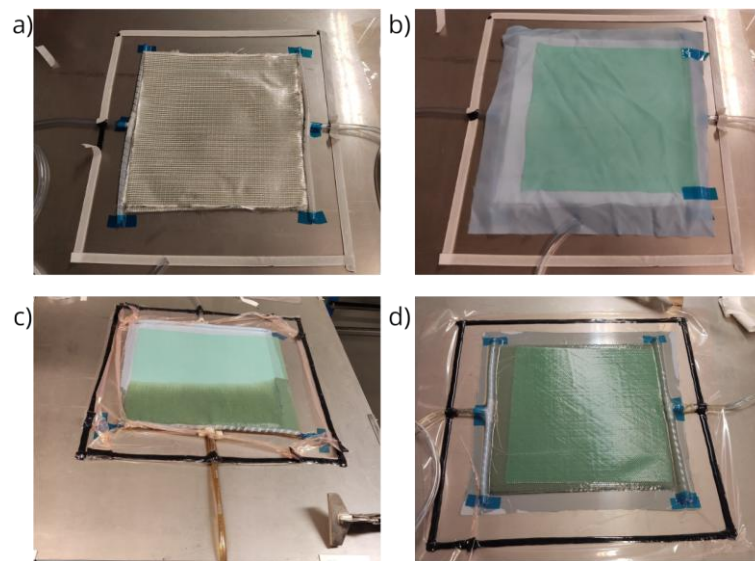


Figura 20 - Processo de infusão a vácuo: a) 1º passo, b) 2º passo, c) 4º passo e d) 6º passo

Este processo apresenta várias vantagens, na medida em que permite a criação de peças em materiais compósitos com grandes dimensões, geometrias complexas, frações volúmicas de fibras elevadas, TV reduzido ou quase nulo. Este é um processo consistente, com alta compactação das fibras, tempo de produção reduzido, sem emissão de compostos voláteis e baixo custo do processo. A infusão a vácuo permite também substituir processos de maior complexidade e custo como a moldação por autoclave. Apesar das vantagens deste processo, o seu estudo reveste-se de uma grande importância pois o processo apresenta um grau de maturação baixo, em algumas indústrias que utilizam processos alternativos a estes, o que dificulta a sua disseminação e aplicação corrente. O processo de infusão a vácuo mais comum é o *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding* (VARTM). Este processo e suas múltiplas variações são utilizados há anos com sucesso para o fabrico de todo o tipo de componentes, especialmente na indústria dos transportes [18, 21, 30, 34-36].

2.3.2. Matrizes e reforços para infusão a vácuo

As matrizes utilizadas neste processo de fabrico são matrizes poliméricas em resina líquida, pois estas devem apresentar a capacidade de fluir facilmente. Estas resinas devem sempre apresentar fluidez suficiente para impregnarem a totalidade das fibras de reforço. Os reforços

utilizados neste processo são fibrosos, dos quais a tipologia mais utilizada são os tecidos, cujas características alteram a velocidade do processo e os resultados obtidos [48, 49, 51, 52].

As matrizes utilizadas neste processo apresentam sempre baixa viscosidade. As matrizes utilizadas para componentes de material circulante devem respeitar a norma EN 45545-2, que requer que todos os materiais do material circulante sejam ignífugos. As matrizes com características ignífugas utilizadas devem apresentar capacidade de reter as propriedades durante o processo já que, durante a infusão, os aditivos ignífugos podem ficar retidos no *peelply* ou *flow mesh*, o que implica a perda destas características no material compósito final. As propriedades ignífugas destas resinas são garantidas através da introdução de aditivos ignífugos, que aumentam o limite inferior de oxigénio [37, 38].

Os reforços utilizados neste processo de fabrico são reforços fibrosos. Qualquer tipologia e material de reforço fibroso pode ser utilizado neste processo visto este processo ser apenas adequado a este tipo de reforço. As características ignífugas de uma fibra são intrínsecas ao material delas o que não induz qualquer limitação ao processo. Estas características são inerentes aos materiais como a fibra de vidro, fibra de carbono, fibras de aramida e algumas fibras naturais. Contudo, as fibras que não apresentam as características ignífugas podem ser aditivadas para apresentarem características ignífugas. O material da fibra não influencia a impregnação da resina. Neste processo o reforço é compactado pelo saco de vácuo antes de haver a introdução da resina, o que leva a um aumento da FVF. Esta compactação permite também compatibilizar o reforço com as dimensões do molde. A tipologia do tecido influencia a impregnação da resina nestes. Os tecidos devem permitir um fluxo desimpedido da resina pelo seu meio de maneira a permitir uma boa impregnação do reforço. A distribuição da resina pelo reforço é também facilitada pelo *flow mesh* [44, 45, 51-53].

2.3.3. Equipamentos e acessórios para processamento

O processo de infusão a vácuo requer poucos equipamentos e acessórios. Neste processo são utilizados apenas três equipamentos: a bomba de vácuo (Figura 21 a), a armadilha de resina (Figura 21 b) e o molde (Figura 21 c). Os equipamentos são os elementos do processo que podem ser reutilizados.



Figura 21 - a) Bomba de vácuo [58] , b) Armadilha de resina [59] e c) Molde [60]

A bomba de vácuo é o equipamento que estabelece o vácuo durante todo o processo. A armadilha de resina serve para coletar a resina que saia pelo tubo de vácuo para proteger a bomba de vácuo. O molde é o equipamento que fornece a forma final ao material compósito.

Os acessórios utilizados neste processo são os elementos descartáveis. Os acessórios consistem nos seguintes elementos: saco de vácuo (Figura 22 a), fita vedante (Figura 22 b), *peelply* (Figura 22 c), *flow-mesh* (Figura 22 d), espiral (Figura 22 e), tubo de vácuo (Figura 22 f), alicate para fecho de tubo (Figura 22 g) e conector para espiral e tubo (Figura 22 h).

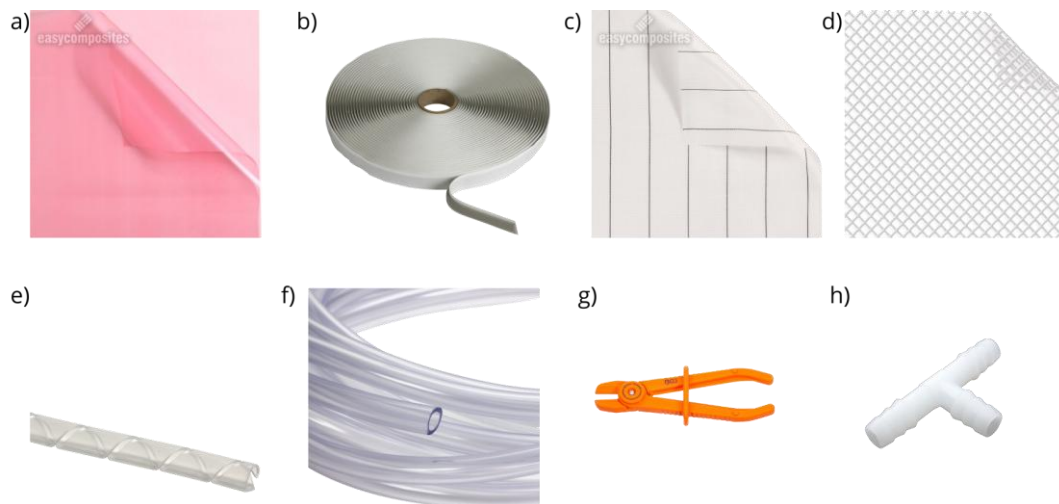


Figura 22 - a) Saco de vácuo [61], b) Fita vedante [62], c) *Peelply* [63], d) *Flow mesh* [64], e) Espiral [65], f) Tubo de vácuo [66], g) Alicate para fecho do tubo [67] e h) Conector para espiral e tubo [68]

O saco de vácuo, um filme polimérico, apresenta a função de cobrir todo o molde, reforço, matriz e acessórios de maneira a estabelecer o vácuo sobre estes durante todo o processo. A sua fixação e vedação ao molde é feita com a fita vedante. O *peelply* é posicionado sobre o reforço para permitir a extração da peça final sem que este adira ao saco de vácuo, enquanto o *flow mesh* tem como melhorar a distribuição da resina no reforço, e é colocado sobre o *peelply* e debaixo do saco de vácuo. A função da espiral é distribuir o vácuo ou admissão de resina pelo molde, pelo que esta é sempre conectada ao tubo de vácuo através do conector do tubo de vácuo e espiral. O tubo de vácuo age como entrada de resina em um lado e como conexão da bomba de vácuo ao molde no outro lado. O alicate para fecho de tudo serve para interromper os tubos de maneira a isolar o vácuo presente no saco de vácuo.

2.3.4. Variantes do processo

A infusão a vácuo é um princípio de funcionamento, princípio da criação de uma diferença de pressão utilizando o vácuo para injeção da resina no reforço, aplicado a vários processos de fabrico. O processo de fabrico mais comum que utiliza este princípio é o VARTM todos os outros são variações deste. Algumas das variações do processo são proprietários de empresas e servem para produzir componentes específicos. As variações mais comuns do processo são [18, 42-44]:

- *Vacuum assisted resin transfer moulding (VARTM)*: Processo, descrito nos capítulos anteriores, utilizado como base de comparação para as alterações presentes nos outros processos;

- *Seeman's composite resin infusion process (SCRIMP)*: Processo proprietário da Seeman's Composite. Em relação ao VARTM, este utiliza um método patenteado de distribuição para substituir o *flow mesh*;
- *Controlled atmospheric pressure resin infusion (CAPRI)*: Processo proprietário da Boeing. Este processo promove compactação cíclica das fibras empilhadas no molde através do vácuo processo é aplicado um vácuo parcial na entrada de resina, de forma a diminuir o gradiente de pressão e, por conseguinte, o gradiente de espessura;
- *Double bag vacuum infusion (DBVI)*: Processo proprietário da Boeing, que utiliza como base o VARTM e introduz um saco de vácuo, sobreposto à montagem do VARTM, de maneira a compactar o primeiro saco com vácuo;
- *Vacuum assisted process (VAP)*: Processo proprietário da Airbus, que adiciona à montagem do VARTM uma membrana semipermeável para permitir a desgaseificação da resina durante o processo, o que permite diminuir as porosidades e quantidade de vazios;
- *Pulsed infusion (PI)*: Processo recente que utiliza a montagem do VARTM com um distribuidor de pressão e um saco de vácuo sobreposto nesta. Neste processo a pressão de ambos os sacos é variada durante o processo de maneira a obter uma distribuição mais homogénea da resina no reforço.

As diferenças entre estes processos expressam-se nas propriedades do material compósito obtido. Uma das principais diferenças é a FVF. A diferença entre estas variantes é apresentada na Figura 23. É possível perceber que os processos focados em compactação e distribuição de pressão sobre a montagem apresentam benefícios na FVF.

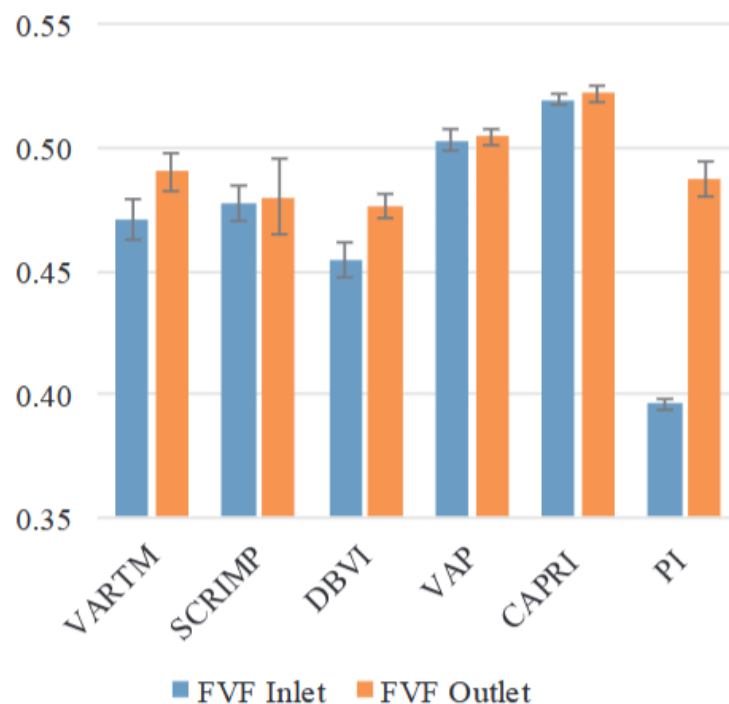


Figura 23 - Fração volúmica das fibras por processo [46]

2.3.5. Parâmetros do processo

Múltiplos parâmetros do processo afetam o material compósito obtido. As propriedades finais mais dependentes dos parâmetros do processo são as propriedades mecânicas, a FVF, a uniformidade da espessura e o volume de vazios. Os parâmetros mais importantes do processo VARTM são os seguintes [47, 65]:

- Pressão do vácuo;
- Temperatura;
- Viscosidade da resina;
- Permeabilidade do reforço;
- Ciclo de cura;
- Proporção do peso de matriz e reforço;
- Posição da entrada de resina e saída de vácuo;
- Compressibilidade das camadas do reforço;
- Tipo de *flow mesh*.

Todos estes parâmetros afetam o resultado de uma maneira característica pelo qual é possível obter um diagrama de causa e efeito com base nestes parâmetros e as propriedades finais mais afetadas (Figura 24).

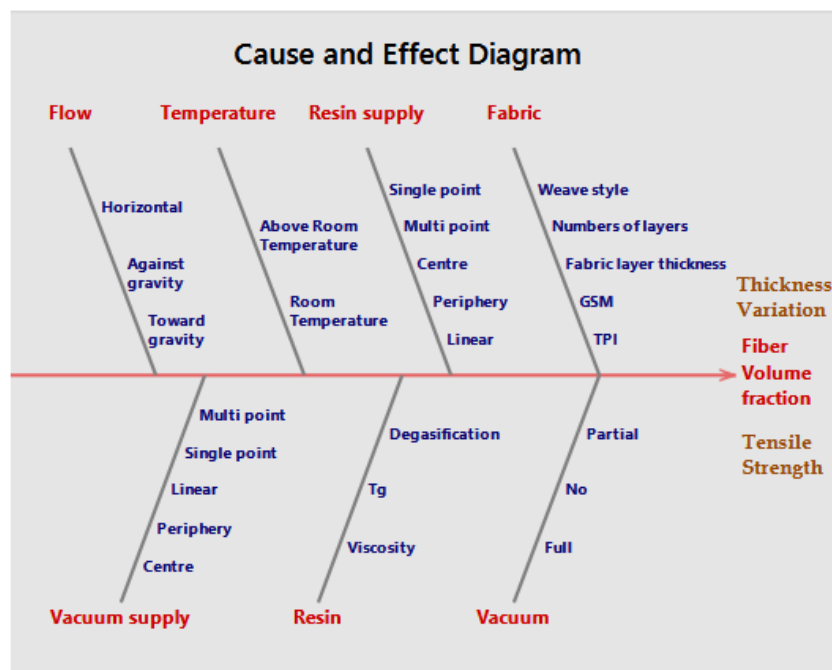


Figura 24 - Diagrama de causa e efeito dos parâmetros do processo e resultado [51]

De todos os parâmetros destacam-se como mais importantes os apresentados na Tabela 8.

Tabela 8- Parâmetros mais importantes do processo e a sua influência [69]

Parâmetro	Influência
Compressibilidade do reforço	O seu aumento leva ao aumento da FVF e a sua diminuição à diminuição da espessura, permeabilidade e porosidade do reforço. Este parâmetro depende da pressão de vácuo, tipologia do reforço e geometria do molde. A compressibilidade é um fenómeno complexo e existem modelos para o prever de maneira a facilitar a parametrização do processo.
Permeabilidade do reforço	Diretamente relacionada com as propriedades mecânicas e velocidade de enchimento. O aumento da compressibilidade conduz a um aumento destas propriedades. Este parâmetro é diretamente dependente da tipologia de reforço utilizada.
Viscosidade da matriz	Quanto menor a viscosidade menor o tempo de enchimento e maior a impregnação do reforço o que diminui a quantidade de vazios e melhora as propriedades mecânicas. Este parâmetro depende da matriz utilizada e da temperatura a que o processo é desenvolvido, já que quanto maior a temperatura menor a sua viscosidade, e vice-versa.
Pressão de vácuo	Uma baixa pressão de vácuo restringe o movimento das fibras de reforço o que leva um material compósito final de maior qualidade. Contudo, uma baixa pressão de vácuo aumenta o tempo de infusão e pode dificultar a impregnação. Este parâmetro depende de todos os outros para ser dimensionado corretamente. É o parâmetro que limita a pressão de impregnação da resina.

Estes parâmetros podem ser alterados na fase de projeto e execução do processo. No entanto é de referir que a alteração destes, para a obtenção dos resultados desejados, requer uma fase experimental para a parametrização do processo. A importância da determinação da influência de cada parâmetro é diminuir a variabilidade dos resultados do processo. Uma variabilidade reduzida ou quase nula dos resultados permite a utilização deste processo para a obtenção de peças e componentes de exigência e repetibilidade elevada, por exemplo na indústria aeroespacial, permitindo a substituição do processo de moldação de autoclave pelo processo VARTM, o que por sua vez aumenta a eficiência energética da indústria e diminui custos de fabrico [60-62].

2.3.6. Limitações do processo

O processo de infusão a vácuo apresenta limitações na sua utilização, implementação e resultados obtidos. Estas podem ser divididas em dois tipos: as limitações inerentes ao processo e princípio de funcionamento e as limitações tecnológicas por falta de desenvolvimento do processo. As limitações inerentes ao processo são as seguintes [45, 62, 63]:

- Resinas de baixa viscosidade. Este processo requer resinas de baixa viscosidade, o que limita o uso deste processo, essencialmente, a resina termoendurecíveis de baixo desempenho pois, as resinas termoendurecíveis de alto desempenho e termoplásticas apresentam viscosidade demasiado elevada para o processo;

- Baixa uniformidade da espessura final. Devido à distribuição variável do vácuo no interior do molde e na geometria da superfície do molde, a compactação do reforço e a penetração da resina varia sobre toda a superfície;
- Consumo elevado de descartáveis. Todos os acessórios utilizados neste processo são descartáveis, já que todos entram em contacto com a resina que cura em contacto com estes, o que obriga ao seu descarte pois a remoção da resina é impraticável;
- Sensibilidade à perda de vácuo. Uma das principais limitações deste processo é que, no caso de perda do vácuo estabelecido no saco de vácuo, toda a peça necessita de ser descartada devido à perda de compactação e entrada de ar para o reforço, o que leva a um TV elevado demais.

As limitações tecnológicas do processo podem ser descritas e possivelmente sobrepostas às inerentes ao processo como apresentado a seguir [45, 62-65]:

- Baixa uniformidade da espessura final. Apesar de esta limitação ser inerente ao processo, pode ser vencida através da aplicação de distribuidores de pressão ou aumento da pressão externa de maneira a obter uma distribuição constante sobre a superfície. Contudo estas soluções não apresentam uma elevada eficiência, o que implica esforços adicionais no estudo destas;
- Dificuldade de automação do processo. Devido à complexidade da montagem, necessidade de supervisão do estado do processo e pressão do vácuo, tempo de ciclo elevado, geometrias complexas e dimensões suportadas pelo processo, a automação deste processo é difícil e carece de desenvolvimento pois a sua automatização reduz os atuais custos relacionados à mão de obra especializada necessária para o processo;
- Impregnação reduzida ou nula em materiais compósitos híbridos com reforços fibrosos e reforços de filmes poliméricos. O fabrico de materiais compósitos híbridos com filmes poliméricos por este processo apresenta problemas de impregnação da resina no reforço devido à dificuldade de permeabilização dos filmes pela resina. Esta limitação pode ser ultrapassada através de perfurações nos filmes e parâmetros do processo;
- Temperatura de processamento. Apesar de o tipo de resina utilizada neste processo precisar de apresentar baixa viscosidade, a aplicação de resinas com viscosidades mais altas pode ser viabilizada através da redução da viscosidade destas com o aumento de temperatura da resina na sua impregnação. Para este efeito é necessária a utilização de moldes aquecidos e constante monitorização da temperatura durante a impregnação do reforço, pois devido à alteração causada na cinemática pela variação da temperatura, é também necessário haver um estudo prévio para estudar a viabilidade desta solução.

2.3.7. Comparação com outros processos

Através das suas múltiplas variações, o processo de infusão apresenta muita flexibilidade de aplicação, o que significa que este pode ser comparado todos os outros processos de molde aberto, os de molde fechado e moldação em autoclave. Uma das principais desvantagens deste processo comparativamente a todos os outros é o seu baixo nível de desenvolvimento, apesar

do estudo e desenvolvimento constante do processo. No processo é comparado com os outros processos, apresentando as suas vantagens e desvantagens relativamente aos restantes [44, 62, 63].

Em comparação com o processo de moldação manual e o processo de moldação por projeção o processo de infusão a vácuo, apresenta múltiplas vantagens, tais como um desperdício reduzido de resina, a não emissão de compostos voláteis durante o processo, uma quantidade de vazios muito inferior, uma FVF e compactação das fibras superior, uma maior estabilidade dimensional e geometria e dimensões com melhores tolerâncias. Contudo apresenta desvantagens, como a necessidade de um número maior de acessórios e equipamentos, necessidade de mão de obra mais especializada, processo com maior necessidade de supervisão, menor desenvolvimento e disseminação difícil e reduzida [18, 21, 44, 60-63].

A comparação deste processo com o de moldação em autoclave é especialmente importante, pois este processo apresenta características que permitem substituir como um método com resultados iguais ou superiores a um custo mais baixo e sem a necessidade de um autoclave, um equipamento de custo muito elevado e de alta especialização. Algumas das principais vantagens são um custo por componente muito mais reduzido e a utilização de reforços e matrizes correntes. Por outro lado, a moldação por autoclave requer o uso de pré impregnados, semi-produtos de custo elevado, processamento e armazenamento difícil e variedade reduzida [48].

Comparando o processo de infusão a vácuo com o processo de transferência de resina, constata-se que estes apresentam semelhanças. Apesar destas, a infusão a vácuo apresenta vantagens e desvantagens relativamente à transferência de resina. Apresentam-se como vantagens não necessitar de moldes metálicos de encaixe exato e uma prensa hidráulica para montagem destes moldes, apresenta uma quantidade de vazios maior pois a resina é injetada nas fibras em contacto com a atmosfera e a alta pressão de injeção movimentam o reforço disposto no molde. Por outro lado, as desvantagens são a menor compactação da fibra devido a uma pressão de processamento inferior, tempo de ciclo mais elevado pois a transferência de resina ocorre mais rapidamente e pode ser feita em moldes aquecidos o que acelera também o processo, bom acabamento nas duas faces e maior compactação e fração de fibra volúmica das fibras [18, 21, 43-45, 47, 66, 67].

A comparação do processo de infusão a vácuo pode apenas ser feita para processos cujo propósito é processar as mesmas matrizes e reforços. Na infusão a vácuo são maioritariamente utilizadas matrizes poliméricas termoendurecíveis e reforços fibrosos, cujo componente resultante é obtido por um molde. Desta forma, não é adequada a comparação deste processo com processos contínuos, para matrizes termoplásticas ou reforços em partícula.

2.3.8. Estado da arte

O estado da arte sobre o processo de infusão a vácuo é apresentado na Tabela 9. Este apresenta novos desenvolvimentos e estudos sobre o processo através da análise de artigos científicos.

Tabela 9- Estado da arte sobre a infusão a vácuo

Autor	Trabalho desenvolvido
Yoresta et al [73]	Este estudo teve como objetivo estudar a capacidade do processo VARTM em reforçar a resistência à encurvadura de cantoneiras em aço. O material compósito de fibra de carbono e epóxido, foi fabricado diretamente na cantoneira para substituir a ligação adesiva do material compósito ao aço. Os autores concluíram que a resistência à encurvadura aumenta com o número de camadas e comprimento do material compósito, que este processo tem uma FVF elevada e que o método de previsão da curva de encurvadura proposto é fiável pois os resultados apresentam uma boa correspondência com os resultados obtidos pelos ensaios.
Prabhakar et al [74]	Este artigo estudou, através de um processo modificado de VARTM, a possibilidade de impregnar duas resinas simultaneamente. Os autores utilizaram duas entradas e duas saídas para as diferentes resinas. As camadas superior e inferior foram impregnadas com resina de vinilester ignífuga com partículas de vermiculite, enquanto as restantes camadas foram impregnadas com resina de vinilester. Conclui-se que este método cria materiais compósitos ignífugos com melhores propriedades mecânicas, devido à resina modificada apenas estar presente nas camadas exteriores, o que propicia o equilíbrio entre as propriedades mecânicas superiores de um material compósito de resina normal e as propriedades ignífugas de material compósito feito com resina modificada para ser ignífuga.
Wang et al [72]	Neste estudo foi desenvolvido um novo processo de infusão a vácuo com o propósito de criar um processo com capacidade de ser automatizado. Os autores combinaram dois processos, o VAP e o CAPRI, cujo processo resultante foi denominado <i>Automatically Controlled Pressure Vacuum Infusion</i> (ACPVI). Este processo apresentou resultados superiores aos seus processos base, uma variabilidade menor e a capacidade de produzir componentes de elevada exigência.
Oosterom et al [46]	Este estudo teve como objetivo estudar e comparar os seis processos de infusão a vácuo, VARTM, VAP, CAPRI, SCRIMP, PI, DBVI, mais utilizados na indústria para determinar se as variações apresentam vantagens. Após a obtenção dos laminados por cada processo, estes foram sujeitos a ensaios físicos e mecânicos. Os autores verificaram que os parâmetros do processo e tempo de ciclo variaram significativamente entre processos. A FVF apresentou também variações entre processos, contudo a quantidade de vazios foi reduzida em todos. Os resultados apresentados demonstram que cada processo altera as propriedades finais.
Chen et al [75]	Este artigo teve como objetivo estudar o efeito da utilização de mantas de fibras entre as peles e núcleo de um material compósito <i>sandwich</i> obtido por VARTM. Os provetes <i>sandwich</i> consideram peles de fibra de vidro e resina epóxida e núcleo de espuma de PVC, ao utilizar este processo os autores simplificaram o processo pois o núcleo e as peles são ligados diretamente. Foram comparados os efeitos da colocação de três materiais diferentes nomeadamente, fibra de vidro, fibra de carbono e fibra de aramida. Cujos resultados se comparam com a estrutura <i>sandwich</i> sem manta. Os autores concluíram que a estrutura <i>sandwich</i> com melhores propriedades foi a que utilizou a manta de fibra de vidro, contudo as estruturas <i>sandwich</i> com a manta de fibra de carbono e de fibra de aramida ambas apresentaram melhores propriedades relativamente à sem manta.

Revisão Bibliográfica

3. Desenvolvimento

No presente capítulo é apresentado o desenvolvimento do trabalho prático realizado no intuito da dissertação. No decorrer do capítulo, é descrito o processo experimental e resultados obtidos do trabalho teórico e prático desenvolvido ao longo do estágio.

3.1. Entidade Acolhedora

O INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial é um Centro de Tecnologia e Inovação (CTI), criado em 1986, vocacionado para a realização de atividades de investigação e de inovação de base tecnológica, transferência de tecnologia, consultoria e serviços tecnológicos. Este é uma instituição de utilidade pública, privada, sem fins lucrativos. O INEGI, em 2025, conta mais de 330 trabalhadores, mais de 140 investigadores e conta com um volume de negócios superior a 17 milhões de euros [76].

O INEGI desenvolve a sua atividade com base em unidades especializadas em diversas áreas científicas e tecnológicas. O organograma (Figura 25) demonstra a estrutura e organização do INEGI.

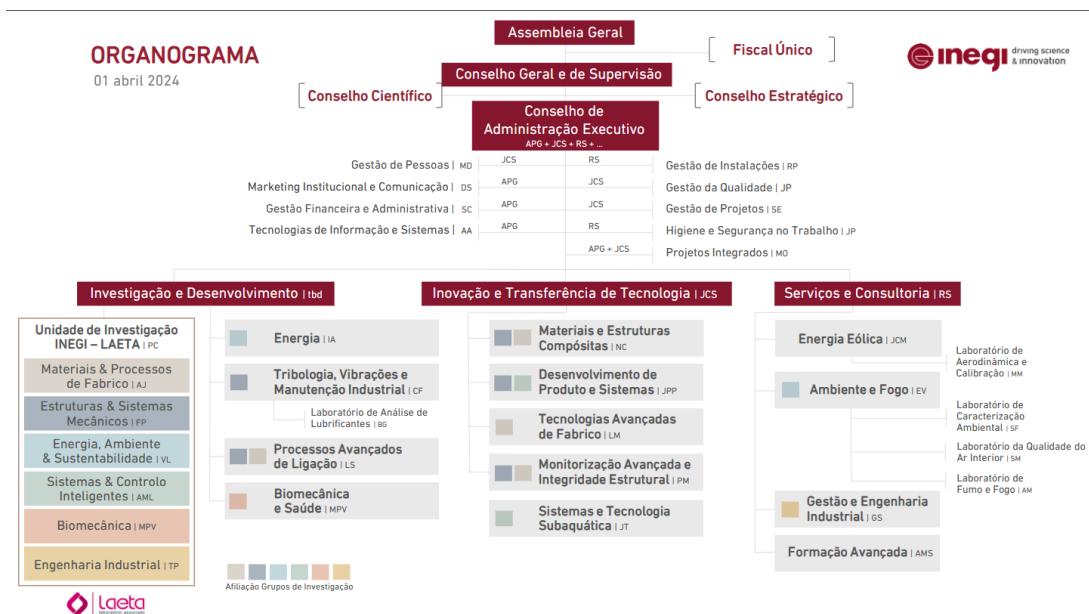


Figura 25- Organograma do INEGI [77]

Desenvolvimento

A presente dissertação foi desenvolvida em contexto de estágio no INEGI na Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas (UMEC), integrado no projeto *Producing Railway Rolling Stock in Portugal* do PRR. A UMEC é uma unidade integrada na área de Inovação e Transferência de Tecnologia (ITT), que trabalha com materiais compósitos nas suas diversas aplicações e processos de fabrico.

O PRR é um programa de âmbito nacional com o objetivo de implementar reformas e investimentos na economia nacional [78]. O projeto *Producing Railway Rolling Stock in Portugal*, tem como objetivo desenvolver e operacionalizar a produção e manutenção de material circulante totalmente nacional. Este projeto conta com múltiplas empresas e entidades, e encontra-se dividido em *Work Packages* (WP) que dividem o projeto pelas diversas áreas funcionais do mesmo. O INEGI é integrado neste projeto através dos WP 2, 3, 5, 7, 8 e 9.



Figura 26- Logótipo do consórcio do projeto [79]

A presente dissertação é integrada no WP 5 *Exteriors – structural, accessibility and environmental details*. O trabalho desenvolvido neste WP teve como objetivo avaliar as condições de fabrico da máscara frontal, de um comboio, em material compósito através do processo de infusão a vácuo. Na Figura 27 são apresentados os integrantes do PRR e as suas respetivas funções no projeto.

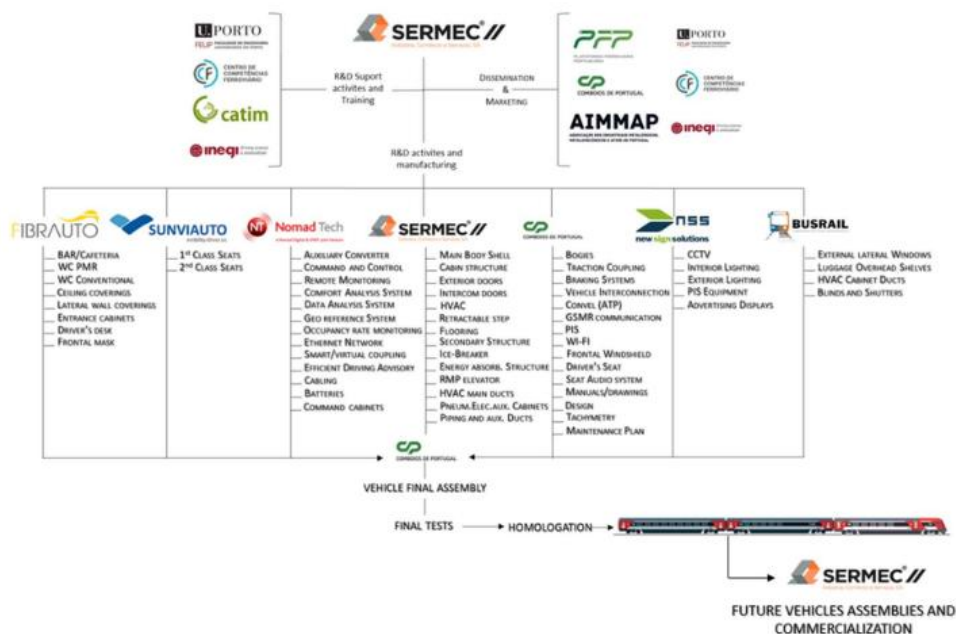


Figura 27 - Integrantes do projeto PRR [79]

3.2. Processo de Infusão a Vácuo Utilizado

O processo de infusão a vácuo utilizado foi o VARTM, processo descrito na secção 2.3.1. O processo foi aplicado com dois métodos diferentes, o método de vácuo aberto e o método de vácuo fechado. Estes métodos diferem apenas no passo número seis do processo, como descrito na secção 2.3.1. Este processo foi utilizado para fabricar placas de material compósito com o objetivo de obtenção de provetes a partir destas. O fabrico foi realizado no Laboratório de Compósitos do INEGI.

O método de vácuo aberto tem a sua saída de resina sempre conectada à bomba de vácuo, o que mantém constante a pressão de vácuo aplicada no saco de vácuo. Esta manutenção constante do vácuo tem como vantagem eliminar perdas de compactação das fibras por perda de vácuo no saco. Este método apresenta desvantagens tais como o uso elevado de energia pela bomba de vácuo, a necessidade constante de utilização da bomba de vácuo e emissão de voláteis provenientes da cura das resinas caso reajam sob vácuo aumentado o TV.

No método de vácuo fechado, a saída da resina é fechada após a infusão da resina pela totalidade das fibras, para manter o vácuo presente no saco de vácuo. O vácuo é mantido apenas pela estanquidade do saco de vácuo e da fita de vedação. Este método simplifica o processo e minimiza o consumo de energia do mesmo, contudo apresenta desvantagens como possibilidade de perda de compactação das fibras por perda de vácuo no saco de vácuo devido a fugas.

O processo aplicado sofreu alterações ao longo das diferentes placas fabricadas, que foram introduzidas com o objetivo de melhorar o processo, eliminar possíveis falhas e cumprir limitações impostas pelas resinas utilizadas. A alteração considerada para melhorar os resultados e eficácia (Figura 28) constitui a redução da dimensão do saco de vácuo. Esta alteração teve o objetivo de reduzir as fugas presentes no saco, para manter uma melhor compactação das fibras pela pressão de vácuo, especialmente no método de vácuo fechado. O saco das primeiras quatro infusões apresentava uma dimensão de 800 x 800 mm², dimensão esta que se verifica proporcionar um excedente de material do saco de vácuo sobre o reforço com o objetivo de diminuir tensões no saco e permitir a conformação do saco a possíveis variações de espessura acentuadas que possam existir na peça a fabricar. Para adequar a dimensão do saco ao reforço, o saco foi colado à mesa com dobras, que são introduzidas na fita selante do saco, após os cantos serem colados nos cantos do limite da área preparada. Desta forma é possível adequar a área utilizável do saco seja adequada à dimensão do reforço. Contudo, as dobras introduziam pontos de perda de vácuo. Para eliminar este problema, os últimos quatro sacos apresentaram uma dimensão de 600 x 600 mm². Com esta dimensão, o saco fica totalmente esticado sobre o reforço, o que eliminou a necessidade de dobras e conseqüentemente as fugas que estas provocavam. Esta alteração é possível pois estão a ser fabricadas placas planas de espessura reduzida e não há necessidade de conformação a contorno de um molde.

Desenvolvimento

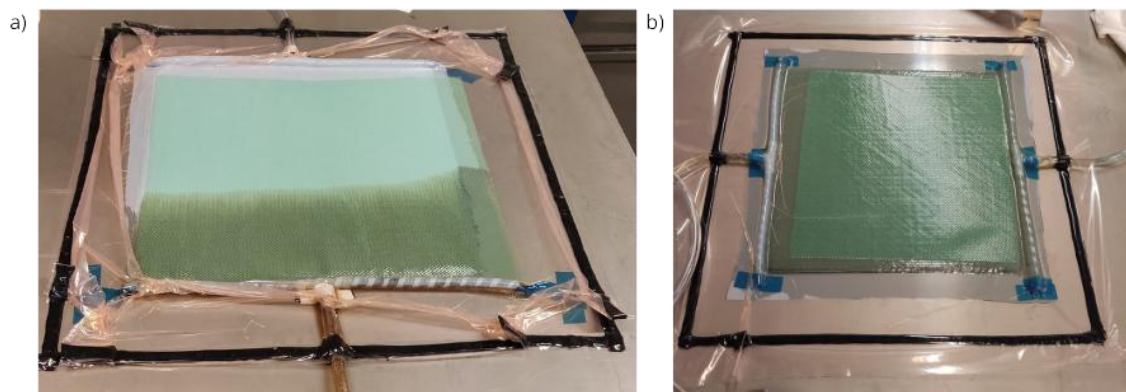


Figura 28- a) Saco de vácuo de 800 x 800 mm² e b) saco de vácuo de 600 x 600 mm²

Observou-se que o saco das últimas quatro placas apresenta uma melhor compactação no método de vácuo fechado comparativamente ao saco das primeiras quatro. Esta melhor compactação deve-se à maior estanquidade permitida por este. O saco com as dimensões de 600 x 600 mm² apresenta também maior facilidade de utilização devido um manuseamento mais fácil e uma aplicação sobre o reforço mais simples.

A utilização da resina da Mäder obrigou à alteração dos consumíveis (Figura 29). De acordo com as indicações do fabricante, quando utilizada com *peelply* normal, a resina perde as suas características ignífugas pois os aditivos ficam retidos no tecido deste. Para resolver este problema, foi utilizado um *peelply* adequado com *flow mesh* integrado, que levou a outra alteração do material consumível utilizado.

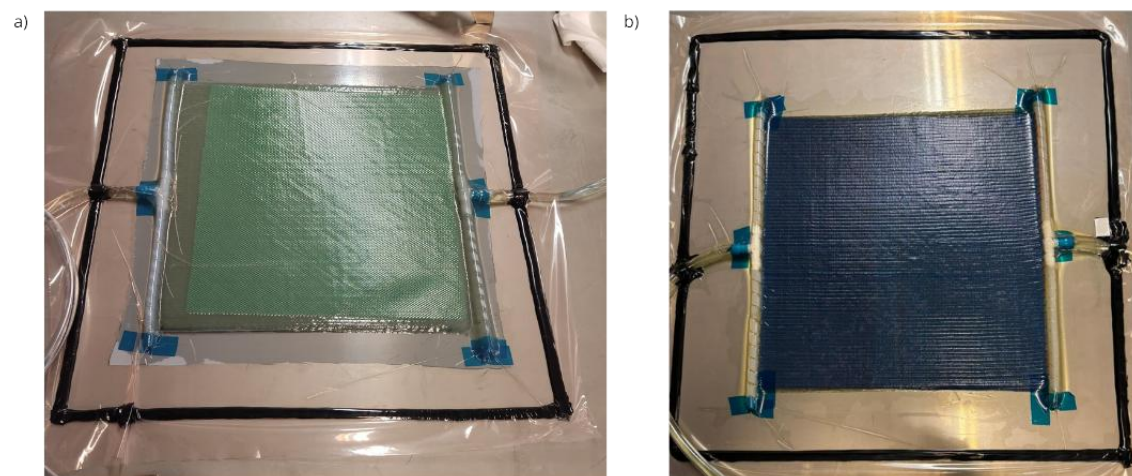


Figura 29 - a) *Peelply* e *flow mesh* separados e b) *peelply* e *flow mesh* integrados

O processo de fabrico utilizado assim como os requisitos de conformidade com a norma EN 45545-2 HL2 R17, influenciaram a escolha das resinas da matriz e as fibras do reforço do material compósito, assim como os consumíveis utilizados neste processo. As placas produzidas utilizaram quatro resinas diferentes. Estas são resinas específicas e otimizadas para o processo de infusão a vácuo e fabrico de peças para material circulante.

Para identificação e rastreabilidade das resinas utilizadas no processo de fabrico, estas foram codificadas de acordo com as letras de identificação da Tabela 10. As letras de identificação tiveram também como propósito permitir a identificação dos provetes retirados de cada placa.

Tabela 10 - Codificação dos materiais utilizados

Marca	Nome comercial	Letra de identificação	Material
Lavesan	Lerpol 6814 A1	L	Vinilester
Mäder	Nuvocryl fr 60-90 G	M	Poliéster
Scott Bader & Hegardt	Crystic VE 679-03PA	H	Vinilester modificado com dicitopentadieno (DCPD)
Bufo	Firestop s 425	B	PoliDicitopentadieno (pDCPD)

A resina Lerpol 6814 A1, da Lavesan (L) (Figura 30 a), é uma resina de vinilester acelerada, não tixotrópica e com retardantes líquidos. Esta resina é especialmente formulada para utilização em infusão a vácuo de reforços de fibra de vidro, e possibilita o cumprimento dos requisitos HL2 R1e HL2 R17 da norma EN 45545-2 em conjunto com *gelcoat* adequado [80].

A resina Nuvocryl FR 60-90 G, da Mäder (M) (Figura 30 b), é uma resina ignífuga de poliéster insaturado, não pré acelerada, de baixa viscosidade, especialmente formulada para aplicação em peças de alta resistência em transportes públicos. Para cumprir os requisitos HL2 R1 e HL2 R17 da norma EN 45545-2, esta resina deve ser utilizada em conjunto com *gelcoat* adequado [81].

A resina Crystic VE 679-03PA, da Scott Bader (H) (Figura 30 c), é uma resina de vinilester modificada com DCPD, pré acelerada para infusão. Esta resina cumpre o requisito HL2 R17 da norma EN 45545-2 quando utilizada com *gelcoat* adequado [82].

A resina Firestop S 425 da Büfa (B) (Figura 30 d), é uma resina de pDCPD especial dissolvido em estireno, tixotrópica, com retardante líquido e pré acelerada. A resina cumpre os requisitos HL2 R7 e HL2 R17 quando utilizada com o *gelcoat* adequado [83].



Figura 30 - a) Resina H, b) Resina L, c) Resina M e d) Resina B

Para a construção do código de identificação das placas e provetes, foi utilizada a letra A para as placas obtidas pelo método de vácuo aberto e a letra B para as placas obtidas pelo método de vácuo fechado. Na Tabela 11 está apresentada a codificação das placas de acordo com o método de VARTM utilizado.

Desenvolvimento

Tabela 11 - Código da placa de acordo com o método VARTM

Método	Resina L	Resina M	Resina H	Resina B
Vácuo aberto	LA	MA	HA	BA
Vácuo fechado	LB	MB	HB	BB

Estas resinas apresentam propriedades mecânicas e físicas diferentes. Na Tabela 12 estão apresentadas as propriedades mecânicas e físicas, valores de referência obtidos pelo fabricante, mais importantes das resinas. As fichas técnicas destas resinas e do tecido de reforço estão apresentadas no Anexo A.

Tabela 12- Valores de referência de propriedades mecânicas e físicas [80, 81, 82, 83]

Letra de identificação (Tabela 10)	σ_m (MPa)	Dureza Barcol	ρ (g/cm ³)	Gel time (min)
L	57	40	1	35 ±5
M	43	60	1,25	30-45
H	62	31	1,065	120
B	55	-	1,1	20-30

O *gel time* apresentado é de acordo com os componentes misturados e utilizados na resina para esta aplicação.

O reforço utilizado para o fabrico das placas de material compósito (Figura 31) foi igual em todas o tecido Q-E-1184g/m²-1270mm da Saertex, o reforço é um tecido *tricot-warp* [-45°/90°/45°/0°], quase isotrópico, de fibra de vidro E. A sua gramagem é de 1184 g/cm² e as costuras são em filamento de poliéster [84].

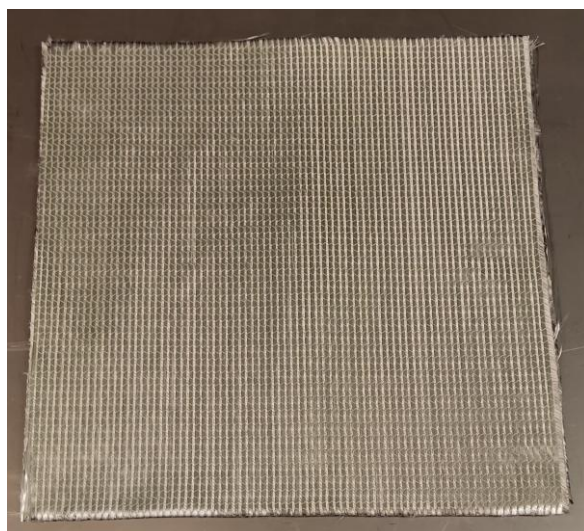


Figura 31 - Tecido utilizado como reforço

Os consumíveis utilizados durante o processo também influenciam o resultado e o funcionamento do processo. O saco de vácuo utilizado foi o Stretchlon 800 da Airtech (Figura 32 a). Este saco de vácuo é fabricado em nylon e recomendado para as resinas utilizadas. O

peelply utilizado nas resinas Lerpól 6814 A1, Crystic VE 679-03PA e Firestop S 425 foi o Econolease da Airtech (Figura 32 b), um tecido de nylon impregnado com silicone e o *flow mesh* foi o Greenflow 75 da Airtech (Figura 32 c). Na resina Nuvocryl FR 60-90 G, o *peelply* utilizado foi o Dualmesh da Gefim (Figura 32 d), que integra um *flow mesh* (ambos em *High Density Polyethylene* ou HDPE). Estes podem ser chamados de tecidos técnicos.

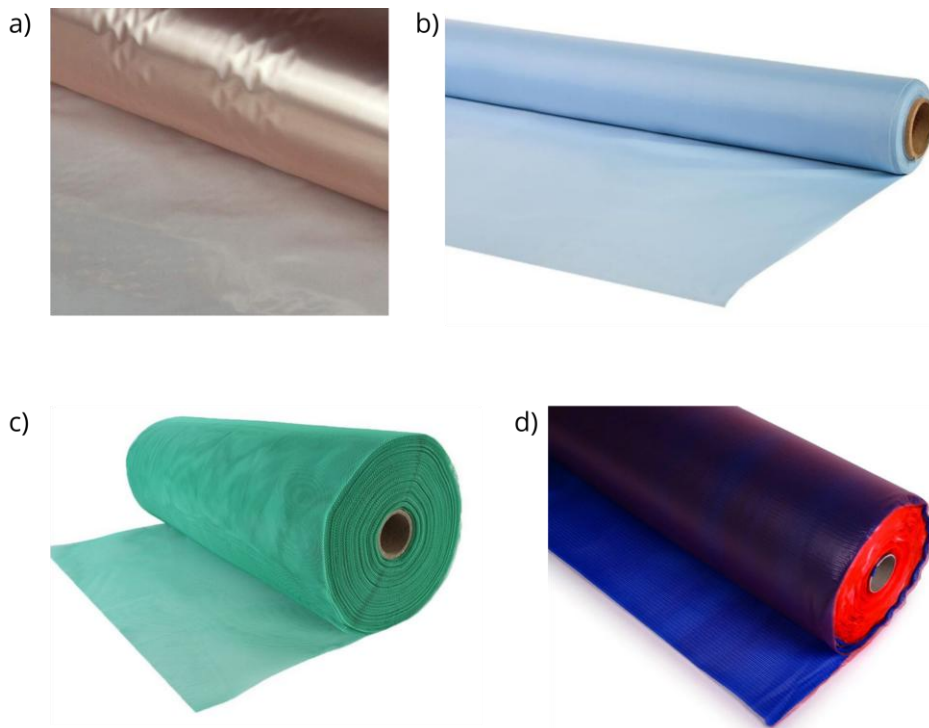


Figura 32 - a) Saco de vácuo [85], b) *peelply* [86], c) *flow mesh* [87] e d) *peelply* e *flow mesh* integrados [88]

Para selagem do saco de vácuo à superfície foi utilizada a fita selante Airseal 2 da Airtech (Figura 33 a). Foi também utilizada fita desmoldante para fixar as espirais e tubos à mesa de maneira a garantir que o seu posicionamento era o correto durante todo o processo. A fita utilizada para este efeito foi a Flashbreaker 1 da Airtech (Figura 33 b).



Figura 33 a) Flashbreaker 1 [89] e b) Airseal 2 [90].

Os restantes consumíveis utilizados para o sistema de vácuo foram a mangueira de vácuo para a entrada e saída da resina, representada na Figura 34 a. A distribuição da resina é facilitada pela espiral de nylon, Nylonspiral ½ da Airtech (Figura 34 b), esta serve para distribuir a resina por toda a largura do *flow mesh* a sua conexão à mangueira de vácuo é através do conector em

T, ACIT10PP da Diatex (Figura 34 c). A conexão da saída de vácuo à armadilha de resina é feita através do tubo pneumático Sang A 6 mm (Figura 34 d).



Figura 34 – a) Conector em T, b) espiral, c) tubo pneumático e d) mangueira de vácuo

3.3. Análise Crítica e Limitações Encontradas

Ao analisar o processo VARTM, podem ser apontadas algumas limitações da sua aplicação e durante a sua aplicação. As limitações da sua aplicação são as que impedem a implementação do processo VARTM, seja esta por incompatibilidade de objetivos, materiais e funcionalidade ou resultados inadequados obtidos pelo processo. As limitações durante a sua aplicação causam resultados inadequados ou incompatíveis com o projetado por limitações que surgem no decorrer do processo. Estas podem ser corrigidas minimizando os efeitos resultantes. Contudo, estas podem também causar a inutilização da aplicação do processo.

O processo VARTM apresenta limitação da compactação de fibras devido à pressão de compactação ser aplicada pelo vácuo. O vácuo utilizado neste processo aplica uma baixa força de compactação da matriz e reforço, a força aplicada pelo vácuo é diretamente proporcional à pressão de vácuo, a pressão de vácuo utilizada neste processo é de baixo vácuo. Comparado a outros processos, no processo VARTM a força resultante da pressão aplicada é muito inferior, cerca de 5 a 10 vezes. Devido a esta baixa compactação há uma redução da FVF e aumento do TV [20, 91, 92].

Algumas das limitações deste processo devem-se à falta de modelos analíticos ou numéricos de simulação e bases de dados de resultados. Existe dificuldade da previsão das propriedades finais

mecânicas e físicas do material compósito devido à elevada variabilidade do processo e à inexistência de métodos de previsão da aplicação do processo que correlacionem os parâmetros utilizados com os resultados obtidos. Estas limitações afetam a previsão de propriedades do material compósito através das fórmulas apresentadas na secção 2.2.7. Esta limitação implica que a aplicação deste processo de fabrico esteja sempre pendente de estudo prático para avaliação dos resultados [93, 94].

A elevada variabilidade deste processo deve-se ao elevado número de parâmetros e fatores que influenciam este processo. Devido à impossibilidade da criação de sacos de vácuo totalmente estanques e que apresentem sempre taxas de perdas de vácuo constantes, mesmo quando estes apresentam uma estanquidade adequada ao processo de fabrico, observam-se alterações dos resultados e causam variações, mesmo que reduzidas, dos parâmetros do processo nomeadamente a pressão de vácuo.

Por outro lado, apesar de a determinação da compatibilidade entre reforço e a matriz poder ser estimada de acordo com as características dos materiais, devido às limitações deste processo de fabrico, a compatibilidade real pode diferir da estimada. Por este motivo, a combinação ótima de reforço e matriz precisa sempre de ser alvo de um estudo iterativo para determinação dos parâmetros e combinações ótimas.

O processo VARTM, apesar de apresentar estas múltiplas limitações, é um processo com facilidade, simplicidade e sucesso de aplicação. As limitações derivadas da falta de capacidade de previsão, simulação de compatibilidade e resultados podem ser ultrapassadas através de estudos de aplicação do processo para determinação de propriedades e características que permitam determinar se é adequada a aplicação do processo e dos materiais escolhidos. No entanto, considera-se difícil a criação de uma base de dados para referência de propriedades esperadas, materiais compatíveis e aplicações, devido à baixa disseminação deste processo de fabrico pelas indústrias que consomem e fabricam de materiais compósitos. A necessidade dos estudos práticos complica a aplicação deste processo. Contudo após a execução dos estudos de aplicação prática do processo, os resultados permitem a instrumentalização e serialização do processo de fabrico, tendo conta a sua variabilidade através de controlo e fatores de segurança elevados.

3.4. Objetivos Específicos

Todo o trabalho desenvolvido, em contexto de estágio, teve como base os objetivos estabelecidos no WP5 do PRR. Contudo, por se tratar de uma dissertação de tese de mestrado, em contexto de estágio, alguns objetivos apresentam apenas trabalho no âmbito desta. O objetivo principal deste trabalho consiste na avaliação e operacionalização do processo de fabrico VARTM para o fabrico de uma máscara frontal de material circulante. O estudo de aplicação do processo passou pela seleção dos consumíveis adequados, método de utilização destes e etapas do processo necessárias à obtenção dos resultados desejados. O processo de fabrico apresentou melhorias ao longo da sua aplicação, devido à deteção e correção de falhas que surgiram durante toda a sua aplicação.

Desenvolvimento

Os objetivos delimitados para o desenvolvimento do trabalho foram os seguintes:

1. Fabrico do material compósito, utilizando as resinas impostas como matriz, pelo processo de VARTM descrito no 3.2:
 - a. Estudo teórico sobre o processo;
 - b. Implementação do processo;
 - c. Análise do processo implementado;
 - d. Melhoria do processo implementado;
2. Validação dos resultados através dos ensaios físicos e mecânicos;
 - a. Ensaio de tração
 - b. Ensaio de micrografia;
 - c. Ensaio de queima.
3. Avaliação dos resultados para seleção do material a ser utilizado e para futura inserção numa base de dados de valores de referência do material compósito para projeto mecânico;
4. Transferência de tecnologia para posterior aplicação final do processo por parte dos parceiros industriais do projeto;
5. Contribuição para base de dados internas da entidade acolhedora.

Os quatro primeiros objetivos são comuns entre a presente dissertação e o projeto PRR, o quinto objetivo é apenas relacionado à presente dissertação. Estes objetivos foram os utilizados para determinar cada etapa do trabalho.

3.5. Requisitos e Limitações

Os requisitos e limitações podem ser divididos em duas áreas distintas, a área do material compósito e a área do trabalho total desenvolvido no âmbito da participação no WP5 do PRR. Devido à integração de vários participantes neste WP, o trabalho esperado é a operacionalização do processo de fabrico e avaliação do material compósito obtido para determinar qual resina oferece as melhores propriedades mecânicas possíveis. As propriedades mecânicas determinadas nos laminados têm como objetivo serem utilizadas por terceiros para cálculos e o processo de fabrico utilizado para a máscara frontal de um comboio.

Os requisitos que tidos em conta durante o desenvolvimento do trabalho surgem com a definição do objetivo do WP projeto PRR. O desenvolvimento da máscara frontal para uma carruagem *push and pull*, como descrito no projeto de maneira simplificada, é uma peça fabricada em material compósito, com capacidade de incorporar o vidro frontal que suporte 250 km/h assim como iluminação exterior e equipamento de sinalização.

Os requisitos e limitações para os resultados, do material compósito, são os que permitem o cumprimento da norma EN 45545-2 HL2 R17. Esta norma impõe os requisitos serem alcançados

pelo material compósito obtido no âmbito da segurança relativamente aos riscos de fumo e fogo na sua aplicação final no material circulante. As limitações impostas diretamente por esta norma manifestam-se nos materiais utilizados, pois estes definem o comportamento de fumo e fogo a ser cumprido. Estas limitações restringem a utilização, como matriz do material compósito, a resinas ignífugas e a sua conjugação com um *gelcoat* ignífugo na peça a ser utilizada no material circulante.

Um dos objetivos do trabalho é a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos materiais compósitos obtidos, contudo os requisitos mecânicos do material compósito não apresentam valores definidos. Neste campo, pretende-se obter as melhores propriedades mecânicas possíveis, pelo que as resinas com melhores propriedades mecânicas são as mais favorecidas a serem utilizadas no componente final. Por outro lado, um dos requisitos do WP cujo projeto está integrado é a escolha dos materiais a serem utilizados.

As limitações relativas ao WP surgem das imposições feitas pelo consórcio do projeto PRR e da norma EN 45545-2 HL2 R17.

As limitações de materiais e processos de fabrico impostos foram os seguintes:

1. Processo de fabrico, VARTM;
2. Material do reforço do material compósito, fibra de vidro;
3. Material da matriz do material compósito, resinas que cumprem a norma EN 45545-2 HL2 R17.

A infusão a vácuo foi imposta com o objetivo de substituir o processo de moldação manual, atualmente utilizado, com o objetivo de modernizar o processo e capacitar os parceiros do projeto para a sua utilização. Este foi o processo escolhido por ser adequado ao fabrico de componentes da dimensão elevada necessária, comum no fabrico de componentes de veículos pesados e material circulante. O processo impôs as suas próprias limitações em relação aos materiais utilizados. Estas limitações direcionaram a escolha dos materiais numa primeira fase.

O material do reforço, a fibra de vidro, foi imposto por cumprir os requisitos do PRR de material eficiente e ignífugo de custo benefício adequado.

O material da matriz, designadamente as resinas L, M, H, B, foram impostas para avaliação devido cumprirem os requisitos da norma EN 45545, serem específicas para o processo de infusão, compatíveis com a fibra de vidro do reforço.

3.6. Metodologia Utilizada

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho desta presente dissertação seguiu uma mistura de uma aplicação científica e uma aplicação industrial devido este trabalho ser desenvolvida em contexto de estágio. O conhecimento prévio e limitações industriais delinearão de maneira simplificada a metodologia utilizada. O objetivo do plano de ensaios foi simplificar o processo e ser desenvolvido para efeitos de um trabalho de engenharia aplicado à indústria e não de um trabalho científico.

A metodologia pode ser dividida em duas partes separadas, a parte do plano de ensaios especificamente o tipo de ensaios a realizar de acordo com as necessidades do projeto e na parte dos métodos de ensaios em que são escolhidas as normas a seguir para a realização dos ensaios planeados.

3.6.1. Plano de ensaios

A aplicação do processo de VARTM, carece sempre de uma validação para determinação da viabilidade para a aplicação específica. Esta validação é importante para determinar qual método, vácuo aberto ou fechado, quais os consumíveis e se o processo é o adequado a utilizar.

A avaliação deve ser realizada por meio de ensaios mecânicos e físicos, os ensaios mecânicos são nomeadamente ensaios de tração para a determinação da resistência do material compósito. Os ensaios físicos são os ensaios de micrografia para determinação do TV e os ensaios de queima para determinação do TV, FVF e fração volúmica de resina (FVR) no material compósito. Com os dados obtidos nestes ensaios é possível confirmar a viabilidade da aplicação do processo e obtenção de resultados adequados ao propósito escolhido.

Tendo em conta estes pressupostos e as necessidades do consórcio o plano de ensaios criado foi para determinar as propriedades mecânicas e físicas mais importantes das resinas utilizadas e processo para determinação da mais adequada com o propósito dessa constituir a máscara frontal.

Foi então determinado que os ensaios a realizar seriam os seguintes:

- Ensaios de tração, para determinar o E e σ_m ;
- Ensaios de queima, para determinar FVF e de resina e TV;
- Ensaios de micrografia, para determinar o TV.

Não foi necessário o estabelecimento de um DoE, pelo facto de que apenas existe a variação de um parâmetro entre os dois métodos estabelecidos para o processo de fabrico, o método de vácuo aberto e o método de vácuo fechado. Este procedimento também não foi requerido devido aos conhecimentos e experiência existentes no consórcio e INEGI, que definiram à partida os parâmetros a analisar. Por outro lado, para seguimento do projeto foram tidos em conta pressupostos que simplificaram e delimitaram o planeamento dos ensaios. Uma das simplificações existentes consistiu na utilização da pressão de vácuo determinada como ideal em projetos anteriores, o que evitou essa avaliação.

Foram considerados estes dois métodos para o VARTM, pois existe a possibilidade de as resinas reagirem sob vácuo, o que pode conduzir à ebulição destas e introdução de vazios. Esta reação é possível devido à diferença de pressão entre a saída e a entrada. No entanto, sabe-se que esta diferença é eliminada no método de vácuo fechado pois, ao fechar a entrada e saída, a pressão dentro do saco de vácuo equaliza. Por outro lado, no método de vácuo aberto existe constantemente diferença de pressão entre a entrada e a saída devido à manutenção de pressão por parte da bomba de vácuo. Com o objetivo de avaliar a ebulição das resinas, foram avaliadas as duas variantes do processo.

3.6.2. Métodos de ensaio

Os ensaios selecionados visaram sempre a avaliação, o mais precisa possível, das propriedades mecânicas e físicas do material compósito obtido para estas posteriormente serem utilizadas no projeto, desenho e simulação da máscara frontal. Os ensaios escolhidos foram de caráter destrutivo para a avaliação mais fiável das propriedades, por este motivo as placas fabricadas tiveram como único objetivo a obtenção de provetes, apesar da sua produção servir também para avaliação da aplicação dos procedimentos definidos para o processo. Como tal não foram necessários ensaios não destrutivos.

Os ensaios selecionados dividiram-se em três áreas distintas, ensaios mecânicos, ensaios físicos e ensaios de fumo e fogo. As normas selecionadas para os ensaios estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Normas aplicáveis aos ensaios

Ensaio	Tração	Micrografia	Queima	Fumo e Fogo
Norma	ASTM D3039/D3039M	Não aplicável	ASTM D3171	EN 45545-2

Estas normas foram selecionadas por serem especificamente para materiais compósitos e adequarem-se aos métodos e tipo de ensaios escolhidos. Apesar da escolha destas, existem outras normas para estes ensaios, contudo devido à experiência de utilização destas no INEGI foram determinadas como as melhores normas a utilizar.

Os ensaios de fumo e fogo não se enquadram no âmbito desta dissertação, assim como a seleção dos ensaios utilizados, a determinação e escolha de ensaios a realizar foi feita previamente e informada como metodologia a cumprir.

3.7. Procedimento Experimental

Neste capítulo será explorado todo o trabalho experimental desenvolvido no âmbito da presente dissertação. O capítulo começa com a descrição do fabrico do material compósito que é posteriormente processado de acordo com o descrito no segundo ponto do capítulo e ensaiado como descrito no terceiro ponto do capítulo.

3.7.1. Fabrico das placas

O procedimento experimental consiste no fabrico das placas de material compósito, extração de provetes das placas, medição de cotas dos provetes e realização de ensaios. O processo de fabrico utilizado foi o VARTM, como descrito no capítulo 3.2. Este processo foi conduzido, em ambos os métodos, para as quatro resinas escolhidas, o que permitiu obter oito placas para obtenção de provetes de tração, micrografia e ensaios de queima.

Desenvolvimento

O fabrico das placas consiste na realização dos seguintes passos:

1. Corte das camadas de reforço;
2. Corte do saco de vácuo, *peelply* e *flow mesh*;
3. Limpeza e preparação da mesa;
4. Aplicação de desmoldante na superfície da mesa;
5. Preparação do saco de vácuo;
6. Preparação dos tubos, armadilha de resina e bomba de vácuo;
7. Colocação das camadas de reforço na mesa, *peelply*, *flow mesh* e saco de vácuo;
8. Compactação do reforço e teste da estanquidade do saco;
9. Preparação da resina;
10. Injeção da resina e monitorização da impregnação total da resina nas fibras;
11. Corte da admissão de resina;
12. Corte da saída no caso de vácuo fechado;
13. Cura do material compósito sobre vácuo.

O passo número um é o corte das camadas de reforço, que foi realizado com uma tesoura elétrica (Figura 35). As camadas de reforço são cortadas com dimensão de 400 x 400 mm², e por placa são necessárias quatro camadas de reforço.



Figura 35 - Tesoura elétrica

O passo número dois consiste no corte do saco de vácuo, *peelply* e *flow mesh*. O corte destes é feito com uma tesoura. O saco de vácuo foi cortado com dimensão de 800x800 mm² nas quatro primeiras placas, e de 600 x 600 mm² nas últimas quatro placas. O *peelply* foi cortado com dimensão de 450x450 mm² de maneira a garantir que cobria a totalidade do reforço. O *flow mesh* foi cortado com dimensão de 400 x 350 mm², de maneira a cobrir a largura do reforço e

não sobrepor a espiral de saída da resina. No caso da resina Nuvocryl FR 60-90 G, como esta utiliza um *peelply* com *flow mesh* integrado, a dimensão utilizada foi de 400 x 400 mm².

O passo número três corresponde à limpeza e preparação da mesa a ser utilizada como molde da placa (Figura 36). A limpeza da mesa foi feita com o limpador Loctite Frekote PMC (Figura 37 a). São aplicadas três camadas deste, com um intervalo de cinco minutos entre aplicações para garantir uma limpeza adequada da superfície e eliminar possíveis contaminantes que possam prejudicar a placa resultante. A preparação da mesa consiste na marcação, com fita, da área com a dimensão de 500 x 500 mm² onde vai decorrer a infusão (Figura 36).

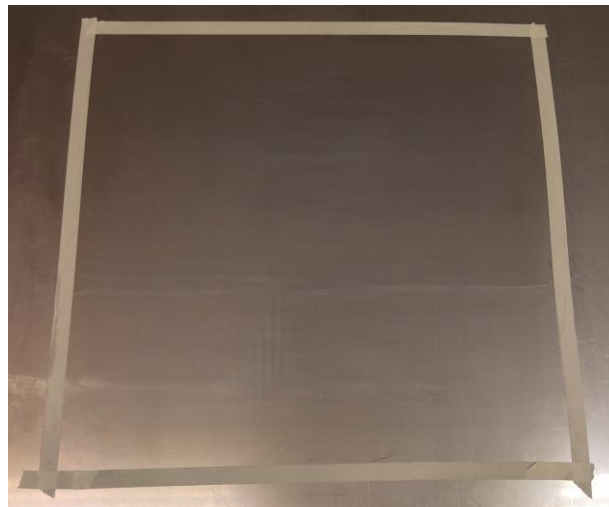


Figura 36 - Mesa com a área delimitada e preparada

O passo número quatro consiste na aplicação de desmoldante na superfície da mesa na área preparada no passo número três. O desmoldante Loctite Frekote 770-NC (Figura 37 b) é aplicado em três camadas, com um intervalo de cinco minutos entre cada, por toda a área delimitada. Este passo é necessário para garantir a desmoldagem da placa após a cura.



Figura 37 - a) Loctite 770- NC e b) Loctite PMC

O passo número cinco desenvolve a preparação do saco de vácuo, cujo procedimento varia de acordo com a dimensão do saco de vácuo. Na dimensão de 800 x 800 mm², este passo consiste na colagem da fita selante pelo perímetro exterior do saco, garantindo uma colagem total da

Desenvolvimento

fita ao saco e a ausência de danos no saco e na fita. No saco com 600 x 600 mm², a colagem da fita foi feita em um quadrado de 500 x 500 mm² centrado no saco.

O passo número seis corresponde à preparação dos tubos de infusão e armadilha de resina, que consiste na montagem do conector em T na espiral e nas mangueiras de vácuo de entrada e de saída. A mangueira de vácuo da saída é conectada à armadilha de resina através de tubo pneumático, a conexão é isolada com fita selante para garantir que não existem perdas de vácuo, a armadilha (Figura 38 a) é conectada à bomba de vácuo (Figura 38 b).

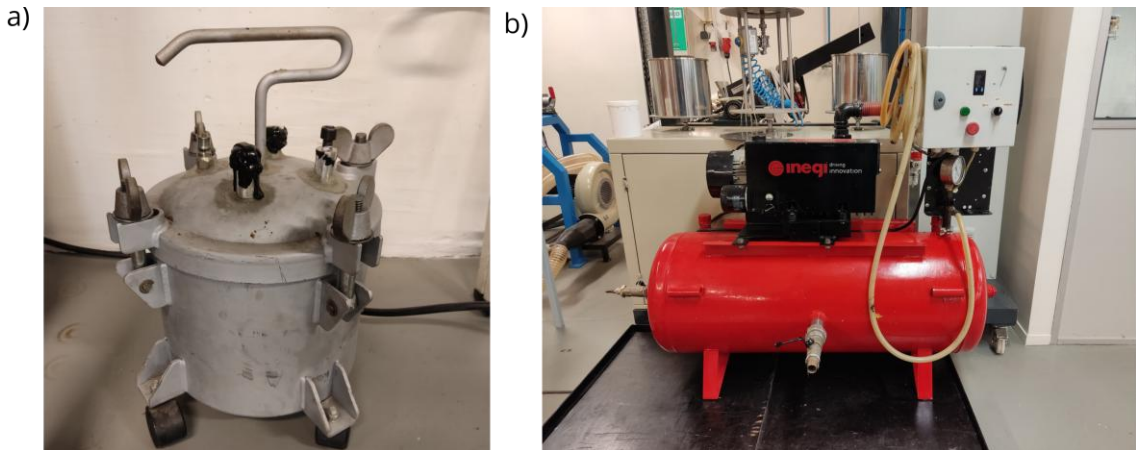


Figura 38 - a) Armadilha de resina e b) bomba de vácuo

O passo número sete consiste na colocação das camadas de reforço na superfície da mesa sobre a área preparada, seguida da colocação do *flow mesh* por cima do reforço e *peelply* por cima deste (Figura 39). Estes são mantidos em posição com recurso à fita desmoldante.

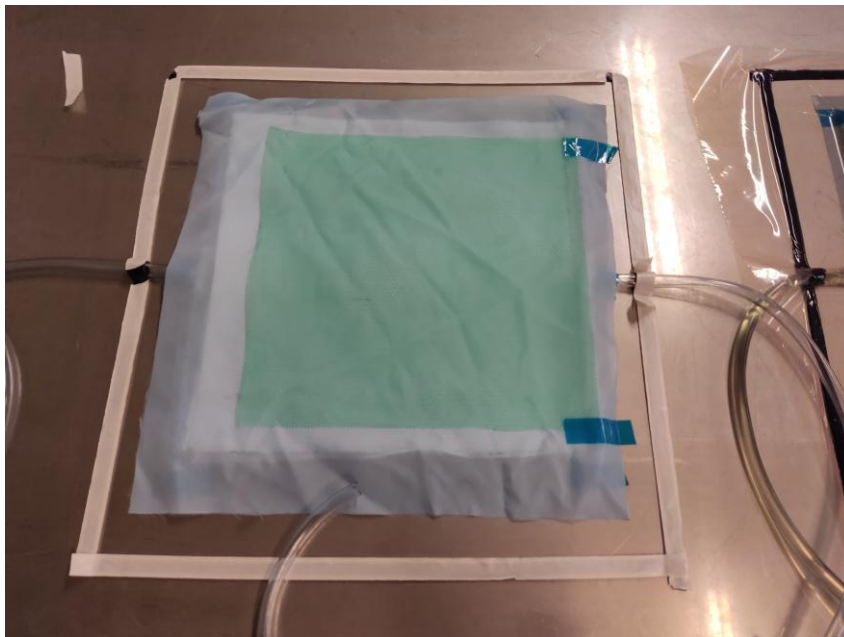


Figura 39 - Tecidos técnicos posicionados

O passo número oito consiste na compactação das camadas do reforço e dos tecidos técnicos e o subsequente teste de estanquidade do saco de vácuo. O teste de estanquidade foi feito da seguinte maneira:

1. Aplicação de vácuo de 900 mbar com recurso à bomba de vácuo (Figura 38 b);
2. Monitorização da pressão de vácuo no saco durante dez minutos. Caso durante esses dez minutos existir uma queda de 20 mbar ou superior na pressão de vácuo instalada no saco, o mesmo deve ser revisto para eliminar as fugas. Caso não seja possível a eliminação destas é necessário aplicar um saco de vácuo novo.

O passo número nove corresponde à preparação da resina. A preparação da resina foi feita de acordo com as indicações dos fabricantes. Na Tabela 14 estão apresentados os valores dos componentes misturados com a resina para permitirem a sua ativação e consequente utilização. Em todas as placas foram utilizados 800 g de resina. Estes componentes são pesados numa balança de precisão e misturados num balde (Figura 40). Após a mistura destes componentes é iniciada a contagem do *gel time* de cada resina. No caso da resina M foi adicionado o inibidor e o acelerador para aumentar o *gel time* desta resina e este adequar-se ao tempo do processo de fabrico. O *gel time* mínimo necessário era de 30 minutos.

Tabela 14 - Componentes em percentagem de peso da resina

Resina	Catalisador MEKP (Figura 41 a)	Inibidor (Figura 41 b)	Acelerador (Figura 41 c)
L	2%	-	-
M	2%	0,10%	0,20%
H	2%	-	-
B	2%	-	-



Figura 40 - Pesagem dos componentes

Desenvolvimento

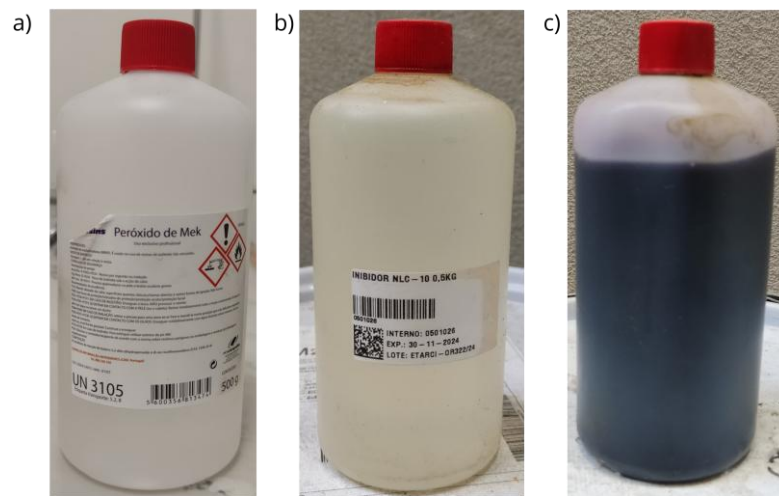


Figura 41 - a) Catalisador, b) inibidor e c) acelerador

O passo número dez (Figura 42) consiste na injeção da resina na mangueira de entrada e monitorização da injeção. A injeção é feita abrindo a mangueira de entrada e a mergulhando no balde de mistura da resina. Após a injeção, é monitorizada a penetração e progressão da resina pelo reforço e *flow mesh*.



Figura 42 - Injeção da resina

O passo número onze (Figura 43) consiste no corte da admissão da resina pelo fecho da mangueira de entrada. Este corte foi feito quando a resina preencheu a espiral e conector em T da mangueira de saída.

O passo número doze (Figura 43) consiste no corte da saída de resina pelo fecho da mangueira de saída. Este corte é feito sempre após o corte da entrada para garantir que não existem comprometimentos do vácuo no saco.

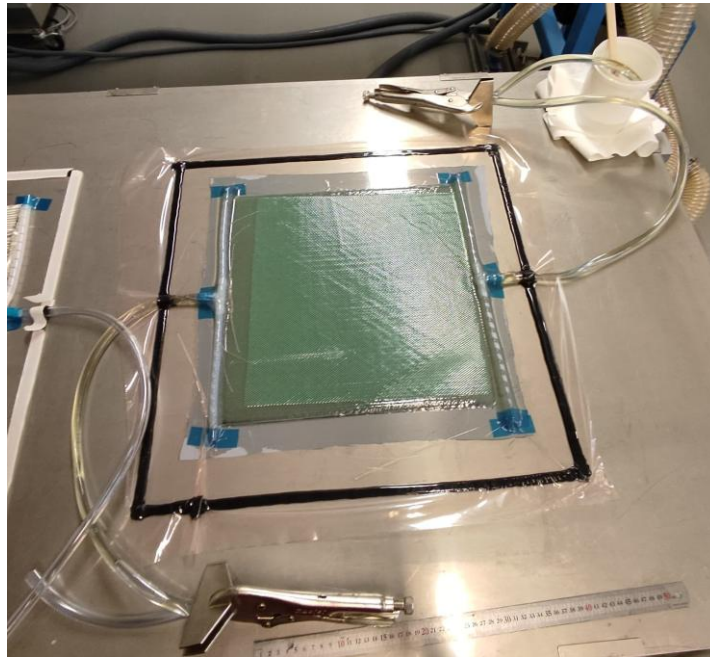


Figura 43 - Corte da entrada e da saída de resina

O passo número treze e final consiste na cura da resina sobre vácuo. Esta cura decorre durante o tempo recomendado pelos fabricantes.

Todas as placas, exceto a LB, passaram pelo processo de cura da resina sob vácuo. A placa LB não teve a sua cura sob vácuo devido à perda de pressão de vácuo decorrente de fugas no saco de vácuo. Esta perda de vácuo levou à diminuição da compactação das fibras e resina, à cura sob pressão atmosférica e à introdução de bolhas de ar na matriz. A placa HB teve também problemas de compactação durante a sua cura devido a fugas existentes no saco de vácuo. Todavia, esta não apresentou perda de vácuo total como a placa LB.

As limitações encontradas na utilização do processo VARTM atual dizem respeito à perda de vácuo no saco durante o processo. Esta perda de vácuo implica mais dificuldades no método de vácuo fechado, pois a perda de vácuo implica a diminuição total ou parcial da compactação das fibras e impregnação da resina da matriz nas fibras de reforço. No método de vácuo aberto, esta perda introduz as mesmas carências do método de vácuo fechado, bem como a diminuição parcial ou total da compactação e impregnação. Contudo, devido a este método ter a sua saída constantemente ligada à bomba de vácuo, a pressão de vácuo é mantida constante, com pequenas variações. Este funcionamento constante implica a saída constante de resina por esta ser puxada pela diferença de pressão, o que leva a um movimento constante da resina e pode implicar uma cura inadequada.

Desenvolvimento

Para solucionar este problema a dimensão do saco foi reduzida, como descrito no capítulo 3.2. Não foram necessárias outras alterações ao processo devido a esta solucionar os problemas de perda de vácuo encontrados.

As limitações causadas pelos materiais utilizados também apresentam significância, já que estes influenciam diretamente os materiais consumíveis a utilizar no processo. Caso não esta limitação não seja tida em conta fica comprometida a viabilidade da utilização da resina no processo. Por exemplo, de modo a ultrapassar a limitação encontrada na resina M, o *peelply* e *flow mesh* foram alterados como descrito no capítulo 3.2.

Apesar destas limitações e dificuldades encontradas, foi possível fabricar todas as placas necessárias com resultados adequados que permitiram o seguimento do processo de avaliação, nomeadamente a obtenção de provetes para ensaios. Tendo em conta todas as limitações e dificuldades mencionadas anteriormente, o processo mantém a sua simplicidade de execução e aplicação, requerendo apenas a realização de um estudo de aplicação do processo antes da sua aplicação final.

3.7.2. Fabrico dos Provetes

Os provetes foram extraídos, por corte com uma serra circular com disco diamantado, das placas fabricadas após a cura. Estes foram retirados de várias zonas da placa para avaliação de possíveis diferenças entre estas. Os provetes foram obtidos de acordo com a representação esquemática da Figura 44.

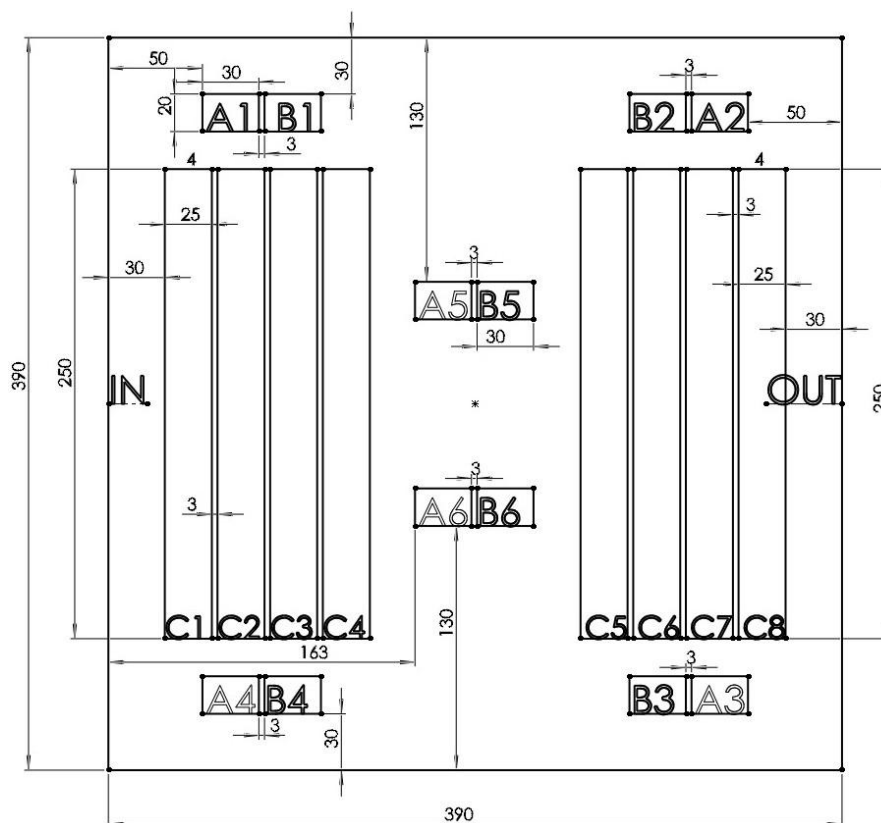


Figura 44 - Representação esquemática dos provetes retirados da placa

Antes da obtenção dos provetes, as placas foram pesadas. Na Tabela 15 estão apresentados os valores da massa de cada placa. A massa das placas não é utilizada em nenhum ensaio, contudo permite obter informação relativamente ao processo de fabrico.

Tabela 15 - Massa das placas

Placa	LA	LB	HA	HB	MA	MB	BA	BB
Massa (g)	1050,4	1183,9	997,9	1045,8	999,2	1143,3	1002,5	1038,2

A partir de cada placa foram extraídos provetes para ensaios de queima, ensaios de micrografia e ensaios de tração (Figura 45). Para rastreabilidade e identificação dos provetes, estes foram numerados de acordo com a sua posição na placa e identificados por uma letra de acordo com o tipo de provete para cada ensaio (Tabela 16).

Tabela 16 - Identificação e quantidade de provetes por placa por ensaio

Letra de identificação	Ensaio	Provetes por placa
A	Queima	6
B	Micrografia	6
C	Tração	8

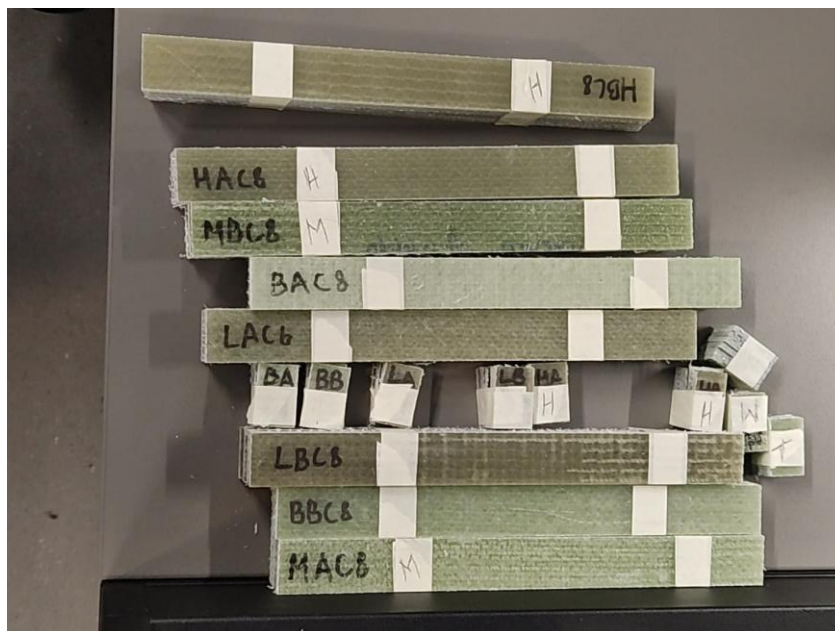


Figura 45 - Provetes de ensaio de micrografia e tração agrupados

A dimensão de todos os provetes C foi determinada antes do começo dos ensaios. A espessura dos provetes B também foi medida com um micrómetro 0-25 mm e resolução de 0,001 mm (Figura 46). As dimensões dos restantes provetes não foram consideradas necessárias. No entanto, os provetes A foram pesados e tiveram a sua densidade medida através de métodos específicos e descritos juntamente com o processo.

Desenvolvimento



Figura 46 - Micrómetro utilizado na medição dos provetes

Os valores apresentados na Tabela 17 são os valores médios de três medições da largura e na Tabela 18 da espessura do provete.

Tabela 17 - Largura dos provetes C

Provete Largura (mm)	LA	LB	HA	HB	MA	MB	BA	BB
C1	25,103	25,293	24,933	25,053	25,083	25,090	24,987	24,897
C2	25,380	25,210	25,002	25,047	25,040	25,087	24,917	25,183
C3	25,073	25,327	25,070	25,060	25,050	25,103	25,033	25,070
C4	25,247	25,340	24,900	25,077	25,153	25,117	24,993	25,150
C5	25,053	25,187	24,847	25,037	24,797	25,167	25,101	25,013
C6	25,213	25,330	24,963	24,957	24,887	25,060	25,230	25,053
C7	25,153	25,170	25,027	25,127	25,223	25,003	25,110	24,990
C8	-	25,380	25,197	24,990	25,187	25,090	25,007	25,240
Média	25,175	25,280	24,992	25,044	25,053	25,090	25,047	25,075
Desvio Padrão	0,107	0,074	0,102	0,049	0,137	0,044	0,090	0,105
CV	0,40 %	0,30 %	0,40 %	0,20 %	0,50 %	0,20 %	0,40%	0,40 %

Tabela 18 - Espessura dos provetes C

Provete Espessura (mm)	LA	LB	HA	HB	MA	MB	BA	BB
C1	3,208	4,194	3,234	4,022	3,333	3,495	3,314	3,385
C2	3,254	4,093	3,242	4,018	3,343	3,462	3,358	3,390
C3	3,293	4,232	3,269	4,011	3,334	3,528	3,381	3,317
C4	3,213	4,113	3,241	3,992	3,349	3,490	3,351	3,358
C5	3,222	4,060	3,246	4,031	3,341	3,429	3,246	3,364
C6	3,183	4,082	3,261	4,016	3,292	3,544	3,339	3,401
C7	3,257	4,172	3,237	3,990	3,306	3,439	3,238	3,326
C8	-	4,212	3,258	3,989	3,238	3,429	3,281	3,375
Média	3,233	4,145	3,249	4,009	3,317	3,477	3,314	3,365
Desvio Padrão	0,034	0,061	0,012	0,015	0,035	0,042	0,050	0,028
CV	1,10 %	1,50 %	0,40 %	0,40 %	1,10 %	1,20 %	1,50 %	0,80 %

As dimensões apresentadas na Tabela 17 e na Tabela 18 foram as dimensões utilizadas para os cálculos dos valores de tensão nos ensaios de tração. O valor do comprimento de todos os provetes foi verificado e cumpria os 250 mm de acordo com a norma ASTM D3039. Como tal este não teve necessidade de ser medido em três pontos diferentes e registado.

Tabela 19 - Espessura dos provetes B

Provete Espessura (mm)	LA	LB	HA	HB	MA	MB	BA	BB
B1	0,335	0,441	0,334	0,421	0,343	0,355	0,343	0,345
B2	0,334	0,443	0,331	0,419	0,349	0,357	0,342	0,343
B3	0,332	0,427	0,329	0,409	0,345	0,355	0,341	0,335
B4	0,325	0,418	0,333	0,415	0,339	0,357	0,337	0,337
B5	0,335	0,427	0,332	0,418	0,341	0,345	0,335	0,337
B6	0,332	0,435	0,333	0,419	0,341	0,357	0,335	0,335
Média	0,332	0,432	0,332	0,417	0,343	0,354	0,339	0,339
Desvio padrão	0,004	0,009	0,002	0,004	0,003	0,004	0,003	0,004
CV	1,07%	2,04%	0,46%	0,91%	1,01%	1,16%	0,99%	1,21%

3.7.3. Ensaios

3.7.3.1. Ensaios de tração

Os ensaios de tração consistem na aplicação de um esforço de tração a um provete ou peça geralmente até à sua rotura com o propósito de caracterizar o material. Estes ensaios são feitos de acordo com normas para o tipo de material a ensaiar [95]. Para estes ensaios foi utilizada a norma ASTM D3039, que são aplicáveis para materiais compósitos de matriz polimérica de resistência elevada e que apresentam camadas com a orientação $\pm 45^\circ$.

Desenvolvimento

Para cada placa fabricada foram retirados 8 provetes por resina, exceto da placa de vácuo aberto da resina L. Todos os provetes foram ensaiados nas mesmas condições. Os ensaios foram realizados uma máquina de ensaios Instron 5900R. A velocidade de ensaio foi de 2 mm/min, com uma distância entre amarras de 150 mm. Os ensaios foram realizados a uma temperatura de 22°C e humidade relativa entre 30 a 34% (Figura 47). Estes ensaios foram desenvolvidos no Laboratório do INEGI.



Figura 47 - Temperatura e humidade do laboratório

Foi utilizado o método de *Digital Image Corelation* (DIC) para aquisição de dados relativamente à deformação do provete. O DIC é um método ótico sem contacto de aquisição de dados, cujo objetivo é relacionar os valores de cinzento de pontos numa superfície antes e depois de deformação. A sua utilização não se encontra limitada pelas dimensões pretendidas, pelo que pode ser utilizada para a macro, micro e nano-escala. Este método utiliza uma fonte de luz específica e padrões de *speckle* pintados na superfície a analisar. O padrão *speckle* permite obter a deformação do provete, pois estes servem como pontos de referência para a análise. A fonte de luz específica que incide sobre a superfície branca juntamente com o *speckle* preto causa a eliminação do restante espectro de cores, levando a que a câmara apenas capture o preto e branco [92, 93, 94, 95].

A preparação dos provetes passou pela pintura da zona calibrada (Figura 48) de ensaio de branco com tinta aerossolizada e posteriormente com o padrão de *speckle* utilizando um rolo próprio. Esta pintura é necessária para permitir criar o contraste necessário entre o padrão *speckle* e a superfície do provete.



Figura 48- a) Provete pintados e b) provete em detalhe

Na Figura 49 a) está demonstrada a montagem do ensaio e do DIC e na Figura 49 b) o programa e imagem obtida pela montagem do sistema de DIC.

O método de DIC utilizado utiliza uma câmara e uma fonte de luz para incidir sobre a superfície da zona pintada do provete e criar o contraste adequado para permitir a análise das imagens. A luminosidade a incidir sobre a superfície do provete apresenta uma elevada especificidade pois o contraste causado por esta deve sempre estar adequado à distinção do *speckle* e do fundo. Este requisito é determinado através de uma escala que o programa sobrepõe ao provete e permite alcançar o ideal determinado por este, para a sua correta captação pelo programa. A luminosidade é regulada tendo como referência o programa de captação. A câmara ligada ao computador faz a aquisição de imagens através do programa VIC-2D. Após a aquisição as imagens são processadas neste mesmo programa. No programa VIC-2D são regulados os parâmetros de aquisição de imagem desejados. As imagens foram captadas a cada segundo do ensaio, o que corresponde a uma frequência de aquisição de 1 Hz. O alinhamento utilizado foi a extremidade esquerda do provete alinhado com a marca central do programa. O alinhamento precisava de ser sempre o mesmo para garantir que as imagens eram sempre captadas da mesma maneira. As imagens obtidas a analisar são agrupadas em pastas por provete.

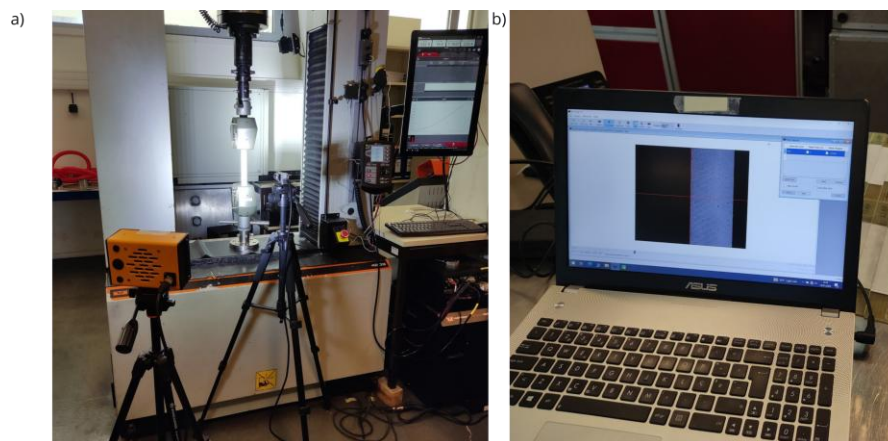


Figura 49- a) Montagem da luz e câmara do DIC e b) imagem obtida

Desenvolvimento

Na Figura 50 é possível observar os provetes após a realização do ensaio de tração.

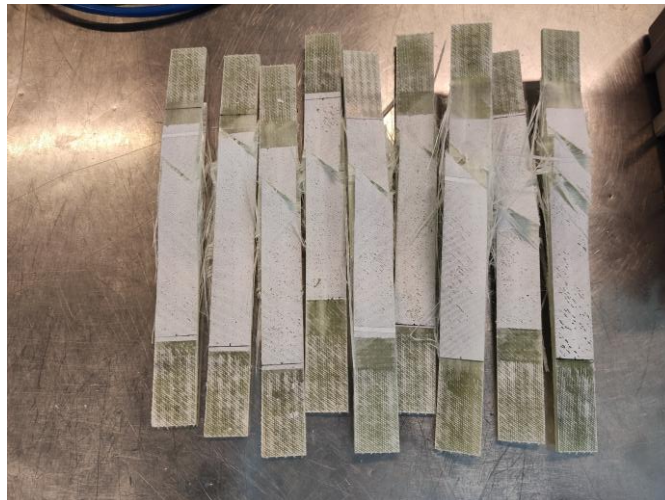


Figura 50 - Provetes após o ensaio de tração

Os dados registados pela máquina de ensaios correspondem ao deslocamento do travessão da máquina e força aplicada na célula de carga a cada meio segundo do ensaio, o que corresponde a uma frequência de obtenção de dados de 2 Hz, levando a que exista o dobro dos dados de força relativamente aos dados do DIC. Como tal, foi necessária a redução dos valores para metade obtidos pela máquina de ensaios.

A análise dos dados obtidos começou pela conversão dos ficheiros em formato CSV, obtidos na Instron 5900R, em ficheiros de valores Excel.

A obtenção de dados numéricos a partir das imagens do DIC foi efetuada no programa VIC-2D. As imagens foram introduzidas no programa por pasta de cada provete. No programa foi selecionada a área de interesse de cada pasta de imagens para o programa analisar e obter os resultados. A área selecionada foi constante em todos os provetes, apresentando apenas variação da sua posição dentro da área calibrada no provete. A escolha das zonas teve em conta a melhor qualidade visual e o mínimo de artefactos visuais possíveis. Os artefactos presentes deviam-se a imperfeições do próprio material compósito que não foram eliminadas pela pintura. Os resultados extraídos do VIC-2D representam as deformações do provete em todos os planos e eixos. Estes resultados foram convertidos do formato CSV, formato obtido do programa, para ficheiros de valores Excel.

Como mencionado anteriormente, os dados provenientes da máquina de ensaios de tração apresentavam o dobro da frequência de aquisição dos provenientes do DIC. A compatibilização dos dados foi possível com recurso à criação de uma macro no *Visual Basics for Applications* (VBA) do Excel para interpolação cúbica de valores, o intuito da utilização da interpolação cúbica foi apresentar a maior definição e proximidade aos valores reais. Esta fórmula reduziu para metade os valores de força da máquina. A redução dos valores de força da máquina foi o método escolhido pois este não introduzia erros, ao contrário do que aconteceria com o aumento de valores de deformação. Esta compatibilização foi necessária para a criação dos gráficos de Tensão (σ)–Extensão (ϵ) dos provetes. Estes gráficos foram obtidos com o uso da

função de gráficos do Excel. Como ε foi um valor retirado diretamente, a sua utilização no gráfico foi direta, a determinação da σ utilizou os valores de força (F) da máquina e a área de cada provete ($w \times h$, em que w é a largura do provete e h a sua espessura), provenientes de valores medidos manualmente e apresentados na Tabela 17 e na Tabela 18.

$$\sigma = \frac{F}{w.h} \quad (4)$$

Com recurso à norma ASTM D3039 [100], os gráficos de σ - ε foram utilizados para determinar o E de cada provete, o método utilizado consistiu na determinação do declive da reta numa zona aproximadamente linear, representado na equação (5). A zona escolhida do gráfico foi de acordo com a deformação. Em todos os provetes a zona aproximadamente linear escolhida, foi a zona que corresponde dos 0,2 a 0,5, ou valores mais próximos destes valores, de deformação.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (5)$$

Os dados de deformação dos provetes foram utilizados para determinar o coeficiente de Poisson (ν) destes. O ν foi calculado utilizando a equação (6), utilizando os dados de ε_t e ε_l entre os pontos utilizados para o E .

$$\nu = \frac{-\Delta\varepsilon_t}{\Delta\varepsilon_l}, \quad (6)$$

Todos estes cálculos foram feitos no Excel, o que permitiu a obtenção direta dos gráficos e valores dos resultados. Os cálculos dos valores do ν apresentaram uma grande variação devido aos valores utilizados, obtidos pelo DIC, terem uma elevada variação.

No ensaio de tração foram encontradas limitações na obtenção de dados da deformação do provete, na medida em que o método utilizado necessitou de um sistema de apoio especializado para o efeito e preparação específica dos provetes. Mesmo apesar destas limitações todos os dados obtidos nos ensaios após analisados apresentaram resultados utilizáveis e que permitiram o avanço dos trabalhos.

Este método apresentou também uma limitação no formato dos dados obtidos e no seu tratamento. De facto, os dados obtidos durante o ensaio são imagens de elevado detalhe, que apenas podem ser processadas pelo programa utilizado, e só após este processamento apresentam valores trabalháveis.

3.7.3.2. Ensaio de micrografia

A micrografia consiste na obtenção de imagens através de um microscópio com o objetivo de obter imagens de elevado detalhe e aproximação. Esta técnica, na engenharia, tem como finalidade a visualização das microestruturas dos materiais. A sua utilização tem como objetivo determinar as fases existentes em materiais metálicos e a FVF e quantidade de vazios em materiais compósitos [101].

Desenvolvimento

O ensaio de micrografia é realizado em provetes que apresentam uma das suas superfícies lixada e polida para eliminar marcas de processamento e contaminantes presentes na superfície, de maneira a proporcionar uma imagem clara e limpa da matriz e reforço do material compósito. O decorrer deste ensaio foi desenvolvido em dois laboratórios diferentes, designadamente o Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e o Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia Química do ISEP.

O ensaio de micrografia para este trabalho foi realizado para um total de 48 provetes, o que corresponde a seis provetes por cada placa fabricada. O ensaio nestes provetes teve como objetivo determinar o TV do material compósito, por meio de análise das imagens obtidas.

O ensaio de micrografia foi realizado em duas fases separadas, designadamente a fase de preparação dos provetes e a fase da obtenção das imagens. A fase da preparação dos provetes consistiu no lixamento e polimento dos provetes, realizados numa máquina de lixamento/polimento, modelo LaboPoli-21 da Struers (Figura 51). O lixamento foi feito com lixa de carboneto de silício com granulometria 4000, constantemente molhada. Esta etapa teve o propósito de limpar e preparar a superfície para o polimento.

Para o polimento dos provetes foram utilizados abrasivos de diamante com partículas de duas dimensões através de duas etapas de polimento. O primeiro abrasivo utilizado continha partículas de $3 \mu\text{m}$ e o segundo abrasivo continha partículas de $1 \mu\text{m}$. Estes abrasivos foram colocados num pano de polimento juntamente com lubrificante. Entre as duas etapas, os provetes foram passados por água corrente para limpar a superfície e posteriormente secos com ar comprimido. O polimento foi parado assim que a superfície estava visualmente reflexiva e lisa. O polimento foi confirmado no estereomicroscópio Olympus SZ-PT com câmara, sendo considerado adequado assim que os riscos da superfície não fossem visíveis neste equipamento.

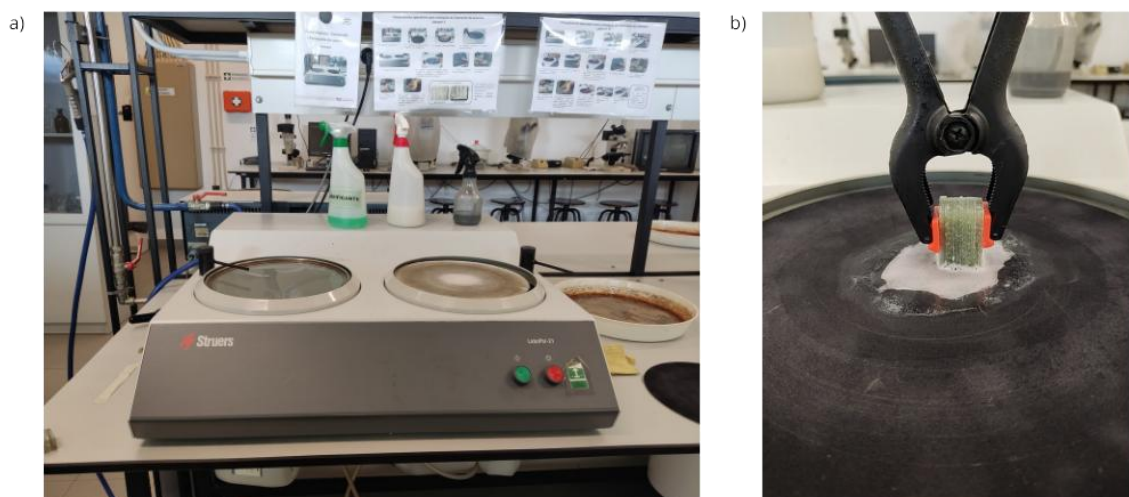


Figura 51- a) LabPoli-21 com lixa e pano de polimento montados e b) polimento dos provetes com abrasivo de $1 \mu\text{m}$

A escolha do método mais adequado passou pela avaliação de diferentes alternativas para a obtenção de imagens, nomeadamente a utilização do estereomicroscópio Olympus SZ-PT com

câmara, o estereomicroscópio Zeiss Stemi DV4 com câmara fotográfica digital, o microscópio Olympus BX51 com câmara e o microscópio invertido Nikon Eclipse MA100 com câmara.

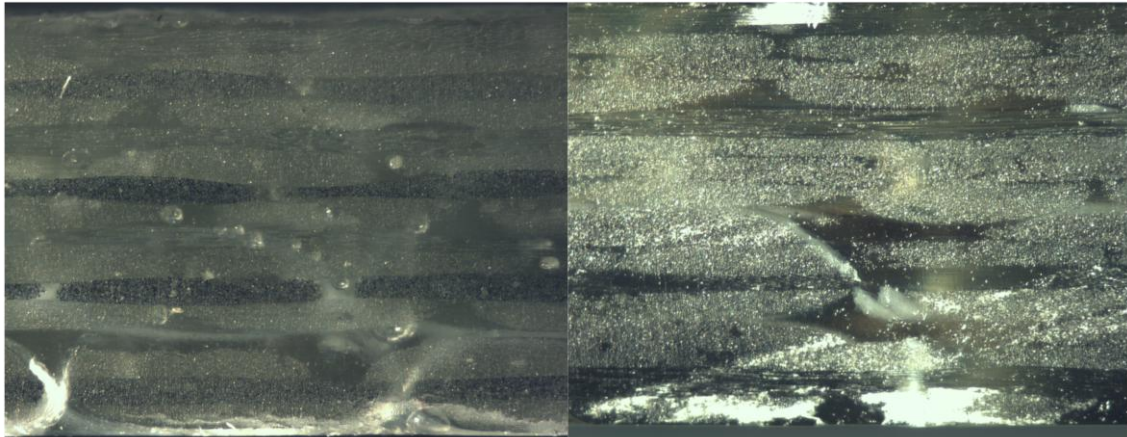


Figura 52- Imagens de teste obtidas no estereomicroscópio com câmara

Na Figura 52 estão apresentados exemplos das imagens obtidas no estereomicroscópio Olympus SZ-PT com câmara. Estas imagens foram as primeiras a serem obtidas e a serem avaliadas para determinar se cumpriam os requisitos necessários para avaliar a estrutura e camadas do material compósito. No entanto, estas não cumpriram os requisitos necessários, pois existe uma grande variação da imagem em relação aos detalhes e reflexos visíveis na superfície, em função da resina e as imagens não apresentam detalhe suficiente o que dificulta a interpretação e diferenciação da superfície e núcleo do provete devido à transparência inerente das resinas.



Figura 53- Imagens de teste obtidas no estereomicroscópio com câmara fotográfica digital

A Figura 53 apresenta as imagens obtidas no estereomicroscópio Zeiss Stemi DV4 com câmara fotográfica. Estas imagens não cumpriam os requisitos para utilização na análise, pois não é possível distinguir as fases do material compósito. Apenas são visíveis os vazios de elevadas dimensões à superfície, que não permitem a diferenciação correta entre a superfície e núcleo do material compósito, o que impossibilita a deteção de vazios causados por bolhas de ar. Estas também não apresentavam qualidade suficiente para ser possível a ampliação digital das imagens.

Desenvolvimento

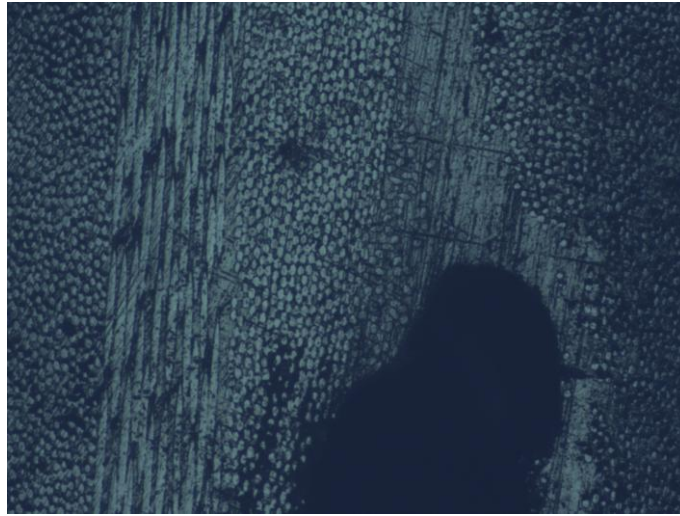


Figura 54- Imagem de teste obtida no microscópio

A Figura 54 apresenta o resultado obtido no microscópio Olympus BX51. Apesar de a imagem apresentar o detalhe necessário, não era possível obter uma imagem abrangente e ampla o suficiente e sem o contraste suficiente para a diferenciação visual entre os constituintes do material compósito para avaliar corretamente as imagens. As imagens também eram obtidas rodadas em 90°, relativamente à posição do provete na mesa, devido à montagem da câmara, o que introduz dificuldades de correlação entre o posicionamento do provete e da imagem obtida.

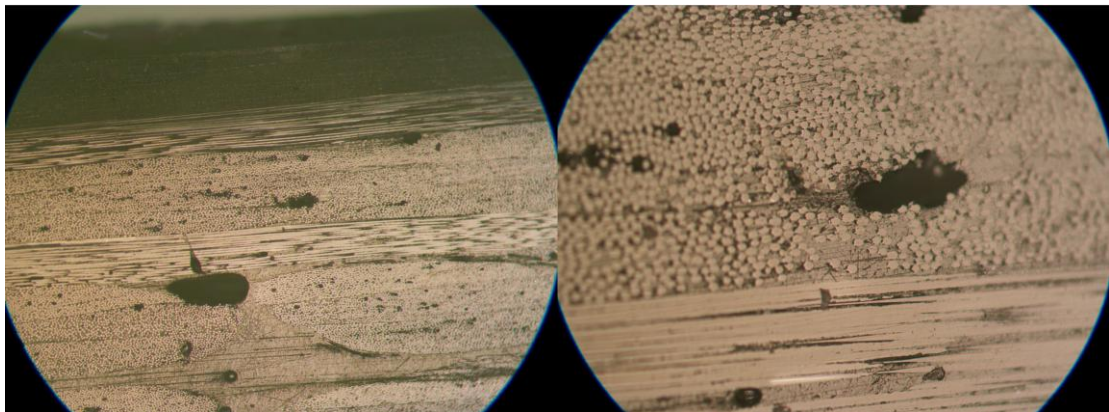


Figura 55 - Imagens de teste obtidas no microscópio invertido

Na Figura 55 estão apresentadas as imagens de teste obtidas no microscópio invertido Nikon Eclipse MA100. As imagens obtidas neste apresentavam qualidade e detalhe suficiente para cumprir os requisitos necessários. De facto, estas permitiam uma fácil distinção entre a matriz e o reforço, distinção entre vazios e possíveis falhas do reforço e qualidade de imagem suficiente para qualquer tipo de processamento de imagem necessário.

Após os testes para avaliar a qualidade das imagens obtidas, foi determinado que o melhor resultado foi o do microscópio invertido. Todas as imagens para análise foram obtidas neste equipamento, cuja lente utilizada apresentava uma ampliação de 5 x/0,15. O programa de aquisição de imagens utilizado foi o NIS-Elements D da Nikon, que estabelece a interface entre

a câmara e o computador. A câmara utilizada foi a Nikon DS-Fi2, ligada ao controlador Nikon DS-U3.

As imagens de todos os provetes foram obtidas com a largura do provete orientada na vertical, de maneira a abranger toda a largura da superfície do provete. A necessidade de abranger toda a largura do provete decorre da necessidade de identificação de todas as camadas do material compósito na imagem a analisar, enquanto o comprimento do provete foi dividido em várias imagens. Foram obtidas um total de 346 imagens.

Para a análise das imagens foram disponibilizados dois algoritmos diferentes de deteção de vazios, um por redes neuronais e um programa de segmentação por contraste das imagens. Foi realizado um teste em ambos os algoritmos, o programa de inteligência artificial não forneceu resultados compatíveis com a realidade, enquanto o algoritmo por *contraste* forneceu resultados realistas e com alta-fidelidade.

O algoritmo de deteção por contraste é um programa de aplicação .exe de Windows Comand Prompt, designado de Darth Voider 0.2.6. Este programa é uma aplicação especialmente desenvolvida para a deteção de vazios em materiais compósitos através da análise de imagens obtidas por micrografia através de um *script* cujos parâmetros são definidos pelo utilizador. Para este algoritmo as imagens devem apresentar apenas o laminado e não ter bordas ou áreas de outro material. Devido às imagens obtidas no decurso do trabalho apresentarem uma borda circular, estas foram recortadas de maneira a se obter imagens retangulares apenas das camadas do laminado.

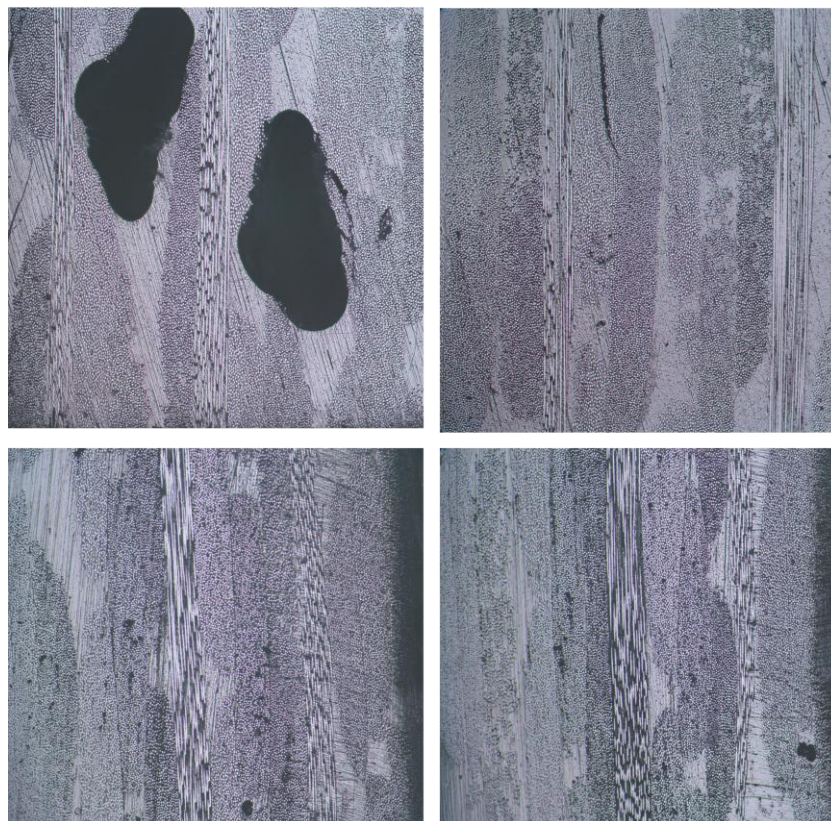
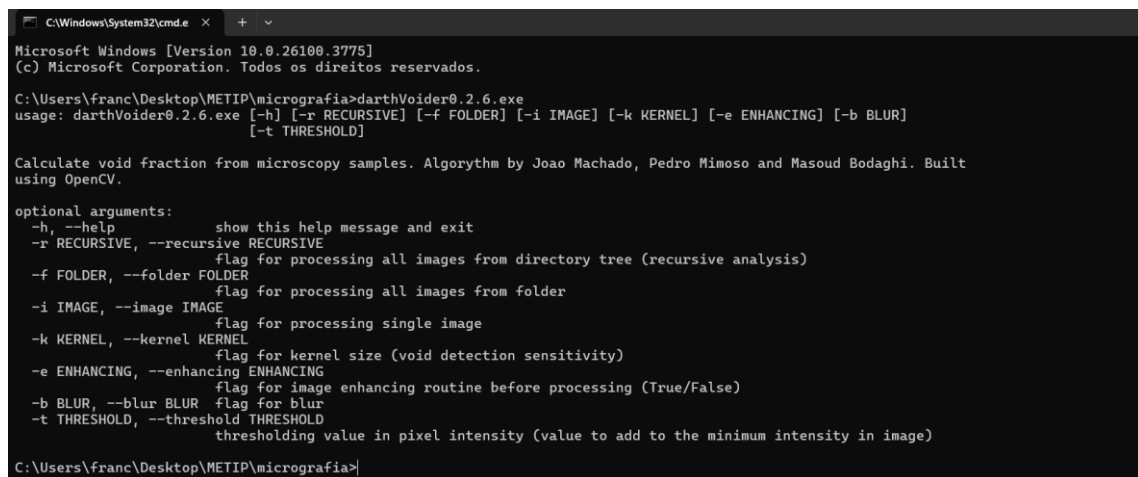


Figura 56 - Exemplo de imagens recortadas para utilização no algoritmo, magnificação 5 x/0,15

Desenvolvimento

Na Figura 56 estão apresentados exemplos das imagens recortadas prontas para serem analisadas pelo algoritmo. As imagens foram obtidas com uma determinada repetição da secção devido a apresentarem as bordas circulares do microscópio invertido, pelo que o recorte das imagens não significou uma perda de informação considerável, visto significar cerca de < 5% da secção. Desta forma esta perda foi tomada como aceitável, considerando-a desprezável.

No algoritmo Darth Voider (Figura 57) podem ser variados quatro parâmetros para os resultados serem os mais corretos possível.



```
C:\Windows\System32\cmd.e  X  +  v
Microsoft Windows [Version 10.0.26100.3775]
(c) Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.

C:\Users\franc\Desktop\METIP\micrografia>darthVoider0.2.6.exe
usage: darthVoider0.2.6.exe [-h] [-r RECURSIVE] [-f FOLDER] [-i IMAGE] [-k KERNEL] [-e ENHANCING] [-b BLUR]
                             [-t THRESHOLD]

Calculate void fraction from microscopy samples. Algorhythm by Joao Machado, Pedro Mimoso and Masoud Bodaghi. Built
using OpenCV.

optional arguments:
  -h, --help            show this help message and exit
  -r RECURSIVE, --recursive RECURSIVE
                        flag for processing all images from directory tree (recursive analysis)
  -f FOLDER, --folder FOLDER
                        flag for processing all images from folder
  -i IMAGE, --image IMAGE
                        flag for processing single image
  -k KERNEL, --kernel KERNEL
                        flag for kernel size (void detection sensitivity)
  -e ENHANCING, --enhancing ENHANCING
                        flag for image enhancing routine before processing (True/False)
  -b BLUR, --blur BLUR  flag for blur
  -t THRESHOLD, --threshold THRESHOLD
                        thresholding value in pixel intensity (value to add to the minimum intensity in image)

C:\Users\franc\Desktop\METIP\micrografia>
```

Figura 57 - Algoritmo pronto a analisar

Os quatro parâmetros a variar são:

- O Kernel (k), quantidade de pixéis contíguos necessários para poder ser considerado um vazio. Este parâmetro é regulado ao fornecer o valor do número de pixéis desejado, para um vazio. Utilizado nas fases intermédias e final do programa.
- O Enhancing (e), é uma função para aumentar a luminosidade e contraste da imagem para facilitar a sua análise. Este parâmetro pode estar ligado ou desligado, corresponde a uma calibração automática dos valores óticos da imagem, por parte do programa.
- O Blur (b), serve para eliminação de ruído nas imagens. O Blur pode ser ativado ou desativado. Utiliza por base o Kernel.
- O Threshold (t) é o valor máximo ao qual um pixel é considerado preto, varia de 0 a 255. estes valores são os bits relativos à cor, sendo 0 preto total e 255 branco total. Sendo preto vazio e o branco matriz.

Para cada grupo de provetes foram considerados os mesmos parâmetros que para obter um resultado adequado, no entanto requerem uma calibração antes da sua utilização para analisar cada grupo de imagens por provete. Devido às cores e propriedades visuais diferentes de cada resina, os valores variaram sempre entre os grupos de provetes. Os valores utilizados para os parâmetros estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Valores utilizados nos parâmetros

Placa	k	e	b	t
LA	14	<i>True</i>	<i>False</i>	100
LB	20	<i>False</i>	<i>False</i>	100
MA	20	<i>True</i>	<i>False</i>	80
MB	20	<i>True</i>	<i>False</i>	80
HA	20	<i>True</i>	<i>False</i>	100
HB	20	<i>True</i>	<i>False</i>	80
BA	20	<i>False</i>	<i>False</i>	80
BB	16	<i>True</i>	<i>False</i>	80

O resultado obtido é a percentagem de vazios detetados relativamente à área total de cada imagem. Como as secções nas diferentes imagens são todas iguais, é apenas necessária uma média aritmética para estimar o resultado do TV por provete.

Após a análise das imagens, o algoritmo fornece cinco imagens que correspondem à progressão das etapas do algoritmo. A imagem final é binária, o que significa que os vazios são os pixéis pretos e todo o resto os pixéis brancos. Estas imagens apresentavam alguns artefactos, que foram identificados erroneamente como vazios pelo algoritmo, pois estes cumpriam todas as condições definidas para a identificação dos vazios. Desta forma, estes artefactos originam no processo de corte dos provetes pelo disco ou nas próprias propriedades óticas do material compósito, nomeadamente reflexos por parte da matriz devido ao polimento ou bolhas de ar inclusas na matriz.

Após a eliminação ou correção destes artefactos nas imagens, estas foram reanalisadas para confirmação dos valores do TV. A análise consistiu assim em três passos, nomeadamente a análise das imagens, correção das imagens binárias e por fim análise das imagens binárias. Na Figura 58 estão apresentadas as imagens do processo de análise.



Figura 58 - a) Imagem introduzida; b) imagem binária com artefactos e c) imagem binária limpa

Os valores dos parâmetros utilizados nas imagens binárias estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Valores dos parâmetros nas imagens binárias.

Parâmetros	k	e	b	T
Imagens Binárias	16	<i>False</i>	<i>False</i>	20

Desenvolvimento

Todas as imagens binárias utilizaram estes parâmetros. As imagens binárias são iguais após todas as etapas de processamento pelo algoritmo pois não sofrem qualquer alteração pelas melhorias do algoritmo. Isto deve-se às imagens apresentarem as condições ideais para serem processadas, designadamente um elevado contraste, inexistência de artefactos e homogeneidade dos vazios.

A partir destes provetes foi também calculada a FVF, esta foi calculada através da equação (7) [102], em que V_f é a FVF, A_m a gramagem do tecido do reforço, N o número de camadas do reforço, ρ_f é a massa volúmica da fibra e h a espessura do provete. Este valor foi calculado a partir destes provetes devido apresentarem uma distribuição por toda a placa. As dimensões utilizadas neste cálculo estão apresentadas na Tabela 19.

$$V_f = \frac{A_m \cdot N}{\rho_f \cdot h} \quad (7)$$

Os valores de A_m , N e ρ_f são constantes para todos os provetes e o valor de h utilizado está apresentado na Tabela 19. Os valores constantes estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Valores das constantes dos provetes

Constante	A_m (g/cm ²)	N	ρ_f (g/cm ³)
Valor	0,1184	4	2,368

Na fase do ensaio da preparação dos provetes, foram encontradas dificuldades na preparação da superfície a ser analisada, devido a esta ser muito irregular. A irregularidade das superfícies foi causada pelo método de corte utilizado, disco diamantado. A dificuldade foi manifestada no lixamento para regularização da superfície, pelo que se tornou necessário um tempo elevado de lixamento para cada provete, o que proporcionou um desgaste elevado dos discos de lixa da máquina.

No ensaio de micrografia foram encontradas limitações no equipamento a utilizar para a obtenção das imagens. Esta limitação foi a redução de informação nas imagens obtidas devido terem uma borda circular devido à montagem da câmara responsável pela obtenção de imagens no microscópio invertido.

3.7.3.3. Ensaios de queima

Os ensaios de queima tiveram como objetivo a determinação do teor dos constituintes do material compósito. Este ensaio consiste na queima da matriz e a respetiva destruição para manter apenas o reforço. Os resultados são obtidos através do cálculo da densidade e massa do material compósito antes da queima e após a queima do material restante. Através destes valores é possível obter o TV, bem como fração volúmica e mássica da resina e da fibra. Este ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D3171 e o método A7-G, e permite determinar os constituintes de um material compósito. O ensaio descrito nesta norma pode ser feito por digestão ou queima da matriz. A digestão da matriz é adequada a reforços que podem sofrer de degradação se expostos às temperaturas elevadas necessárias para a queima. A queima é

adequada à análise das placas pois o reforço utilizado é a fibra de vidro, o que significa que esta não sofre qualquer degradação quando exposta às temperaturas elevadas [103].

O método utilizado na realização do ensaio foi o A7-G pois este é o mais indicado aos materiais compósitos para analisar. Este método consiste na queima da total ou quase total da matriz com o objetivo de apenas restar o reforço. De acordo com a norma, a queima da matriz é feita num forno de mufla a $565 \pm 30^\circ\text{C}$, contudo o ensaio foi realizado a 425°C .

Para a obtenção dos resultados, de acordo com o Procedimento A7-G – “Queima de matriz em um forno de mufla”, foram implementados os seguintes passos:

1. Cálculo da densidade dos provetes de acordo com as normas ASTM D792 ou ASTM D1505;
2. Medição da massa de cada provete, que deve ser superior a 1 g;
3. Medição da massa dos cadinhos (Figura 59 a) e colocação dos provetes no seu interior;
4. Colocação dos cadinhos no forno de mufla (Figura 59 b) pré-aquecido a 500°C ;
5. Queima dos provetes a 425°C , durante seis horas;
6. Medição da massa dos sobranes e cadinhos.

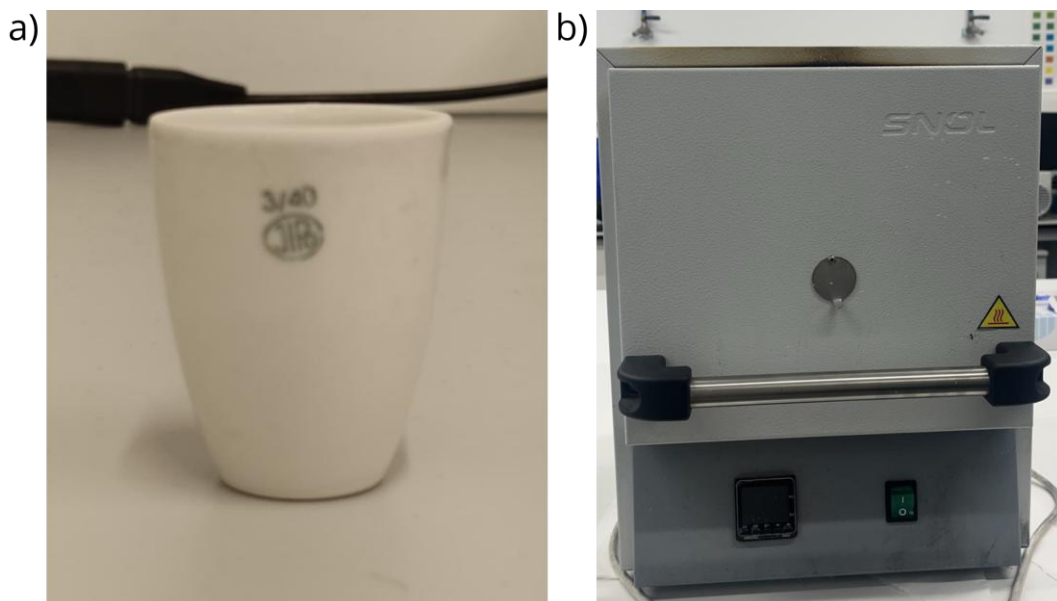


Figura 59 - a) Cadinho e b) forno de mufla

Este método, aliado aos materiais da matriz e do reforço das placas, não necessita de nenhum tipo de correção de degradação do reforço, pelo que permite a obtenção direta dos resultados dos constituintes do material compósito.

Este ensaio foi realizado por terceiros, devido à sua especificidade e necessidade dos resultados para serem apresentados aos responsáveis do consórcio. Logo, os resultados obtidos por este ensaio são apresentados para análise e discussão sem descrição dos métodos analíticos utilizados para a obtenção dos mesmos, sendo apenas descrito o ensaio e sua aplicação.

3.8. Resultados e Análise

3.8.1. Ensaio de tração

Para a análise de dados foram utilizados os oito provetes de cada placa, exceto da LA que apresentava apenas sete e da BB uma vez que o provete número cinco teve problemas de aquisição de dados que impediram a utilização dos mesmos. Os dados obtidos através dos ensaios para o E e σ_m estão apresentados na sua totalidade nos gráficos σ - ϵ . Nas tabelas 19 a 27 estão apresentados os valores considerados estatisticamente adequados e que foram considerados para conclusões sobre o material compósito. De acordo com as normas ASTM 3039D e ASTM 3518 [96, 97], para que os resultados sejam válidos, são necessários cinco grupos de dados. De acordo com este valor todos os grupos de provetes, mesmo considerando os retirados, cumprem o mínimo de cinco provetes para permitir uma análise correta.

O método de deteção de *outliers* escolhido, foi a regra empírica, utilizando 95 % das observações. Foi assumido que os resultados apresentavam uma distribuição normal, pelo foi possível determinar *outliers* através da equação (8), em que s é o desvio padrão, m a média de todos os valores.

$$outliers = [m - 2 * s; m + 2 * s] \quad (8)$$

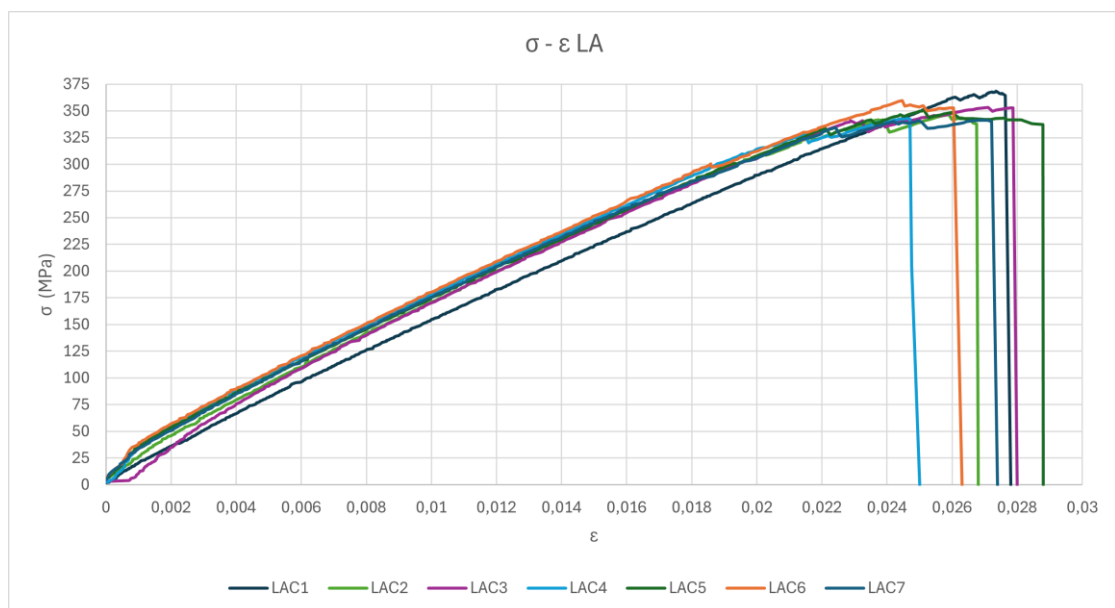
Valores que se apresentem acima ou abaixo dos valores determinados são eliminados para a ponderação final dos resultados [105]. Esta análise foi feita para cada uma das propriedades individualmente, visto estas apresentarem métodos matemáticos de obtenção diferentes, ao que é considerado que são todas passíveis a uma análise estatística dedicada. O coeficiente de variação é considerado aceitável se menor ou igual a 10 %. Este coeficiente tem como objetivo avaliar a repetibilidade e precisão dos resultados. Valores acima deste limite representam variabilidade elevada dos dados analisados, mas este não tem como objetivo invalidar provetes da análise, mas apenas de complementar a análise dos mesmos.

Na Tabela 23 estão apresentados os valores dos resultados dos provetes LAC, grupo de provetes com apenas sete provetes, devido à impossibilidade da obtenção de um oitavo provete de acordo com as dimensões necessárias para cumprir a norma EN 3039D. O valor de v foi obtido a partir da média de cinco provetes, pois o provete LAC3 apresentou um valor fisicamente impossível ao que foi eliminado da ponderação, enquanto o provete LAC7 apresentou um valor fora dos limites, como resultado obteve-se um v para este material compósito de 0,341. Os resultados para o E e σ_m do provete LAC3 não se enquadravam dentro dos valores dos limites definidos, ao que foram eliminados da ponderação final. O valor do E calculado foi de 16080,22 MPa e uma σ_m de 351,50 MPa.

Tabela 23 - Resultados da placa LA

Provetes	ν	E (MPa)	σ_m (MPa)
LAC1	0,335	15289,51	368,25
LAC2	0,359	16637,41	346,41
LAC3	-	-	-
LAC4	0,323	16054,21	342,88
LAC5	0,338	15770,64	350,36
LAC6	0,352	16130,07	359,69
LAC7	-	16599,47	341,36
LAC8	-	-	-
Média	0,341	16080,22	351,50
Desvio padrão	0,013	466,24	9,56
CV	3,8 %	2,90 %	2,72 %

A Figura 60 apresenta as curvas σ - ϵ dos provetes LAC, neste gráfico estão representados todos os provetes testados.

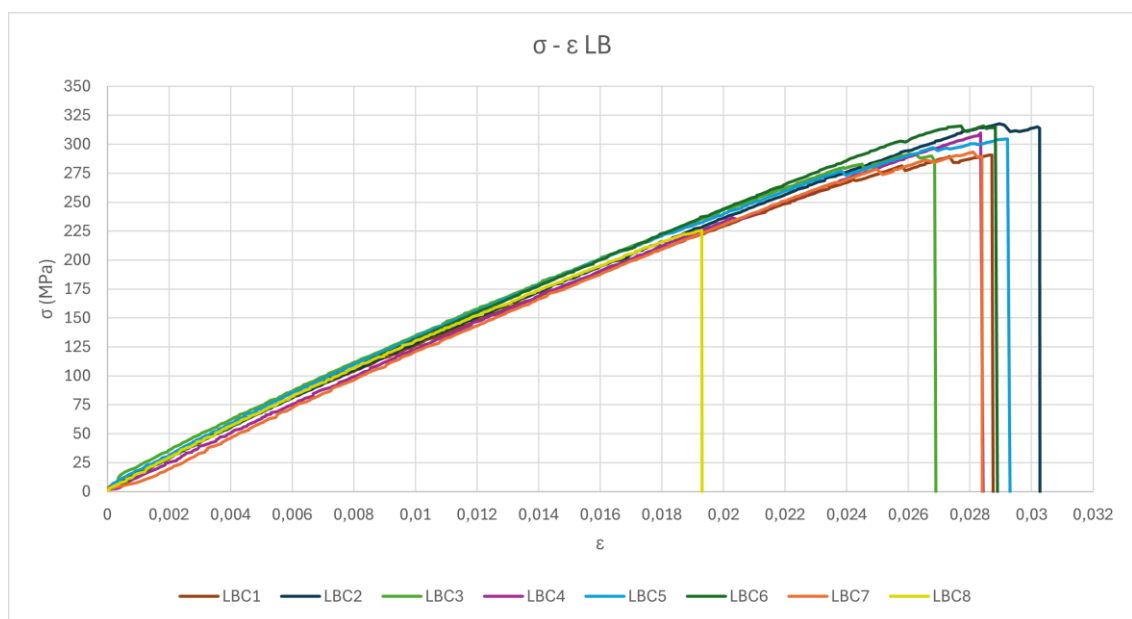
Figura 60 - curvas σ - ϵ dos provetes LAC

Na Tabela 24 estão apresentados os valores provenientes dos provetes LBC. O valor do médio E foi obtido a partir dos oito provetes e corresponde a 13009,78 MPa. Para o cálculo da σ_m foi retirado o provete LBC8, devido ao valor deste se encontrar fora dos limites aplicados, originando assim um resultado de 303,36 MPa para o valor médio dos provetes. O valor de ν teve retirado da sua ponderação os provetes LBC1 e LBC4, já que a estes não se enquadravam na gama calculada, sendo o valor resultante de 0,439.

Tabela 24 - Resultados da placa LB

Provetes	ν	E (MPa)	σ_m (MPa)
LBC1	-	12802	290,81
LBC2	0,437	12946,06	317,49
LBC3	0,449	12797,01	291,84
LBC4	-	12577,03	309,79
LBC5	0,442	13348,64	304,53
LBC6	0,439	13119,65	315,76
LBC7	0,417	13199,74	293,27
LBC8	0,449	13288,13	-
Média	0,439	13009,78	303,36
Desvio padrão	0,011	255,01	10,61
CV	2,51 %	1,96 %	3,5 %

Na Figura 61 apresentam-se as curvas σ - ϵ dos provetes LBC. É possível observar na curva do provete LBC8 que o seu valor de σ_m foi muito inferior aos restantes provetes por este motivo é inferior ao valor mínimo dos valores normais, este foi descartado na ponderação.

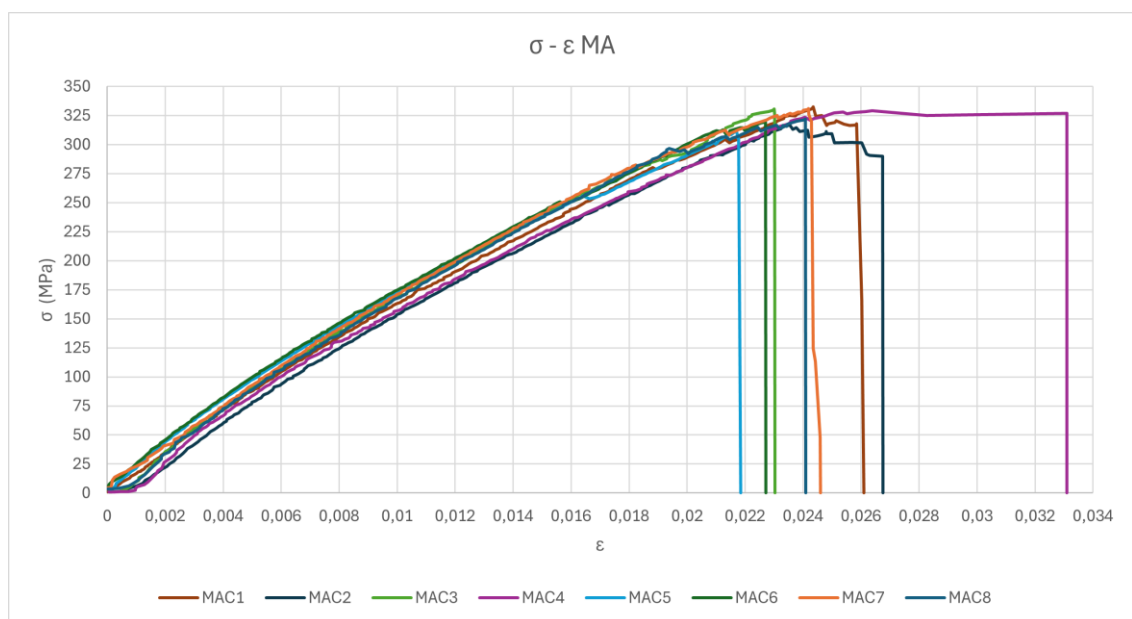
Figura 61 - curvas σ - ϵ dos provetes LBC

A Tabela 25 apresenta os resultados dos provetes MAC. O ν destes provetes contemplou nos seus cálculos todos os provetes exceto o MAC1, pois este apresentava um valor que excedia os limites obtidos pela equação (8), ν resultante é 0,322. O valor obtido para o E foi de 17367,32 MPa, para o cálculo deste valor não foi considerado o valor do provete MAC4 pois este era um *outlier* abaixo do valor mínimo. A σ_m contou com todos os provetes para o seu resultado, que foi de 324,20 MPa.

Tabela 25 - Resultados da placa MA

Provetes	ν	E (MPa)	σ_m (MPa)
MAC1	-	17533,87	332,44
MAC2	0,326	18794,04	316,81
MAC3	0,374	16185,97	330,47
MAC4	0,347	-	329,27
MAC5	0,243	17770,87	312,25
MAC6	0,310	17997,35	319,40
MAC7	0,355	17065,22	330,84
MAC8	0,300	18113,91	322,15
Média	0,322	17637,32	324,20
Desvio padrão	0,040	770,62	7,09
CV	12,42 %	4,44 %	2,19 %

As curvas σ - ϵ dos provetes MAC estão apresentadas na Figura 62. É possível observar um patamar constante no provete MAC4, relacionado a deslizamento do provete nas amarras durante a parte final do ensaio. Este patamar antecedeu a rotura do provete.

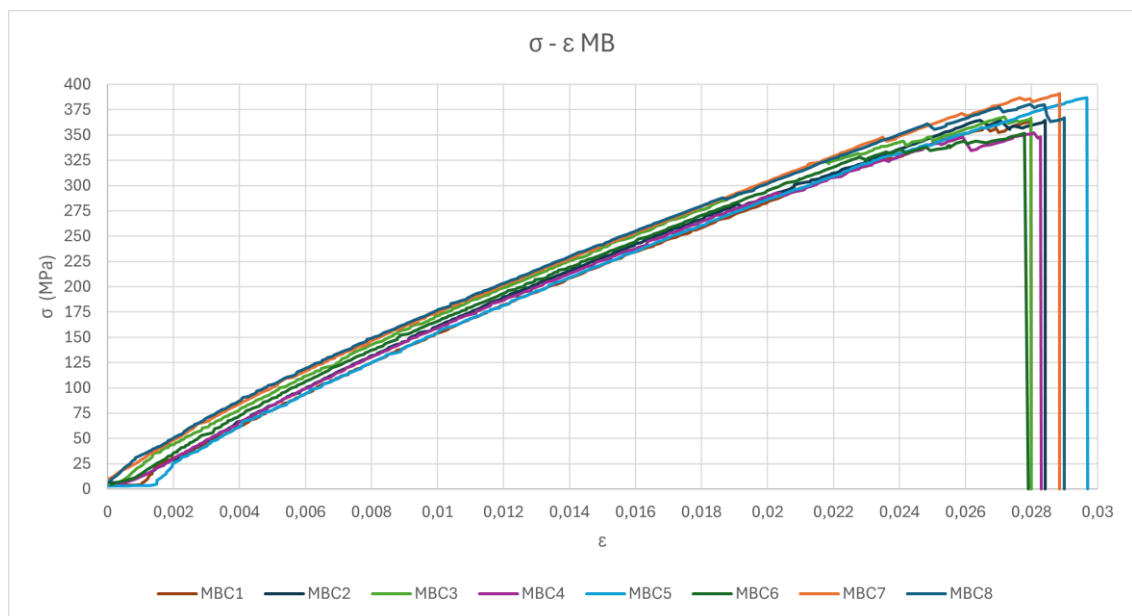
Figura 62 - curvas σ - ϵ dos provetes MAC

A Tabela 26 apresenta os valores dos provetes MBC. Para a obtenção do ν , o provete MBC2 foi eliminado pois este apresentava um valor impossível. Desta forma o ν calculado foi de 0,357. A σ_m obtida através de todos os provetes apresenta um valor de 369,92 MPa. Para o cálculo do E contaram apenas sete provetes, pois o provete MBC1 teve o seu valor abaixo do limite inferior da gama de valores estatisticamente aceitáveis, ao que resultou um E de 17608,21 MPa.

Tabela 26 - Resultados da placa MB

Provetes	ν	E (MPa)	σ_m (MPa)
MBC1	0,302	-	365,05
MBC2	-	17970,92	364,69
MBC3	0,282	17100,02	367,95
MBC4	0,456	17562,51	352,04
MBC5	0,383	17595,03	386,92
MBC6	0,417	18146,05	351,50
MBC7	0,297	17332,55	390,89
MBC8	0,368	17550,41	380,31
Média	0,357	17608,21	369,92
Desvio padrão	0,061	329,65	13,92
CV	17,09 %	1,87 %	3,76 %

A Figura 63 apresenta as curvas σ - ϵ dos provetes MBC.

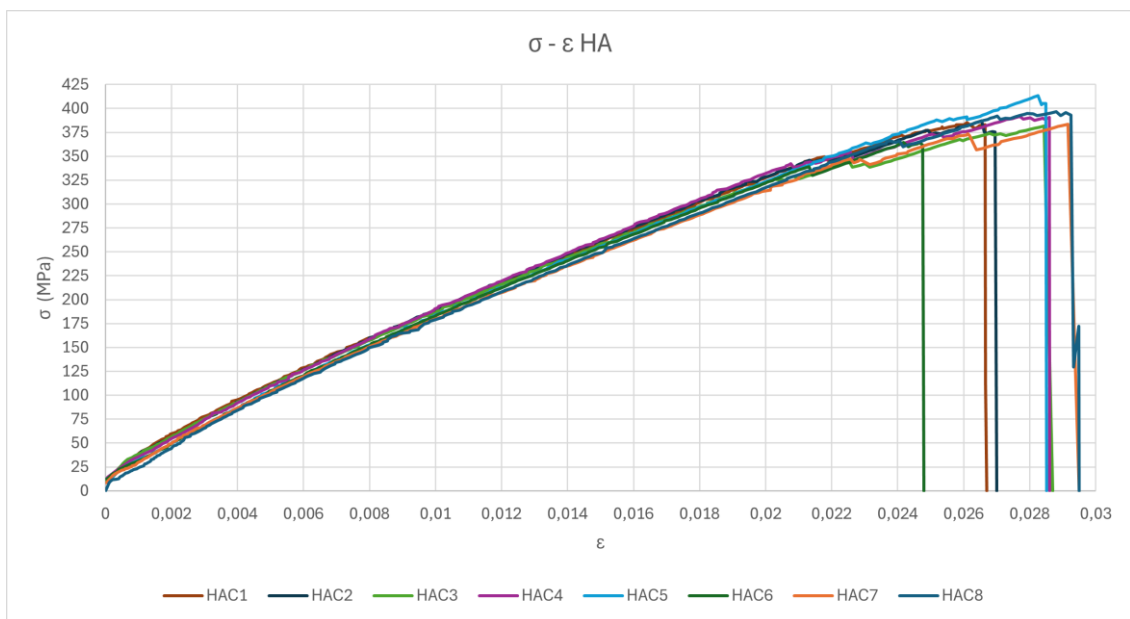
Figura 63 - curvas σ - ϵ dos provetes MBC

Na Tabela 27 estão apresentados os valores provenientes dos provetes HAC. O valor médio do E foi obtido a partir do valor de seis provetes e corresponde a 17950,40 MPa. Para a obtenção deste o provete HAC1 não foi tido em conta devido ao seu valor ficar abaixo dos limites e o HAC8 devido ao ser valor ser acima dos limites. Para o cálculo da σ_m foram utilizados todos os provetes, originando assim um resultado de 387,86 MPa para o valor médio dos provetes. O ν teve retirado da sua ponderação o provete HAC8, devido a este não se enquadrar na gama calculada pois ficava acima desta, sendo o valor resultante de 0,302.

Tabela 27 - Resultados da placa HA

Provetes	ν	E (MPa)	σ_m (MPa)
HAC1	0,286	-	385,05
HAC2	0,289	17917,61	387,16
HAC3	0,323	17909,77	381,45
HAC4	0,307	17936,19	391,63
HAC5	0,299	18008,08	413,19
HAC6	0,305	18077,46	364,29
HAC7	0,305	17853,29	383,46
HAC8	-	-	396,66
Média	0,302	17950,40	387,86
Desvio padrão	0,011	72,83	13,03
CV	3,64 %	0,41 %	3,36 %

Na Figura 64 estão apresentadas as curvas σ - ε dos provetes HAC.

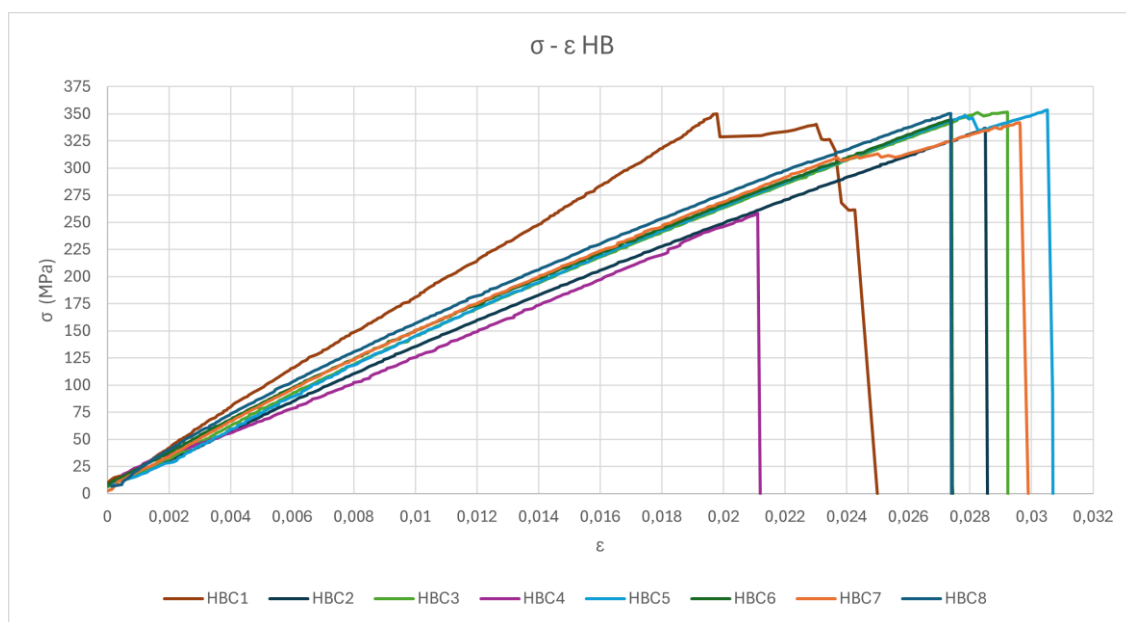
Figura 64 - curvas σ - ε dos provetes HAC

A Tabela 28 apresenta os valores dos provetes HBC. Para a obtenção de ν , o provete HBC5 foi eliminado, pois este apresentava um valor elevado demais para se enquadrar nos limites, o que resultou num ν calculado de 0,299. A σ_m obtida apresenta um valor de 346,94 MPa, o valor do provete HBC4 foi retirado pois não alcançava o limite inferior de significância estatística. Para o cálculo do E contaram apenas cinco provetes, pois o provete HBC1 apresentou um valor acima dos limites e os provetes HBC2 e HBC4 tiveram os seus valores abaixo do limite inferior da gama de valores estatisticamente aceitáveis, ao que resultou um E de 15543,38 MPa.

Tabela 28 - Resultados da placa HB

Provetes	ν	E (MPa)	σ_m (MPa)
HBC1	0,329	-	349,93
HBC2	0,299	-	336,84
HBC3	0,262	15028,74	351,50
HBC4	0,324	-	-
HBC5	-	15793,54	353,70
HBC6	0,229	15112,31	344,52
HBC7	0,310	15960,01	341,88
HBC8	0,337	15824,8	350,21
Média	0,299	15543,88	346,94
Desvio padrão	0,037	391,42	5,60
CV	12,37 %	2,52 %	1,60 %

Na Figura 65 estão apresentadas as curvas σ - ϵ dos provetes HBC. É possível constatar visualmente o valor superior do E do provete HBC1 e o valor reduzido da σ_m do provete HBC4. Estes provetes foram retirados para a ponderação dos valores finais.

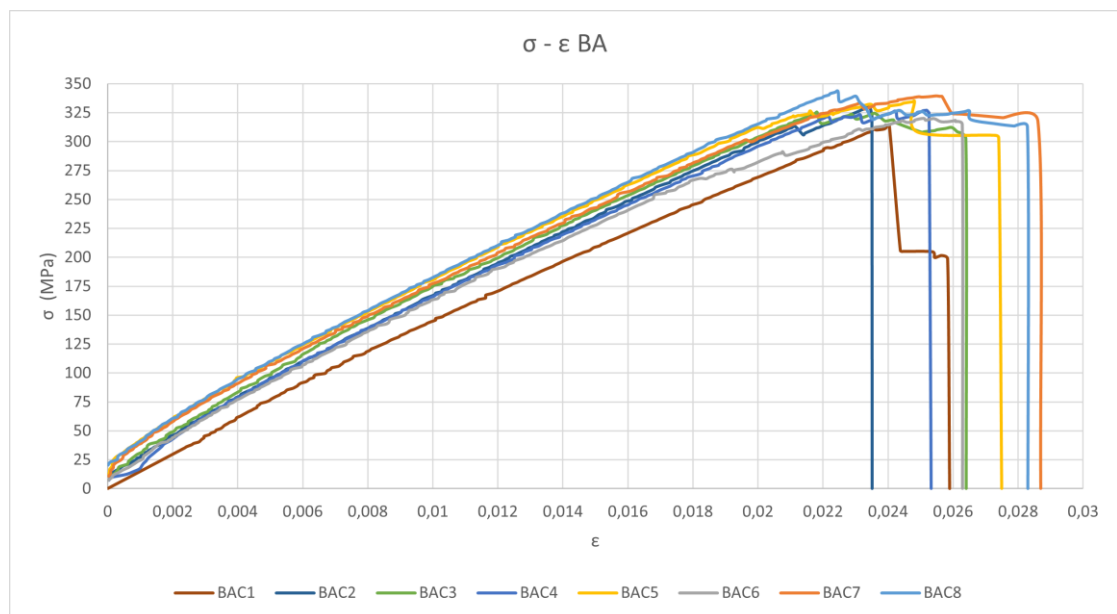
Figura 65 - curvas σ - ϵ dos provetes HBC

Na Tabela 29 é possível observar os valores obtidos para os provetes BAC. O ν obtido foi de 0,381. A σ_m média dos provetes foi de 329,36 MPa. Para o cálculo do E não foi considerado o provete BAC4, já que este estava acima do limite. O valor final foi de 16026,13 MPa.

Tabela 29 - Resultados da placa BA

Provete	ν	E (MPa)	σ_m (MPa)
BAC1	0,375	16007,21	314,04
BAC2	0,346	16291,34	329,74
BAC3	0,367	16420,03	325,47
BAC4	0,396	-	327,23
BAC5	0,420	16258,10	335,16
BAC6	0,344	16257,74	320,06
BAC7	0,394	15929,89	339,64
BAC8	0,402	16278,6	343,54
Média	0,381	16206,13	329,36
Desvio padrão	0,025	160,14	9,23
CV	6,56 %	0,99 %	2,80 %

As curvas σ - ϵ dos provetes BAC estão apresentadas na Figura 66.

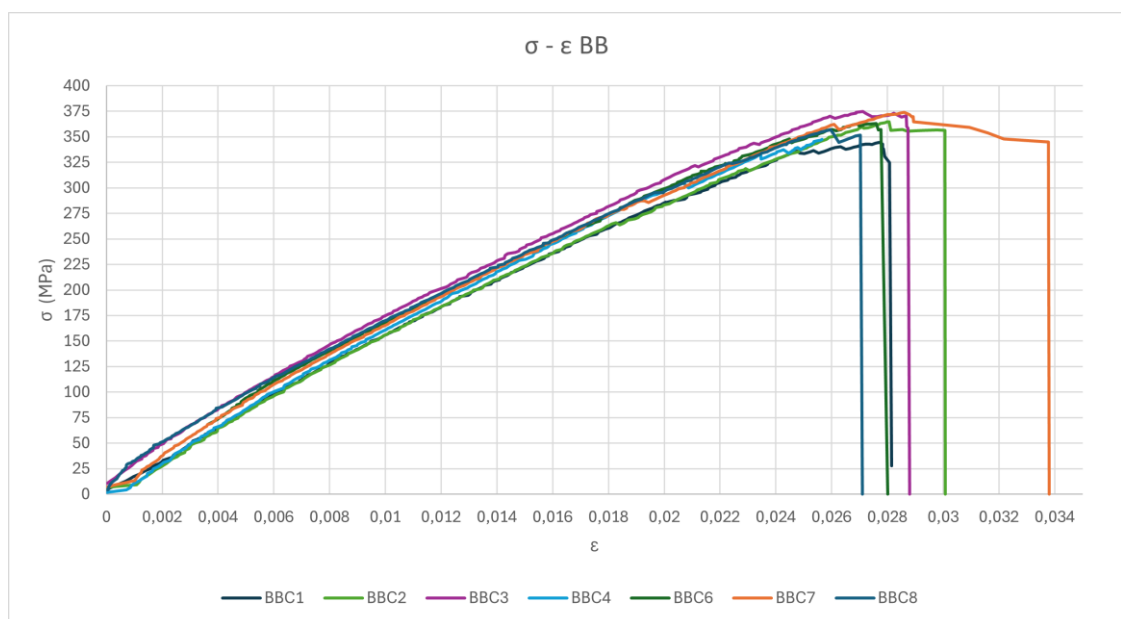
Figura 66 - curvas σ - ϵ dos provetes BAC

Na Tabela 30 estão apresentados os valores dos provetes BBC, exceto do provete BBC5 devido a falha do DIC. O ν resultante foi de 0,310, o E apresenta um valor de 16737,48 MPa e a σ_m 362,32 MPa.

Tabela 30 - Resultados da placa BB

Provetes	ν	E (MPa)	σ_m (MPa)
BBC1	0,302	16451,93	344,67
BBC2	0,320	17419,79	364,81
BBC3	0,309	16853,53	374,92
BBC4	0,308	17646,14	357,46
BBC5	-	-	-
BBC6	0,317	14784,92	363,17
BBC7	0,340	17930,92	374,09
BBC8	0,275	16075,16	357,17
Média	0,310	16737,48	362,32
Desvio padrão	0,018	1004,40	9,75
CV	5,81 %	6,00 %	2,69 %

A Figura 67 apresenta as curvas σ - ϵ dos provetes BBC, exceto o BBC5 que não foi passível a qualquer tipo de análise. O provete BBC7, apesar de apresentar valores estatisticamente significantes, sofreu deslizamento nas amarras na parte final do provete antes da sua rotura.

Figura 67 - curvas σ - ϵ dos provetes BBC

A Tabela 31 apresenta os valores finais, obtidos dos ensaios de tração. Estes valores são os considerados como as propriedades do material compósito obtido em cada resina e método do processo. Os valores finais são discutidos no capítulo 3.9.

É possível observar nos gráficos um elevado alinhamento e a sobreposição entre as curvas σ - ϵ e da consistência do ponto de σ_m . Esta constatação, aliada aos baixos valores do CV, permite concluir que os ensaios foram realizados corretamente e apresentam uma elevada repetibilidade.

Tabela 31 - Resultados obtidos na análise de dados

Placa	E - GPa	ν	σ_m - MPa
LA	16,08	0,341	351,50
LB	13,00	0,439	303,36
MA	17,64	0,322	324,20
MB	17,61	0,357	369,92
HA	17,95	0,302	387,86
HB	15,54	0,299	346,94
BA	16,21	0,381	329,36
BB	17,74	0,310	362,32

3.8.2. Ensaio de micrografia

Os resultados deste ensaio representam o TV existente em cada placa em específico. Estes resultados relacionam-se com o sucesso da aplicação do processo de fabrico. Como estes resultados não representam propriedades inerentes ao material a sua análise não requer validação estatística, visto serem uma representação numérica de um defeito do material compósito. Os resultados para os ensaios de micrografia foram obtidos através de subdivisões da secção do provete, como explicado no subcapítulo 3.7.3.2, o que significa que os dados finais são obtidos através da média aritmética destes valores. É possível calcular assim o valor final de TV, pois todas as imagens apresentam a mesma área, o que leva a todos valores terem a mesma ponderação no resultado.

Na Figura 68 estão apresentadas quatro imagens obtidas durante o ensaio, que representam as secções analisadas. A Figura 68 a) apresenta uma secção de provete sem vazios. A Figura 68 b) representa uma secção de provete com alguns vazios. A Figura 68 c) demonstra uma secção de provete com muitos vazios. A Figura 68 d) representa uma secção de provete com vazios de grandes dimensões. As imagens proveem todas de provetes diferentes. De referir que apesar de a Figura 68 a) representar uma secção sem vazios, o provete não era livre de vazios. Estas imagens demonstram os vários tipos de vazios e secções analisadas.

Os valores apresentados na Tabela 32 podem ser considerados os resultados da placa na sua totalidade pois os provetes foram obtidos por toda a placa, como apresentado na Figura 44. O TV apresenta-se expresso em percentagem, pois é um valor relativo que representa a quantidade de vazios distribuídos pela matriz do material compósito. Apesar de o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) serem elevados, devido a estes resultados serem descritivos, considera-se viável a sua análise, ao que não foi feita uma remoção de outliers como para os valores do ensaio de tração. De referir que este ensaio não é regulado por uma norma respetiva, tal como não existe método normalizado de remoção de *outliers*.

Desenvolvimento

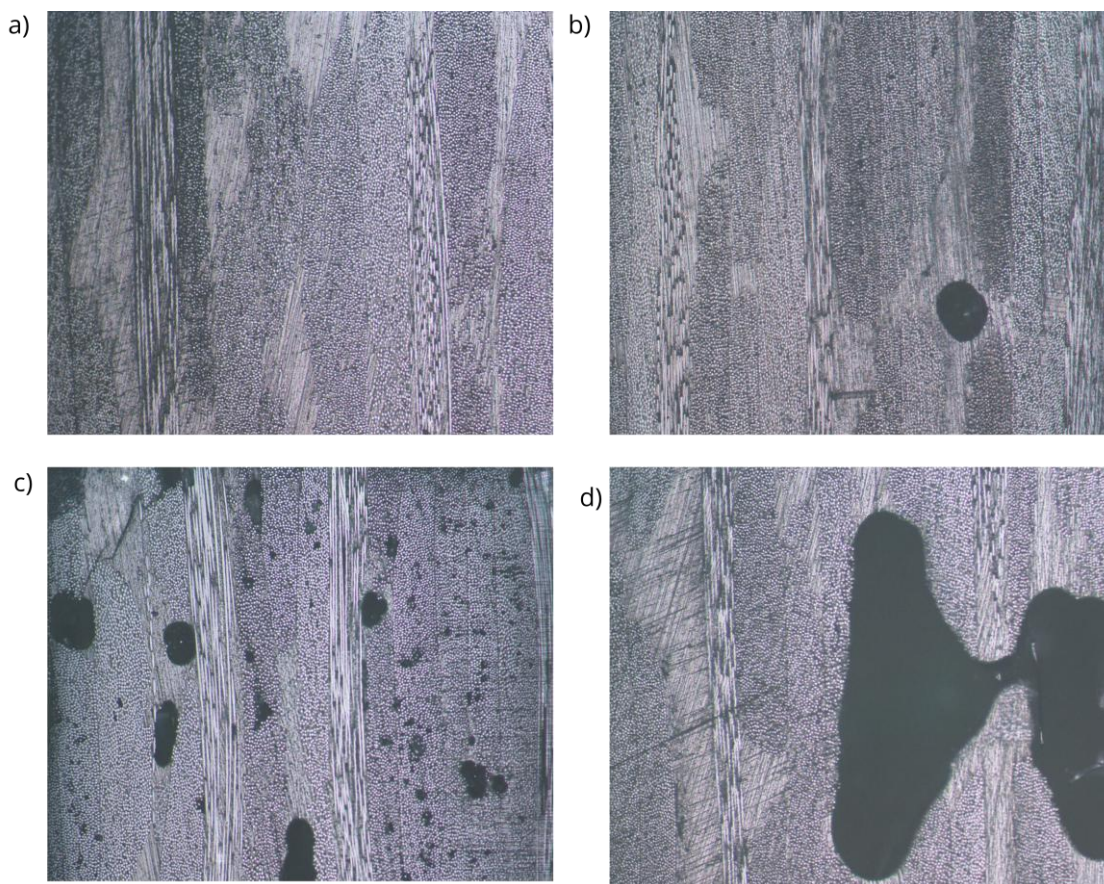


Figura 68 - a) Imagem sem vazios, provete LB5; b) imagem com alguns vazios, provete BB3; c) imagem com muitos vazios, provete BA1 e d) imagem com vazios de grandes dimensões, provete LB6

Tabela 32 - Resultados do ensaio de micrografia

Provete	LA	LB	HA	HB	MA	MB	BA	BB
B1	0,69 %	5,20 %	0,18 %	0,24%	0,78 %	1,10 %	4,26 %	1,81 %
B2	0,65 %	24,55 %	0,18 %	0,11 %	3,41 %	1,12 %	7,91 %	1,34 %
B3	0,59 %	1,29 %	0,08 %	0,04 %	5,19 %	0,19 %	3,38 %	0,50 %
B4	0,63 %	2,88 %	0,73 %	1,51 %	0,51 %	0,33 %	3,16 %	0,91 %
B5	2,66 %	6,68 %	2,44 %	0,42 %	6,15 %	0,07 %	4,59 %	1,47 %
B6	0,71 %	9,71 %	0,51 %	0,68 %	4,38 %	0,10 %	7,28 %	0,26 %
Média	0,99 %	8,39 %	0,69 %	0,50 %	3,40 %	0,48 %	5,10 %	1,05 %
Desvio padrão	0,75 %	7,71 %	0,82 %	0,50 %	2,12 %	0,45 %	1,84 %	0,55 %
CV	75,76 %	91,89 %	84,15 %	100 %	47,17 %	93,75 %	36,08 %	52,38 %

Na Tabela 33, estão apresentados os resultados da FVF. Tal, como na análise de TV estes são considerados os resultados da placa na sua totalidade pois os provetes foram obtidos por toda a placa, como apresentado na Figura 44. A FVF apresenta-se expressa em percentagem, pois é um valor relativo que representa a ponderação volúmica das fibras para o volume total do material compósito. Os valores do desvio padrão e CV são reduzidos, pelo que, não foi realizada

uma análise estatística para eliminação de *outliers*, pois foi considerado que a variação dos valores é suficientemente reduzida para permitir extrair conclusões face às placas.

Tabela 33 - FVF de fibras pelos provetes

Provete	LA	LB	HA	HB	MA	MB	BA	BB
B1	59,64%	45,32%	59,88%	47,54%	58,37%	56,29%	58,37%	57,92%
B2	59,88%	45,18%	60,36%	47,69%	57,25%	56,07%	58,48%	58,25%
B3	60,24%	46,88%	60,73%	48,86%	57,92%	56,39%	58,71%	59,64%
B4	61,60%	47,85%	60,00%	48,15%	59,06%	55,97%	59,41%	59,41%
B5	59,76%	46,88%	60,24%	47,85%	58,71%	57,92%	59,76%	59,41%
B6	60,24%	45,94%	60,12%	47,69%	58,59%	56,07%	59,76%	59,76%
Média	60,23%	46,34%	60,22%	47,97%	58,32%	56,45%	59,08%	59,06%
Desvio padrão	0,65%	0,95%	0,27%	0,44%	0,59%	0,67%	0,58%	0,71%
CV	1,09%	2,05%	0,46%	0,92%	1,01%	1,19%	0,99%	1,20%

Estes resultados apresentam significante importância na discussão dos resultados, pois estima-se que o TV influencia as propriedades mecânicas do material compósito. A discussão dos apresentados nas tabelas é desenvolvida no capítulo 3.9.

3.8.3. Ensaio de queima

Os resultados dos ensaios de queima, estão apenas relacionados às propriedades físicas do material compósito, que por sua vez estão diretamente relacionadas ao sucesso da aplicação do processo de fabrico. Estes dados foram obtidos e fornecidos por terceiros, justificado na secção 3.7.3.3, são apresentados para uma posterior análise e discussão para correlação de parâmetros e comparação com o ensaio de micrografia. De salientar que os dados são apresentados como fornecidos sem qualquer alteração. Consideram-se estes resultados como representativos de toda a placa pelo que a média aritmética destes representa o valor da placa.

Na Tabela 34 estão apresentados os valores obtidos do ensaio de queima dos provetes LAA. Estes indicam que a placa LA tem em uma FVF de 57,53 %, de resina de 40,98 % e um TV de 1,49 %.

A Tabela 35 apresenta os resultados do ensaio de queima dos provetes LBA. Os provetes LBA1 e LBA2 apresentam um TV negativo, o que significa que os cálculos das frações volúmicas resultam em valores acima dos 100%. Este problema pode ser causado pela utilização do método de ensaio da norma incorreto ou por a resina conter aditivos que impossibilitam um cálculo correto do ρ do material compósito. Estes provetes foram eliminados da ponderação final, ao que a FVF resultante é de 45,01 %, a de resina 50,61 % e o TV 4,37 %.

Tabela 34 - Resultados dos provetes LAA

Provete	FVF (%)	FVR (%)	TV
LAA1	56,81	42,14	1,04
LAA2	57,02	41,14	1,84
LAA3	57,46	41,59	0,96
LAA4	59,33	39,11	1,56
LAA5	57,30	41,15	1,55
LAA6	57,27	40,73	2,00
Média	57,53	40,98	1,49
Desvio padrão	0,83	1,03	0,42
CV	1,44	2,51	28,19

Tabela 35 – Resultados dos provetes LBA

Provete	FVF (%)	FVR (%)	TV
LBA1	-	-	-
LBA2	-	-	-
LBA3	44,40	51,80	3,80
LBA4	46,13	49,09	4,78
LBA5	44,15	53,41	2,44
LBA6	45,38	48,15	6,47
Média	45,01	50,61	4,37
Desvio padrão	0,79	2,42	1,70
CV	1,76	4,71	38,90

Na Tabela 36 estão apresentados os valores provenientes do ensaio de queima dos provetes HAA. O provete HAA1 apresenta um TV negativo, o que pode ser causado pelos mesmos motivos descritos na análise anterior. O resultado médio para a placa corresponde a uma FVF de 57,35 %, uma FVR de 40,25 % e um TV de 2,40 %. Para este resultado foram considerados todos os provetes inclusive o valor negativo.

Na Tabela 37 são relatados os resultados do ensaio de queima dos provetes HBA. A FVF resultante apresenta um valor de 45,65 %, a FVR corresponde a 50,98 % e o TV resulta em 3,38 %.

A Tabela 38 apresenta os resultados dos provetes MAA. O TV corresponde a 5,85 %, a FVF tem o valor de 58,29 % e FVR apresenta o resultado de 35,87 %.

Tabela 36 - Resultados dos provetes HAA

Provete	FVF (%)	FVR (%)	TV
HAA1	-	-	-
HAA2	57,86	39,15	3,00
HAA3	57,20	41,06	1,74
HAA4	56,75	40,52	2,73
HAA5	57,63	39,79	2,58
HAA6	57,32	40,75	1,94
Média	57,35	40,25	2,40
Desvio padrão	0,38	1,36	0,54
CV	0,66	3,38	22,50

Tabela 37 - Resultados dos provetes HBA

Provete	FVF (%)	FVR (%)	TV
HBA1	45,10	52,30	2,60
HBA2	44,63	52,60	2,77
HBA3	45,68	52,13	2,19
HBA4	45,87	51,81	2,33
HBA5	46,83	46,19	6,98
HBA6	45,72	50,87	3,41
Média	45,65	50,98	3,38
Desvio padrão	0,68	2,42	1,82
CV	1,49	4,75	53,85

Tabela 38 - Resultados dos provetes MAA

Provete	FVF (%)	FVR (%)	TV
MAA1	59,16	35,94	4,89
MAA2	58,43	35,72	5,85
MAA3	58,43	35,58	5,99
MAA4	57,84	35,81	6,35
MAA5	57,94	36,34	5,72
MAA6	57,91	35,80	6,29
Média	58,29	35,87	5,85
Desvio padrão	0,46	0,18	0,60
CV	0,79	0,50	10,26

A Tabela 39 apresenta os resultados do ensaio de queima dos provetes MBA. Estes resultados correspondem a uma FVF de 54,55 %, uma FVR de 42,90 % e um TV de 2,55 %.

Desenvolvimento

Tabela 39 - Resultados dos valores MBA

Provete	FVF (%)	FVR (%)	TV
MBA1	53,36	42,45	4,19
MBA2	54,27	42,33	3,40
MBA3	54,82	43,09	2,10
MBA4	55,99	43,89	0,13
MBA5	54,42	42,44	3,14
MBA6	54,44	43,22	2,34
Média	54,55	42,90	2,55
Desvio padrão	0,78	0,61	1,41
CV	1,43	1,42	55,29

Na Tabela 40 estão apresentados os valores dos provetes BAA. O provete BAA3 não apresenta valores, pois o seu ensaio forneceu resultados inconclusivos. Os provetes BAA2 e BAA4 apresentam valores negativos, foram eliminados para o cálculo do resultado da placa. O resultado médio desta placa corresponde à FVF de 57,54 %, à FVR de 40,22 % e ao TV de 2,24 %.

Tabela 40 - Resultados dos provetes BAA

Provete	FVF (%)	FVR (%)	TV
BAA1	55,91	40,46	3,63
BAA2	-	-	-
BAA3	-	-	-
BAA4	-	-	-
BAA5	58,09	40,04	1,86
BAA6	58,60	40,17	1,23
Média	57,54	40,22	2,24
Desvio padrão	1,17	0,21	1,25
CV	2,03	0,52	55,80

A Tabela 41 apresenta os valores obtidos dos provetes BBA. O provete BBA6 apresenta um valor de TV negativo, que se estima ocorrer pelos mesmos motivos apresentados no primeiro parágrafo. Devido a este motivo o provete não entrou na ponderação da média final, e por isso a FVF obtida nesta média corresponde a 55,72 %, a FVR resulta em 43,42 % e o TV corresponde a 0,86 %.

Tabela 41 - Resultados dos provetes BBA

Provete	FVF (%)	FVR (%)	TV
BBA1	55,50	43,55	0,95
BBA2	55,13	43,37	1,50
BBA3	55,75	44,06	0,19
BBA4	56,06	43,37	0,57
BBA5	56,18	42,75	1,06
BBA6	-	-	-
Média	55,72	43,42	0,86
Desvio padrão	0,38	0,47	0,50
CV	0,68	1,08	58,14

A análise e discussão destes resultados é apresentada no capítulo 3.9. É importante referir que os valores negativos proveem dos cálculos utilizando as equações de acordo com a norma. Estes resultados devem-se ao facto de as resinas utilizadas conterem aditivos ignífugos. Estes aditivos não têm a sua influência contemplada no método de ensaio da norma utilizado. A correção do método utilizado não foi possível devido à falta de informação sobre os aditivos. Caso estivesse disponível o tipo de aditivo nas resinas seria possível encontrar um método adequado à execução dos ensaios.

3.9. Discussão dos Resultados

Os resultados apresentados no capítulo 3.8 individualmente representam propriedades mecânicas e físicas do material compósito obtido. Observa-se que é possível procurar a existência de relações entre as propriedades, entre as propriedades e o método de fabrico, e entre a posição dos provetes na placa e as propriedades obtidas.

De modo a facilitar a correlação entre as várias propriedades determinadas, na Tabela 42 estão apresentadas as propriedades mais importantes e os seus valores por placa. De referir que os valores de TV obtidos pelo ensaio de queima estão apresentados por serem importantes, todavia para correlação de propriedades são considerados os obtidos por micrografia por alguns provetes não apresentarem valores plausíveis. É justificado que tal aconteça pelos motivos descritos na secção 3.8.3. Estes são comparados aos valores obtidos pelos ensaios de micrografia. As correlações entre os resultados apresentam algumas inconclusividades, possivelmente pelo facto de todas as resinas serem compostas por materiais diferentes e apresentarem propriedades base diferentes (Tabela 12).

Desenvolvimento

Tabela 42 - Propriedades mais importantes e os respectivos valores

Placa	E - GPa	σ_m - MPa	FVF (%) - Cálculo	TV (%) - Micrografia	FVF (%) - Queima	TV (%) - Queima
LA	16,08	351,50	60,23	0,99	57,53	1,49
LB	13,00	303,36	46,34	8,39	45,01	4,37
MA	17,64	324,20	58,32	3,40	58,29	5,85
MB	17,61	369,92	56,45	0,48	54,55	2,55
HA	17,95	387,86	60,22	0,69	57,35	2,40
HB	15,54	346,94	47,97	0,50	45,65	3,38
BA	16,21	329,36	59,08	5,10	57,54	2,24
BB	17,74	362,32	59,06	1,05	55,72	0,86

Na Figura 69 está apresentado o gráfico que relaciona o E e o TV, da micrografia. É possível observar que, na resina L e na resina B, existe uma redução do valor do E com o aumento do TV, o que significa que para estas resinas é possível associar um E elevado com um TV reduzido e vice-versa. Na resina M, apesar de a diferença entre os teores de vazios entre as placas, o E mantém-se constante, pelo que não é possível relacionar o E com o TV. Na resina H verifica-se um aumento do E com o aumento do TV. Todavia, não é possível afirmar que o aumento do TV aumenta o E deste material pois os valores apresentam apenas 0,19 % de diferença. Devido às diferenças de correlação entre estas propriedades não é possível retirar uma tendência geral.

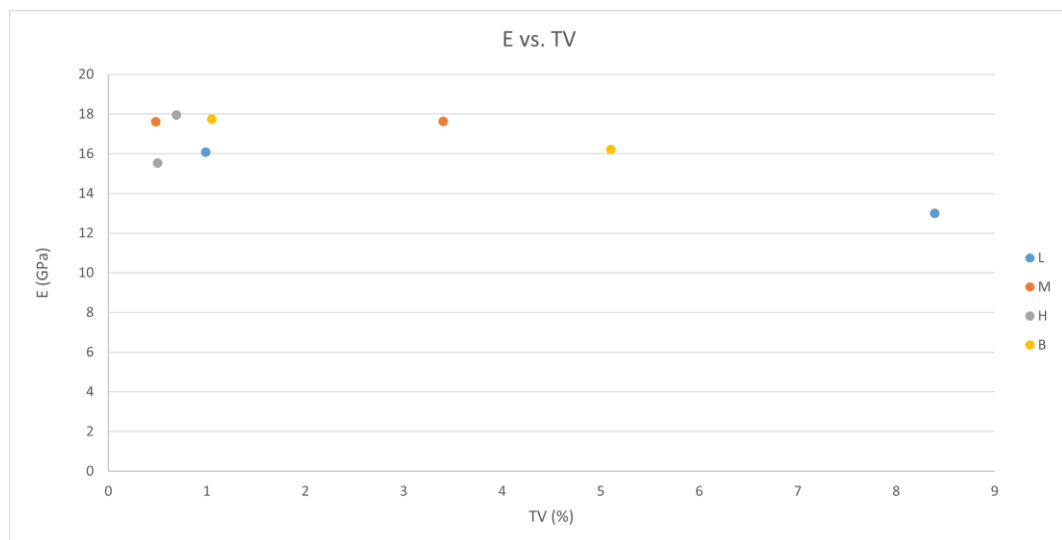


Figura 69 - Relação entre o E e o TV

A Figura 70 demonstra a relação entre a σ_m e o TV. Nas resinas L, M e B é possível observar que a σ_m é mais elevada quanto mais reduzido for o TV. Na resina H observa-se que a σ_m aumenta juntamente como TV, exatamente o contrário das outras três resinas. Todavia, devido à proximidade entre os valores, estes são considerados inconclusivos. Como a maioria das resinas apresenta uma σ_m mais elevado conforme menor o TV, pode se concluir que existe uma tendência que liga estas duas propriedades.

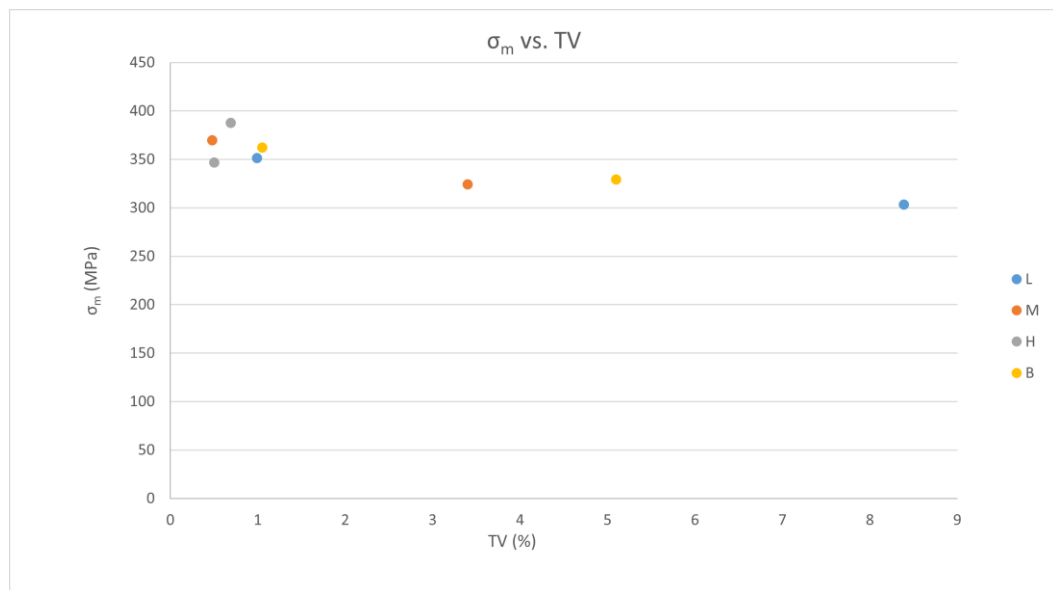


Figura 70 - Gráfico de relação entre σ_m e o TV

A Figura 71 relaciona o E à FVF. Nas resinas L e H é possível observar o aumento do E com o aumento da FVF, ao que se pode concluir que, para estas, quanto maior a FVF mais elevado será o E . Nas resinas M e B os valores apresentam entre si uma variação pequena não é possível retirar tendências sobre a relação entre estas duas propriedades.

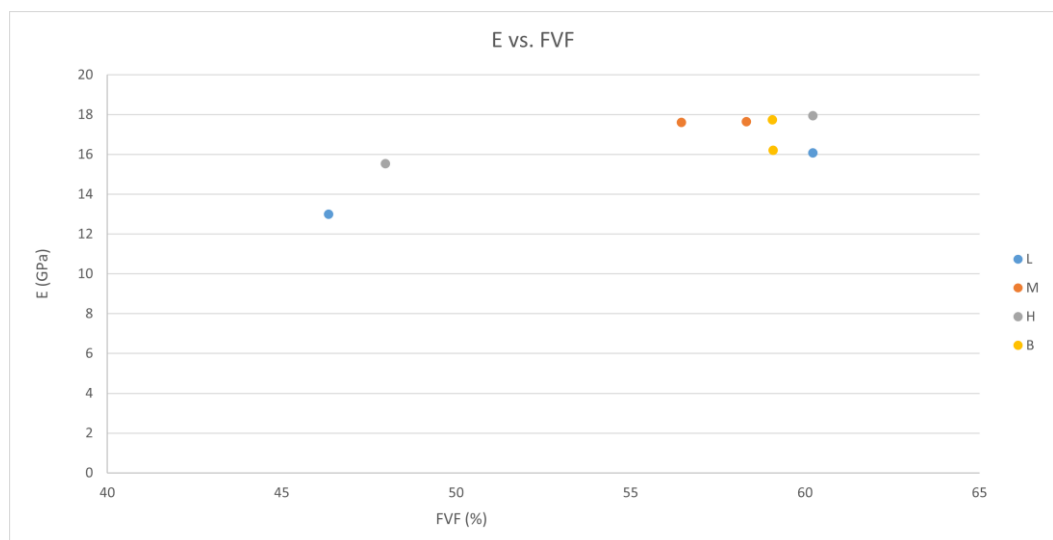


Figura 71 - Relação entre o E e a FVF

Na Figura 72 está apresentada a relação entre σ_m e a FVF. Nas resinas L e H, a σ_m aumenta juntamente com o aumento da FVF. Nas resinas M e B, devido à proximidade entre os valores não é possível estimar alguma tendência ou determinar a relação entre estas propriedades.

Desenvolvimento

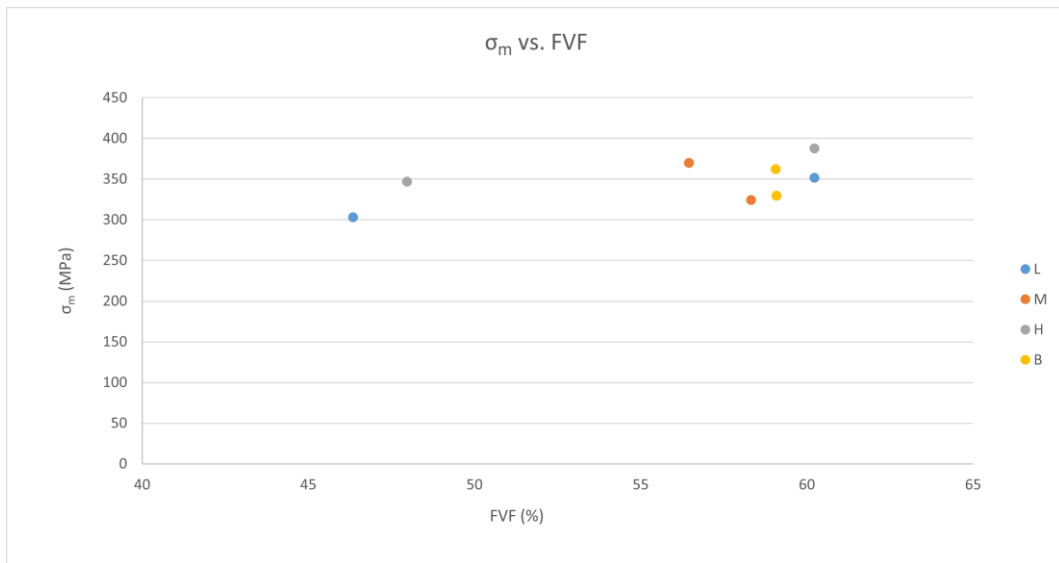


Figura 72 - Relação entre a σ_m e a FVF

De acordo com a informação apresentada nos gráficos anteriores, é possível determinar que o TV e a FVF influenciam as propriedades mecânicas do material compósito. De acordo com as tendências é possível então afirmar que as melhores propriedades mecânicas resultam de um material compósito com uma FVF elevada e um TV reduzido ou idealmente nulo. Devido à importância destas propriedades, torna-se relevante a sua correlação com o método de VARTM utilizado. Na Figura 73 é possível observar a variação da FVF de acordo com o método de vácuo, ao que se pode concluir que o método de vácuo aberto permite uma menor variação da FVF. Contudo, é possível atribuir alguma da variação dos resultados em vácuo fechado às fugas no saco de vácuo durante o fabrico das placas LB e HB.

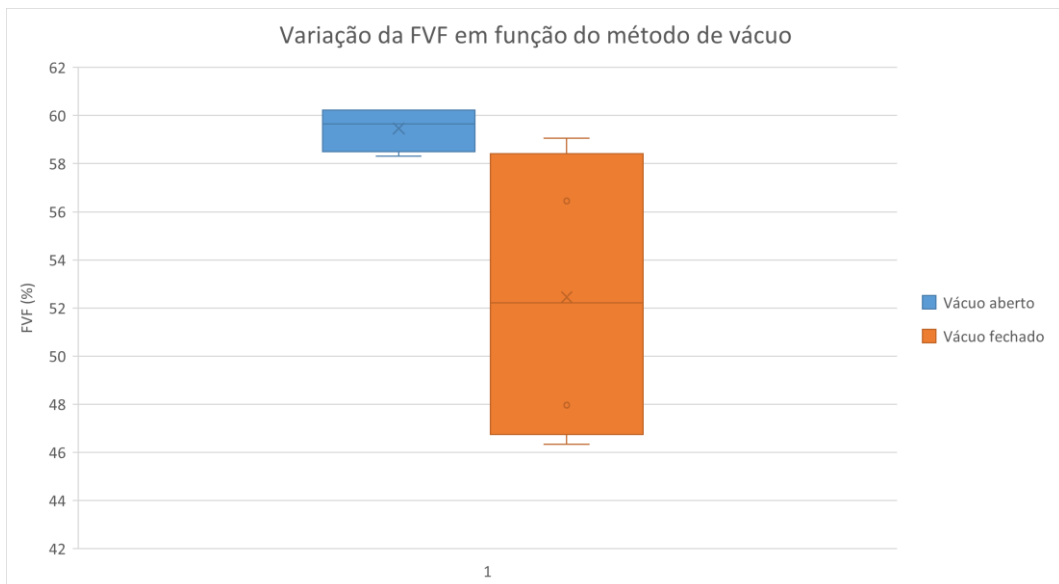


Figura 73 - Gráficos de caixa de bigodes da FVF em função do método de vácuo

Na Figura 74 está apresentada a variação do TV de acordo com o método de vácuo, o que permite concluir que o método de vácuo aberto resulta numa menor variação do TV no material

compósito. É observável uma relação entre a FVF e a perda de compactação do reforço e matriz por perda de vácuo através de fugas durante o processo. Como mencionado na secção 3.7.1, as placas LB e HB apresentaram perda de compactação na sua cura, o que levou a uma perda de aproximadamente 14 % de FVF em ambas as placas face ao valor das placas LA e HA.

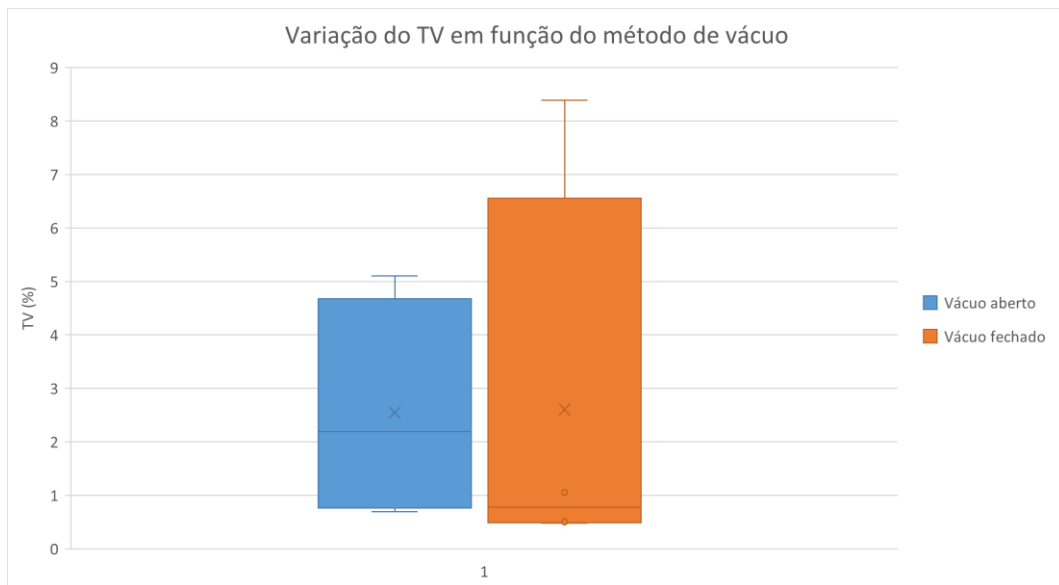


Figura 74 - Gráficos de caixa de bigodes do TV em função do método de vácuo utilizado

A Figura 75 apresenta os gráficos de caixas de bigodes que demonstram a variação da FVF em função da existência ou não de fuga no saco de vácuo. Apesar de apenas dois sacos apresentarem fugas, os seus efeitos foram notórios especialmente por introduzirem *outliers*, existindo uma diferença de 10 % entre o menor valor de FVF das placas sem fuga e a placa com fuga que apresenta o melhor FVF.

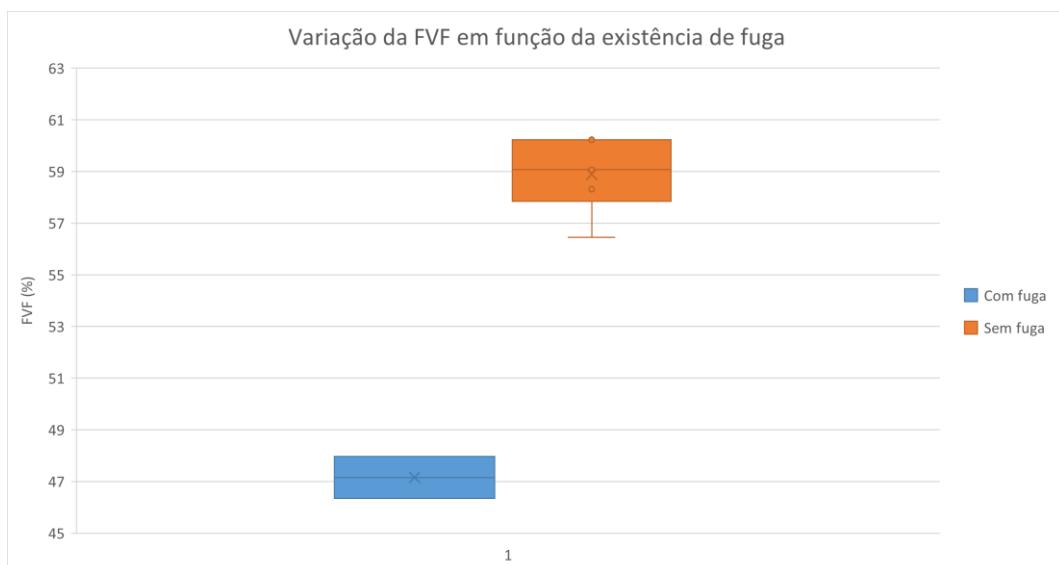


Figura 75 - Variação da FVF em função da existência de fuga no saco de vácuo

Na Figura 76 observam-se os gráficos de caixa de bigodes do TV relativamente à existência ou não de fugas no saco de vácuo. De acordo com os valores obtidos de TV em relação às fugas

Desenvolvimento

das placas LB e HB, não se obtém um resultado conclusivo, pois os valores representam o maior TV registrado de 8,39 % da placa LB e o menor TV registrado de 0,50 % da placa HB.

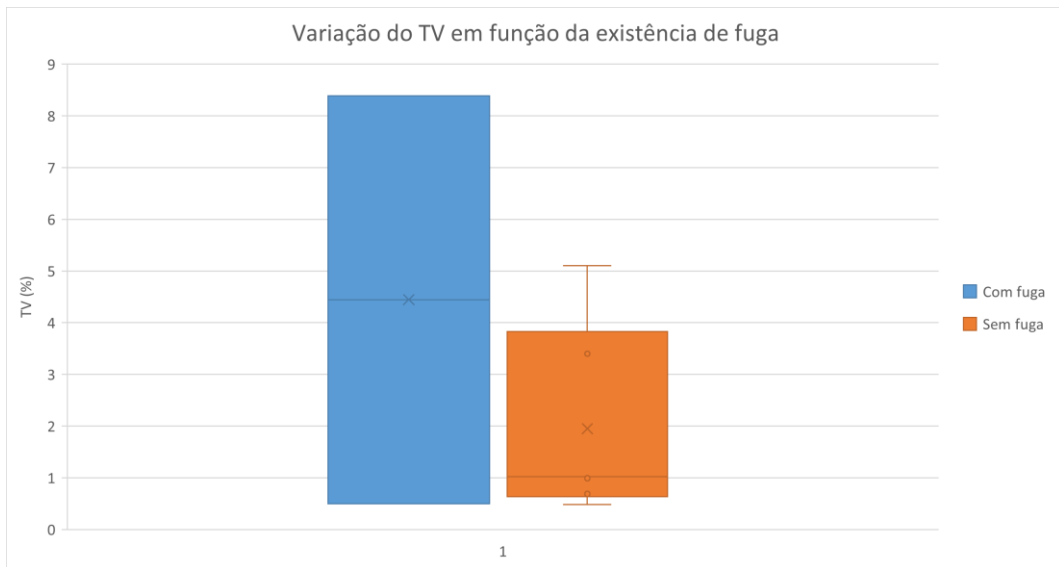


Figura 76 - Gráfico de caixa de bigodes do TV em função da existência de fugas no saco de vácuo

Na Figura 77 estão apresentadas as caixas de bigodes que demonstram a variação da FVF das placas obtidas em função do tamanho do saco de vácuo utilizado. Relativamente aos tamanhos diferentes entre os sacos de vácuo, é possível observar uma maior proximidade entre os valores das propriedades das placas obtidas pelos sacos de 600 x 600 mm² (placas MA, MB, BA e BB) entre o método de vácuo aberto e o método de vácuo fechado. Contudo, os sacos de 800 x 800 mm² podem ter a sua maior variação entre os resultados atribuída à existência de fugas no saco de vácuo durante o método de vácuo fechado. De acordo com os resultados da Figura 78, o TV apresenta a mesma relação de variação com o saco de vácuo que a FVF.

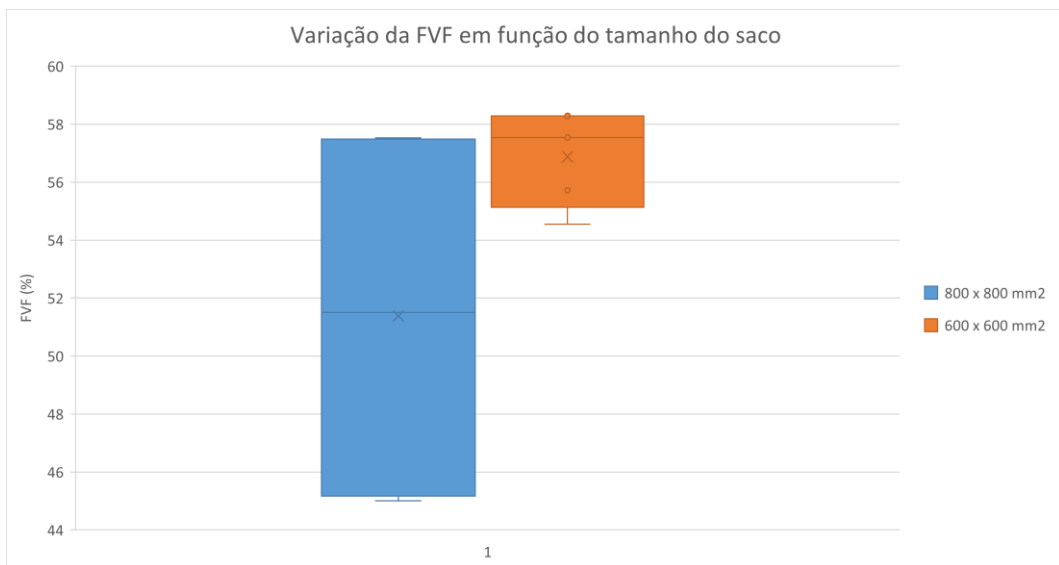


Figura 77 - Gráfico de caixas de bigodes da FVF por tamanho de saco

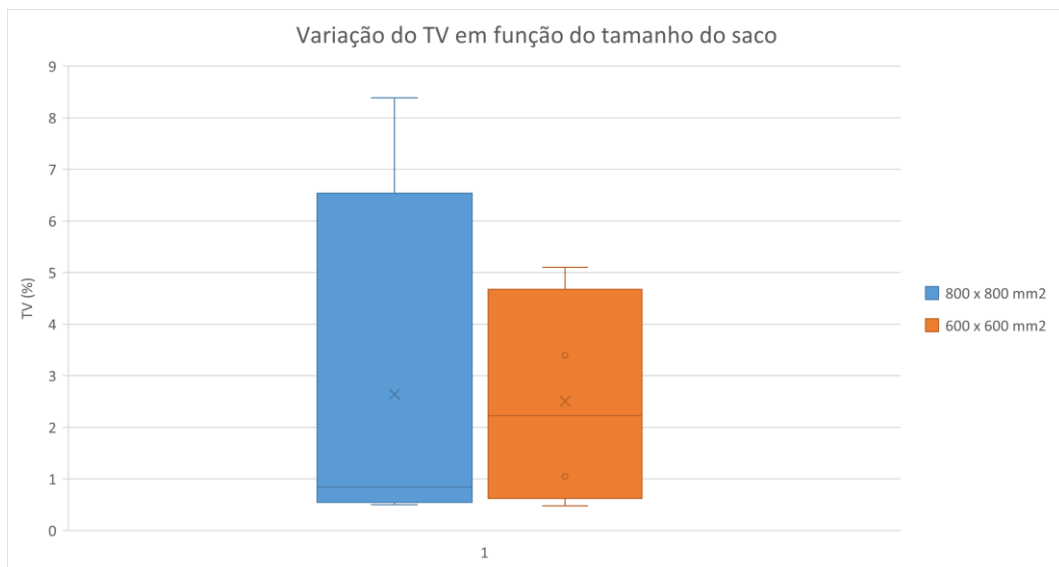


Figura 78 - Gráfico de caixas de bigodes da FVF por existência de fuga

É possível analisar os resultados obtidos na caracterização mecânica de acordo com a posição de cada provete na placa relativamente à entrada e à saída de vácuo. Caso o processo de fabrico esteja implementado com total eficiência e sem falhas esta correlação não existe, já que o material compósito é totalmente homogéneo (a uma escala macro) e não existem zonas com propriedades diferentes. Ao ser realizada esta análise nos resultados obtidos do E e σ_m , é possível concluir que o processo foi bem implementado e fornece um material compósito homogéneo pois o CV destes valores nunca ultrapassa os 6 %, sendo o CV médio do E de 2,64 % e da σ_m de 2,83 %. Os valores de v apresentam uma grande variação, atribuída ao método de obtenção de dados utilizados para o cálculo destes, como mencionado na secção 3.7.3.1, e não em relação à posição dos provetes na placa, pois os valores variam entre todas as posições.

Relativamente aos ensaios de caracterização física dos materiais compósitos fabricados, os resultados dos ensaios de micrografia permitem uma análise e discussão das relações entre as propriedades mecânicas e físicas do material compósito. Em função dos resultados dos ensaios de micrografia, as placas obtidas são homogéneas uma vez que não é possível estabelecer uma relação entre os teores de vazios ou fração volúmica relativamente à sua posição na placa. Esta relação não é possível de estabelecer pois os valores apresentam uma variação aparentemente aleatória por toda a placa, sem ser detetável um padrão. Os dados dos ensaios de queima são utilizados para extrair comparações relativamente aos ensaios de micrografia, apesar das falhas mencionadas na secção 3.7.3.3. Comparando os dados dos ensaios de micrografia e de queima, os valores apresentam uma diferença máxima entre valores médios de FVF de aproximadamente 3 %, o que indica uma baixa variação entre estes. Os dados do TV obtidos por ambos os métodos apresentam uma diferença relativa elevada entre todos os valores, mais elevada do que na FVF, o que se considera estar relacionado com o método de determinação do TV da micrografia ter por base medições relativas à área e da queima ter por base medições de volumes.

Todos os resultados obtidos permitem assim afirmar que o processo de fabrico foi aplicado corretamente e produziu resultados utilizáveis. É assim possível a aplicação desta combinação

Desenvolvimento

de matriz e reforço para outras aplicações. A combinação ideal para o processo de infusão consiste no método de vácuo fechado com o saco de vácuo de 600 x 600 mm², com a matriz de resina B.

Esta combinação foi a determinada como ideal visto apresentar os melhores resultados mecânicos e bons resultados físicos, semelhantes aos melhores resultados físicos. Esta decisão teve em conta todas as outras resinas, mas a resina escolhida foi comparada especificamente à resina M devido estas apresentarem propriedades semelhantes. Contudo, a resina B apresentou maior facilidade de processamento e melhor *E*. Relativamente às restantes propriedades, apesar do TV desta ser superior ao da resina M, como determinado anteriormente (Figura 70) este valor influencia a σ_m , que é inferior na resina B. Como a diferença existente de σ_m entre os laminados é reduzida, cerca de 2 %, esta não é considerada como relevante. Todavia caso seja reduzido o TV na aplicação do processo de fabrico é esperado que σ_m aumente, tornando assim esta resina melhor em ambas as propriedades mecânicas. Em termo da FVF a resina B apresenta um valor mais elevado.

A escolha do saco de 600 x 600 mm² deveu-se a este apresentar melhores resultados e foi considerado que as fugas encontradas eram inerentes ao tamanho do saco de 800 x 800 mm². O método de vácuo fechado foi determinado como melhor, pois apesar de apresentar maior variação dos valores de TV e FVF, a queda do FVF pode ser atribuída às fugas relativas à dimensão do saco (Figura 75). Relativamente ao TV quando eliminado o valor extremo da placa LB, a sua variação é mais reduzida que a do método de vácuo aberto, esta variação é demonstrada na Figura 79.

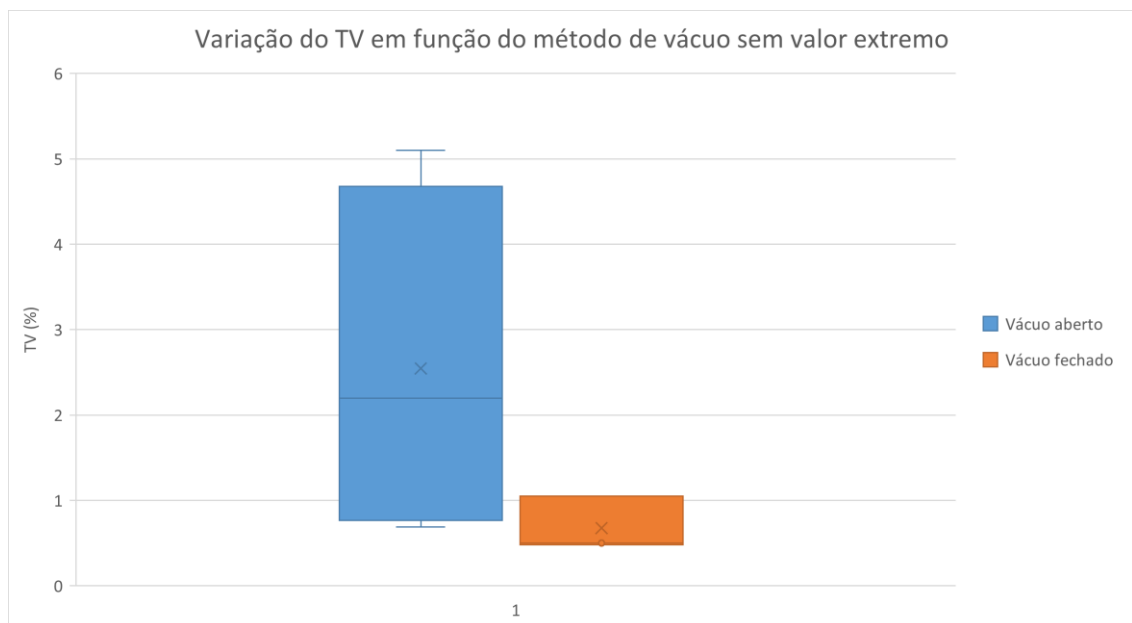


Figura 79 - Relação entre TV e método de vácuo sem valor extremo

4. Conclusão

No primeiro subcapítulo são apresentadas as conclusões finais sobre todo o trabalho desenvolvido e as limitações encontradas. No segundo subcapítulo são introduzidos os trabalhos futuros que podem partir deste.

4.1. Conclusões Finais

Após todo o trabalho desenvolvido no decorrer do estágio e no desenvolvimento da presente dissertação é possível afirmar que os seus objetivos foram alcançados. Deste modo, e de acordo com os objetivos estabelecidos no capítulo 1.2, a Tabela 43 apresenta os objetivos, o respetivo trabalho desenvolvido e as conclusões obtidas. Com o cumprimento dos objetivos foi possível alcançar a finalidade desta tese que era a avaliação da viabilidade do processamento de peças para material circulante em material compósito pelo processo VARTM.

Tabela 43 - Objetivos e o seu cumprimento

Objetivo	Trabalho desenvolvido e conclusões
Identificação dos requisitos do projeto PRR	Apresentados os objetivos, requisitos e limitações impostos pelo projeto PRR, que conduziram todo o trabalho desenvolvido no estágio.
Fabrico dos materiais compósitos a analisar	Os materiais compósitos a analisar foram fabricados pelo processo de VARTM com o método de vácuo aberto e com o método de vácuo fechado. O sucesso, do ponto de vista experimental, foi determinado diretamente após a sua implementação, pois permitiu o fabrico de placas conducentes à obtenção de provetes para os ensaios de caracterização mecânica e física. Apesar deste sucesso experimental no seu decorrer ocorreram imprevistos os quais foram mitigados através de melhorias na implementação do processo.
Ensaio de tração	Os ensaios de tração decorreram de acordo com o esperado, apesar das dificuldades relativas à utilização do DIC. Estes foram executados de acordo com a norma própria e permitiram obter os dados necessários para uma caracterização mecânica dos materiais compósitos obtidos nomeadamente pela obtenção de E , σ_m e ν .

Tabela 43 - Objetivos e o seu cumprimento (continuação)

Ensaio de micrografia	Os ensaios de micrografia tiveram a sua execução de acordo com o esperado, apesar da dificuldade em encontrar o método de obtenção de imagens ideal. Estes ensaios permitiram a obtenção de todos os resultados necessários para a avaliação do TV por meio do algoritmo. Os provetes de micrografia foram utilizados para a determinação da FVF por meio de cálculo analítico.
Ensaio de queima	Os ensaios de queima foram realizados por terceiros. Contudo, devido à sua importância, foram analisados com o objetivo de comparar os resultados obtidos com aqueles dos ensaios de micrografia. Estes ensaios não decorreram como esperado, devido às dificuldades explicitadas. Contudo, permitiram uma maior confiança nos dados da FVF obtidos pelo ensaio de micrografia devido à proximidade entre estes. Em relação aos dados de TV, estes foram considerados aquém da realidade, pelo que não foram utilizados para análise.
Análise dos resultados dos ensaios	A análise dos resultados dos ensaios utilizou um método diferente para cada um deles. Nos ensaios de tração e queima, esta foi realizada de acordo com a norma utilizada para cada ensaio. A análise dos dados dos ensaios de tração permitiu concluir que o ensaio teve sucesso na sua realização e que os resultados obtidos eram consistentes apresentando sempre um baixo CV e elevada repetibilidade. Os dados dos ensaios de queima, apesar de analisados de acordo com a norma, apresentaram resultados inconclusivos devido à existência de valores fisicamente impossíveis, ao que se concluiu que o ensaio devia ter seguido um método da norma diferente, pois os aditivos ignífugos da resina podem causar alterações no material não previstas no método. Os resultados dos ensaios de micrografia foram analisados sem seguir qualquer norma. Estes foram determinados como viáveis e corretos, e que foram realizados corretamente.
Discussão dos resultados	A análise e discussão dos resultados permitiu estabelecer relações entre as propriedades mecânicas e físicas com os parâmetros do processo e entre estas. As correlações consideradas mais importantes foram entre as propriedades físicas e as mecânicas. De referir a relação entre a FVF com E e com σ_m , que indica que, quão mais elevada a FVF, mais elevados são os valores destas propriedades. Também apresentou importância a correlação do TV com estas propriedades mecânicas, no sentido que uma redução do TV aumenta os valores destas propriedades.

Tabela 43 - Objetivos e o seu cumprimento (continuação)

Discussão dos resultados (continuação)	<p>Após a determinação da correlação entre as propriedades físicas e mecânicas foi importante relacioná-las aos parâmetros do processo, para obter os melhores parâmetros do processo a utilizar.</p> <p>De acordo com estas relações e resultados foi possível determinar que o processo foi aplicado corretamente e é viável. Este proporciona materiais compósitos adequados à aplicação em componentes de material circulante.</p>
Seleção do material compósito e método de fabrico	<p>A seleção do material compósito foi bem-sucedida pois foi determinado que ao ser aplicado o VARTM com o método de vácuo aberto na resina B com o reforço de tecido de fibra de vidro permite a obtenção das melhores propriedades e físicas. Foi também possível propor melhorias possíveis à aplicação deste com o objetivo de melhorar os resultados face aos obtidos nesta análise.</p>

Após os resultados obtidos é possível concluir que o processo VARTM, em conjunção com a resina B e o reforço utilizado, permite o fabrico de componentes em material compósito com propriedades mecânicas e físicas adequadas à sua utilização em material circulante.

4.2. Limitações e Trabalhos Futuros

As limitações encontradas no decorrer deste trabalho deveram-se à falta de tempo e prazos inerentes ao projeto do PRR. As limitações por falta de tempo surgem por prazos do projeto e académicos. Uma limitação devido a prazos académicos que surgiu apresentou-se no ensaio de micrografia, já que não existiu a possibilidade de obter imagens com maior ampliação para uma avaliação com maior definição. Estas manifestam-se também na separação entre o trabalho desenvolvido e os trabalhos futuros, o que significa que caso os prazos estivessem alinhados os projetos futuros estariam integrados na presente dissertação.

Para trabalhos futuros derivados deste trabalho é recomendável dividir o trabalho desenvolvido para o INEGI e o trabalho desenvolvido para o projeto do PRR. No âmbito de trabalho futuro a ser desenvolvido no INEGI, é possível a utilização dos resultados obtidos no ensaio de micrografia para treino e desenvolvimento das redes neuronais da aplicação de inteligência artificial, que foi avaliada para utilizar neste trabalho. Este procedimento permite a evolução e melhoria da aplicabilidade da aplicação de deteção de TV. Como trabalhos futuros no âmbito do projeto do PRR, estes são os apresentados no planeamento do projeto. De referir os ensaios de fumo e fogo de acordo com a norma EN 45545-2 HL2 R17, do material compósito e o respetivo *gelcoat*, testes de aplicação do processo de fabrico para o protótipo da máscara frontal e operacionalização do fabrico no parceiro do projeto designado para o propósito.

Como trabalho futuro é também possível a utilização dos resultados obtidos para a simulação do processo e determinação de estratégias de aplicação do mesmo, nomeadamente as posições das entradas e saídas numa peça com formato complexo.

Conclusão

Referências

- [1] T. C. Shedd, J. E. Vance, and G. F. Allen, "Railroad," *Britannica*. Britannica, Chicago, Nov. 10, 2024.
- [2] I. - International Energy Agency, "The Future of Rail Opportunities for energy and the environment IN COLLABORATION WITH," 2019. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [3] Union Internationale des Chemins de fer, "Railway_Statistics_Synopsis_-_2024_Edition," p. 4, 2024.
- [4] Infraestruturas de Portugal, "Rede Ferroviária," <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/>. Accessed: Nov. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/infraestruturas/rede-ferroviaria>
- [5] C.-C. De Portugal, "Relatório de Contas 2023 2 Ficha Técnica," Lisboa, 2023.
- [6] Instituto Nacional de Estatísticas, "Estatísticas dos Transportes e Comunicações_2022," Lisboa, 2022.
- [7] J. Ihme, *Rail Vehicle Technology*. New York: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. doi: 10.1007/978-3-658-36969-9.
- [8] M. M. Agarwal, *SATISH CHANDRA*. 2007.
- [9] "Locomotiva série 2600-2620 | CP - Comboios de Portugal." Accessed: Dec. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.cp.pt/institucional/pt/cultura-ferroviaria/frota-material-circulante/2600-2620>
- [10] D. W. Hinde, *ELECTRIC AND DIESEL-ELECTRIC LOCOMOTIVES*. Londres, 1948.
- [11] Comboios de Portugal, "Frota de Material Circulante | CP - Comboios de Portugal." Accessed: Nov. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.cp.pt/institucional/pt/cultura-ferroviaria/frota-material-circulante>
- [12] "Comboio série 4001-4010 e 4051-4060 | CP." Accessed: Dec. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.cp.pt/institucional/pt/cultura-ferroviaria/frota-material-circulante/material-4001-4010-e-4051-4060>
- [13] A. T. Lima *et al.*, "Mapping circular economy practices for steel, cement, glass, brick, insulation, and wood – A review for climate mitigation modeling," Sep. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2024.114697.
- [14] J. Jeschonowski-Papstein, L. Gast, M. Binding, and M. Faulstich, "Improving the recycling of plastic parts in household appliances—a review," *Resources, Conservation & Recycling Advances*, p. 200235, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.rcradv.2024.200235.

Referências

- [15] S. K. Bharadwaaj, M. Jaudan, P. Kushwaha, A. Saxena, and B. Saha, "Exploring cutting-edge approaches in plastic recycling for a greener future," Sep. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rineng.2024.102704.
- [16] Z. T. Abdullah, "A sustainable recycling approach for construction: A case of remanufacturing waste rebar into steel nails," *Results in Engineering*, vol. 23, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102777.
- [17] European Committee for Standardization, *EN_45545-2_e_2013*. Bruxelas, 2013.
- [18] M. F. S. F. Moura, A. B. Morais, and A. G. Magalhães, *Materiais-Compósitos*, 2nd ed. Porto, 2010.
- [19] R. M. Jones, "MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS SECOND EDITION," 1999.
- [20] G. Akovali, *Handbook of composite fabrication*. Rapra Technology Ltd., 2001.
- [21] M. Kumar Buragohain, "Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing," 2017.
- [22] "Carbon fibre roving | Haufler." Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.haufler.com/en/31/Carbon-fibre-roving.html>
- [23] "Chopped Strand Mat: An Introduction to a Common Fiberglass." Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.fuzia.com/article_detail/793048/chopped-strand-mat-an-introduction-to-a-common-fiberglass
- [24] "Carbon Fiber Reinforcements." Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://cacomposites.com/carbon-fiber-reinforcements/>
- [25] "Unidirectional Carbon fiber texture roll - 200 g/m² 12 k UD PLAIN." Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.adesivisicurezza.it/en/car-wrapping-films/402-fabric-roll-made-of-genuine-carbon-fiber-200-g-m-12-k-ud-plain-unidirectional-20-cm.html>
- [26] "Textile reinforcements out of glass, carbon, aramid and flax fiber." Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.saertex.com/en/products/multiaxial-fabrics>
- [27] "210g 2x2 Twill 3k Carbon Fibre Cloth; 1m, 1.25m, 1.5m - Easy Composites." Accessed: Dec. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.easycomposites.eu/200g-22-twill-3k-carbon-fibre-cloth>
- [28] "3D Fiberglass Fabric." Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.hitex-composite.com/products/3D-Fiberglass-Fabric.html>
- [29] "Braided Carbon Fiber Sleeves Supplier | Carbon Fiber Sleeves." Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://cacomposites.com/carbon-fiber-reinforcements/carbon-fiber-sleeves/>
- [30] "Preform Molding for Structural Component Applications | MasterMold." Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.mastermoldllc.com/composite-manufacturing-solution/composite-fiberglass-molding/preform-molding/>
- [31] D. Gay, *Composite Materials*. Boca Raton: CRC Press, 2022. doi: 10.1201/9781003195788.
- [32] "Powder Metallurgy For Manufacturing." Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.thelibraryofmanufacturing.com/powder_processes.html

- [33] “Manufacturing Products for Hand Layup Process.” Accessed: Dec. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.eppcomposites.com/hand-layup-process.html>
- [34] “image016.gif (imagem GIF, 1565 × 451 pixels) - Redimensionado (98%).” Accessed: Dec. 19, 2024. [Online]. Available: https://www.espublisher.com/uploads/article_html/engineered-science/10.30919-es8d670_files/image016.gif
- [35] A. Baghdad and K. El Mabrouk, “Autoclave process parameters affecting physical properties of carbon fiber reinforced polymer composite laminates using response surface methodology,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 42, no. 15–16, pp. 762–775, Aug. 2023, doi: 10.1177/07316844221139560.
- [36] H. S. Ashrith, T. P. Jeevan, and J. Xu, “A Review on the Fabrication and Mechanical Characterization of Fibrous Composites for Engineering Applications,” Jun. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/jcs7060252.
- [37] “China sheet molding compound suppliers and manufacturers, smc manufacturing company-Union Composite.” Accessed: Dec. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.unioncomposites.com/sheet-molding-compound-suppliers-and-manufacturers-in-china-company.html>
- [38] “Prepreg de carbono cosmético MTC275-C416T-HS-6K-38% RW sarja de 416 g/m².” Accessed: Dec. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.castrocompositesshop.com/pt/preimpregnados/1386-871-prepreg-de-carbono-cosm%C3%A9tico-mtc275-c416t-hs-6k-38-rw-sarja-2x2-de-416-g-m2.html#/147-peso-1_m2
- [39] M. Kumar Buragohain, “Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing.”
- [40] J. P. Davim, Ed., *Design of Experiments in Production Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-23838-8.
- [41] “Design of Experiment II - Response Surface Methodology (RSM) (DOE102) - NASAT Labs.” Accessed: Dec. 23, 2024. [Online]. Available: <https://nasatlabs.com/design-of-experiment-ii-response-surface-methodology-rsm-doe102/>
- [42] M. Ateeq, “A state of art review on recycling and remanufacturing of the carbon fiber from carbon fiber polymer composite,” *Composites Part C: Open Access*, vol. 12, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jcomc.2023.100412.
- [43] H. Zhou, F. Wang, S. Zhang, Y. Lin, and G. Wei, “Analysis of material removal behavior and damage mechanism at hole exit in drilling high-toughness CF/PEEK composites,” *J Manuf Process*, vol. 134, pp. 107–116, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.12.021.
- [44] F. D. C. Garcia Filho, M. S. Oliveira, A. C. Pereira, L. F. C. Nascimento, J. Ricardo Gomes Matheus, and S. N. Monteiro, “Ballistic behavior of epoxy matrix composites reinforced with piassava fiber against high energy ammunition,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 1734–1741, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.12.004.
- [45] J. Walsh, H. I. Kim, and J. Suhr, “Low velocity impact resistance and energy absorption of environmentally friendly expanded cork core-carbon fiber sandwich composites,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 101, pp. 290–296, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.05.026.

Referências

- [46] S. van Oosterom, T. Allen, M. Battley, and S. Bickerton, "An objective comparison of common vacuum assisted resin infusion processes," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 125, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105528.
- [47] N. K. Naik, M. Sirisha, and A. Inani, "Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM," Feb. 2014. doi: 10.1016/j.paerosci.2013.09.002.
- [48] L. Gustavo Aires Cruz, F. Ottoboni Yamane, Â. de Souza, M. de Lourdes Noronha Motta Melo, L. Cláudio Pardini, and A. Carlos Ancelotti Jr, "Desenvolvimento de compósitos laminados carbono/epóxi de alta performance fabricados por VARTM," Itajubá, 2014, pp. 1–5.
- [49] V. R. Tamakuwala, "Manufacturing of fiber reinforced polymer by using VARTM process: A review," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 987–993. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.102.
- [50] W. Obande, D. Mamalis, D. Ray, L. Yang, and C. M. Ó Brádaigh, "Mechanical and thermomechanical characterisation of vacuum-infused thermoplastic- and thermoset-based composites," *Mater Des*, vol. 175, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.107828.
- [51] A. T. Bhatt and P. P. Gohil, "To Study effect of VARTM process parameters for composite strength: Taguchi approach," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/1004/1/012001.
- [52] L. Moretti, T. Lavaggi, P. Simacek, and S. G. Advani, "Behavior of perforated flexible impermeable interlayers during VARTM processes," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 173, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107691.
- [53] P. M. Visakh, A. O. Semkin, I. A. Rezaev, and A. V. Fateev, "Review on soft polyurethane flame retardant," Dec. 10, 2019, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116673.
- [54] A. B. Morgan and P. Mukhopadhyay, "A targeted review of bio-derived plasticizers with flame retardant functionality used in PVC," Apr. 01, 2022, *Springer*. doi: 10.1007/s10853-022-07096-w.
- [55] K. KARTHIK *et al.*, "State of the Art: Natural fibre-reinforced composites in advanced development and their physical/chemical/mechanical properties," Jul. 01, 2024, *Chinese Academy of Sciences*. doi: 10.1016/j.cjac.2024.100415.
- [56] X. H. Shi, X. L. Li, Y. M. Li, Z. Li, and D. Y. Wang, "Flame-retardant strategy and mechanism of fiber reinforced polymeric composite: A review," Mar. 15, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.compositesb.2022.109663.
- [57] M. S. Murad, A. K. Hamzat, E. Asmatulu, E. Bahçeci, M. Bakir, and R. Asmatulu, "Studying flame-retardancy, smoke and toxicity of fiber-reinforced composites manufactured via modified resins and metallic coatings," *Hybrid Advances*, vol. 8, p. 100373, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.hybadv.2024.100373.
- [58] "DVP EC20 Industrial Vacuum Pump - Easy Composites." Accessed: Dec. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.easycomposites.co.uk/ec20-industrial-vacuum-pump>
- [59] "CP1 Resin Infusion Catch-Pot 1.2L - Easy Composites." Accessed: Dec. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.easycomposites.eu/cp1-resin-infusion-catch-pot-small>

- [60] “Crafting Precision: Ceramic Vacuum Forming Molds at Prestige Tooling – Thermoforming Molds | Solid Surface Molds | Prestige Tooling.” Accessed: Dec. 26, 2024. [Online]. Available: <https://prestigetooling.com/crafting-precision-ceramic-vacuum-forming-molds-at-prestige-tooling/>
- [61] “VB160 Vacuum Bagging Film LFT (1520 & 600mm) - Easy Composites.” Accessed: Dec. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.easycomposites.eu/vb160-vacuum-bagging-film>
- [62] “Vacuum Bagging Sealant Tape 15m - Easy Composites.” Accessed: Dec. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.easycomposites.eu/vacuum-bagging-sealant-tape>
- [63] “PP180 Economy Peel Ply (1520mm) - Easy Composites.” Accessed: Dec. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.easycomposites.eu/pp180-peel-ply>
- [64] “FM100 Resin Infusion Mesh (1050mm) - Easy Composites.” Accessed: Dec. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.easycomposites.eu/fm100-resin-infusion-mesh>
- [65] “Standard Flow Resin Infusion Spiral 10m Coil - Easy Composites.” Accessed: Dec. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.easycomposites.eu/resin-infusion-spiral-medium>
- [66] “6mm ID Budget PVC Vacuum/Resin Hose - Easy Composites.” Accessed: Dec. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.easycomposites.eu/6mm-pvc-vacuum-hose>
- [67] “Alicate de aperto de mangueira | 155 mm | Lubrimarq - Distribuição de Lubrificantes.” Accessed: Dec. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.lubrimarq.pt/product/alicate-de-aperto-de-mangueira-or-155-mm>
- [68] “T-Shape Plastic Barb Mangueira Tee, Tubo de Mangueira de 3 vias, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 16mm - AliExpress 13.” Accessed: Dec. 26, 2024. [Online]. Available: <https://pt.aliexpress.com/item/32819213654.html?gatewayAdapt=glo2bra>
- [69] Fabíola Ottoboni Yamane, “Fadiga de compósitos de fibra de carbono/epóxi obtidos pelo processo de moldagem por transferência de resina assistida a vácuo,” Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.
- [70] P. Schulze and D. Heider, “The 8 th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM8) VARIABILITY IN AEROSPACE VARTM PROCESSING,” in *The 8 th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM8)*, Douai, 2006, pp. 1–4.
- [71] M. A. Yalcinkaya, E. M. Sozer, and M. C. Altan, “Effect of external pressure and resin flushing on reduction of process-induced voids and enhancement of laminate quality in heated-VARTM,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 121, pp. 353–364, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.03.040.
- [72] T. Wang, K. Huang, L. Guo, T. Zheng, and F. Zeng, “An automated vacuum infusion process for manufacturing high-quality fiber-reinforced composites,” *Compos Struct*, vol. 309, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.116717.

Referências

- [73] F. S. Yoresta, P. V. Nhut, D. Nakamoto, and Y. Matsumoto, "Enhancing buckling capacity of angle steel using unbonded CFRP laminates processed by Vacuum-assisted Resin Transfer Molding (VaRTM)," *Structures*, vol. 41, pp. 173–189, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2022.05.011.
- [74] M. N. Prabhakar, M. C. Cabo, R. Yu, T. Gebrekrstos Weldemhret, L. Dong Woo, and S. Jung-il, "Surface flame retardancy of clay mineral powder infused onto the top of the layer of vinyl ester/bamboo composites through a modified VARTM process," *Polym Test*, vol. 132, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108367.
- [75] Q. Chen *et al.*, "Mechanical properties in glass fiber PVC-foam sandwich structures from different chopped fiber interfacial reinforcement through vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) processing," *Compos Sci Technol*, vol. 144, pp. 202–207, May 2017, doi: 10.1016/j.compscitech.2017.03.033.
- [76] "O INEGI - Sobre o INEGI - INEGI." Accessed: Mar. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.inegi.pt/pt/sobre-o-inegi/o-inegi/>
- [77] G. De Projetos, | Se, G. De Pessoas, G. Financeira, and A. | Sc, "Gestão da Qualidade | JP Higiene e Segurança no Trabalho | JP Projetos Integrados | MO Marketing Institucional e Comunicação | DS Sistemas e Tecnologia Subaquática | JT," Porto, 2024.
- [78] "Plano de Recuperação e Resiliência - Recuperar Portugal." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://recuperarportugal.gov.pt/>
- [79] "TrainSolutions Portugal." Accessed: Jun. 04, 2025. [Online]. Available: <https://trainsolutions.pt/en/#media>
- [80] Lavesan S.r.l, "LERPOL 6814 A1," Brentonico, 2024.
- [81] Walter Mäder AG, "Nuvocryl FR 60-90 G SAH," Kilwangen, 2024.
- [82] Scott Bader Company Limited, "Crystic_VE679-03PA_resin_EN_March-23," Wollaston, 2024.
- [83] BÜFA Composite Systems GmbH & Co. K, "BUEFA-Firestop S 425_EN," Rastede, 2025.
- [84] Saertex, "Q-E-1184g/m²-1270mm," 2024.
- [85] "Stretchlon 800 Vacuum Bagging Film | Fibre Glass." Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.fibreglast.com/products/stretchlon-800-bagging-film-1688>
- [86] "ECONOLEASE-60"-100YDS." Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://estore.airtechintl.com/econolease-60-100yds.html>
- [87] "GREENFLOW7541350." Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://estore.airtechintl.com/green-flow-75-41-350.html>
- [88] "Rete Dualmesh – Advanced Composite Materials." Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://advancedcompositematerials.it/products/dualmesh>
- [89] "FB1172." Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://estore.airtechintl.com/flashbreaker-1-1-72yds.html>
- [90] "Vacuum Bagging and Composite Tooling - AIRSEAL 2 TACKY 3mm-12mm-15M 20 Rolls per box." Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://estore.airtech.lu/airseal-2-tacky-3mm-12mm-15m-20-rolls-per-box.html>

- [91] M. Yoon and M. Ahn, "Study on molding control factors to reduce void contents in manufacturing CFRP parts by HP-RTM," *Compos B Eng*, vol. 296, May 2025, doi: 10.1016/j.compositesb.2025.112231.
- [92] H. Wu *et al.*, "Development and characterization of antioxidant composite films based on starch and gelatin incorporating resveratrol fabricated by extrusion compression moulding," *Food Hydrocoll*, vol. 139, May 2023, doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.108509.
- [93] S. K. Chakrapani and V. Dayal, "Destructive and Nondestructive Evaluation of Dry Spots in Thick Glass Fiber Reinforced Composites," *Applied Composite Materials*, vol. 26, no. 2, pp. 693–708, Apr. 2019, doi: 10.1007/s10443-018-9744-7.
- [94] V. R. Kedari, B. I. Farah, and K. T. Hsiao, "Effects of vacuum pressure, inlet pressure, and mold temperature on the void content, volume fraction of polyester/e-glass fiber composites manufactured with VARTM process," *J Compos Mater*, vol. 45, no. 26, pp. 2727–2742, Dec. 2011, doi: 10.1177/0021998311415442.
- [95] E. Gdoutos and M. Konsta-Gdoutos, *Mechanical Testing of Materials*, vol. 275. in *Solid Mechanics and Its Applications*, vol. 275. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-45990-0.
- [96] R. Bigger *et al.*, *A Good Practices Guide for Digital Image Correlation*. iDICs, 2018. doi: 10.32720/idics/gpg.ed1/print. Format.
- [97] E. E. Gdoutos, *Experimental Mechanics*, vol. 269. in *Solid Mechanics and Its Applications*, vol. 269. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-89466-5.
- [98] J. Holmes, S. Sommacal, R. Das, Z. Stachurski, and P. Compston, "Digital image and volume correlation for deformation and damage characterisation of fibre-reinforced composites: A review," Jul. 01, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.compstruct.2023.116994.
- [99] J. Zhao, Y. Sang, and F. Duan, "The state of the art of two-dimensional digital image correlation computational method," *Engineering Reports*, vol. 1, no. 2, Sep. 2019, doi: 10.1002/eng2.12038.
- [100] A. International and files indexed by mero, "Designation: D 3039/D 3039M-00 e1 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials 1."
- [101] M. T. Cann, D. O. Adams, and C. L. Schneider, "Characterization of fiber volume fraction gradients in composite laminates," *J Compos Mater*, vol. 42, no. 5, pp. 447–466, Mar. 2008, doi: 10.1177/0021998307086206.
- [102] P. Kelly and W. Wijaya, "Transverse compression properties of composite reinforcements," in *Composite Reinforcements for Optimum Performance*, Elsevier, 2020, pp. 333–374. doi: 10.1016/B978-0-12-819005-0.00011-3.
- [103] "Test Methods for Constituent Content of Composite Materials," Apr. 01, 2015, *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D3171-15.
- [104] "Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a 45 Laminate," Aug. 01, 2013, *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D3518_D3518M-13.
- [105] Peter K Dunn, *Scientific Research and Methodology: An introduction to quantitative research in science and health*, First. Australia, 2021.

Referências

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Francisco Simões do Paço

ISEP, Porto, 12 de junho de 2025

Anexo A

Anexo A

LERPOL**6814 A1**

Characteristics

Product based on high-performance vinylester resins, accelerated, non-thixotropic, with liquid flame retardant additives, characterized by low viscosity and high flow capacity within the glass reinforcements. Due to its rheological characteristics, this resin is therefore the ideal product to be used in the molding of fiberglass products using the vacuum resin infusion technology. The reduced polymerization shrinkage and the excellent ability to polymerize even in reduced thicknesses allow a simple and safe use.

The mixture of resins used gives the product high mechanical and chemical characteristics, combined with ease of use

Applications

Lerpol 6814 A1 resin therefore finds its most specific use in the production of medium and large parts of locomotives.

The particular fire behavior of this resin allows, with Lavecoat ITF intumescent gelcoat, to reach the **HL2 class (in the requirements R1 and R17) according to the EN-45545 standard even on painted products.**

Informations

Carefully read the information provided in the Safety Data Sheet.

Stir before use. Condition the resin before use to at least 15 °C to obtain proper hardening.
Catalyze with 1.5-2.0% by weight of Methyl-Ethyl Ketone Peroxide (MEKP) Promox P200 TX.

Typical properties of liquid resin			
	Metodo	Unità Misura	Valore
Aspect	-	-	Liquid
Density at 20°C	lave03	gr/cm ³	1.00 ± 0.1
Brookfield Viscosity (25°C, 20 rpm)	lave01	mPa·s	250 ± 50
Gel time*	lave02	Minutes	35 ± 5
Peak Temperature*	lave02	°C	170 ± 10

*At 25°C on 100 g catalyzed with 2% of MEKP Promox P-200 TX

Typical Properties of cured resin**			
	Metodo	Unità Misura	Valore tipico
Tensile Strength	UNI EN ISO 527	MPa	57
Tensile Elongation	UNI EN ISO 527	%	6.3
Tg	ISO 11357	°C	88
Flexural Modulus	UNI EN ISO 178	MPa	3350
Barcol Hardness	ASTM – D 2583	-	> 40
Limiting Oxygen Index	ISO 4589-2	% O ₂	27

**Product catalyzed with 2% of MEKP Promox P-200 TX , cured for 24h at r.t. and post-cured for 3h at 80 °C

Shelf-life

6 Months in original cans at 20 °C far from direct light.

Safety

Read the MSDS carefully before use.

Packaging

The product is available in 20 - 230 kg drums and 1000 kg IBC

Important

The data presented herein are believed to be accurate and reliable. We require customers to inspect and test our product before use and to satisfy themselves as to contents and suitability for their specific applications. Information herein is to assist customers in determining whether our products are suitable for their applications but not to be taken as a guarantee, express warranty or implied warranty of merchantability or fitness for particular purpose, nor is any protection from any law or patent to be inferred. All patent rights are reserved. The exclusive remedy for all proven claims is limited to replacement of our material and in no event shall we be liable for special, incidental or consequential damages.



Introduction

Crystic® VE 679-03PA is a pre-accelerated, DCPD modified, vinyl ester resin for infusion.

Features and benefits

Crystic® VE 679-03PA has excellent blister resistance and significantly reduces the occurrence of print through, to produce durable mouldings with an enhanced surface finish. Crystic® VE 679-03PA produced at Scott Bader's Wollaston UK facility, is approved by Lloyd's Register of Shipping for use in the construction of craft under their survey.

Applications

Crystic® VE 679-03PA is recommended for use as an infusion resin with a wide range of gel times with various catalysts.

Physical data

The following tables give typical properties of Crystic® VE 679-03PA when tested in accordance with Scott Bader, BS EN or BS EN ISO test methods.

Physical data - uncured

Property	Unit	Liquid Resin
Appearance		Red/Brown
Viscosity at 25°C, 4500sec-1	Poise	1.9
Specific Gravity at 25°C		1.065

Physical data - cured

Property	Unit	Fully Cured Resin†	
Deflection temperature under load (1.80 MPa)	°C	92	
Property	Unit	Fully Cured* Resin	Fully Cured** Resin
Barcol Hardness		31	37
Tensile Strength	MPa	62	68
Tensile Modulus	GPa	3.2	3.5
Elongation at Break	%	2.7	2.2

*Curing Schedule - 24 hours at 20°C, 16 hours at 40°C

**Curing Schedule - 24 hours at 20°C, 3 hours at 80°C

†Curing Schedule - 24 hours at 20°C, 5 hours at 80°C, 3 hours at 120°C



Recommended testing

It is recommended that customers test Crystic® VE 679-03PA before use under their own conditions of application to ensure the required surface finish is achieved.

Formulation

Crystic VE 679-03PA must be thoroughly stirred and allowed to attain workshop temperature (18 °C – 20 °C) before use. It needs only the addition of a catalyst to start the curing reaction. The recommended catalyst is Trigonox 249, which should be added at 2 % into the resin.

Pot life

The geltime of Crystic VE 679- 03PA can be approximately determined from the table below.

Temperature	Pot Life using 2% Trigonox 249
15°C	195 minutes
20°C	120 minutes
25°C	80 minutes

The resin, mould and workshop should be at, or above, 15°C before curing is carried out.

Additives

Crystic® VE 679-03PA is supplied ready for use. The addition of any additives may adversely affect the performance of this product and users should consult Scott Bader's Technical Support Department before making any such additions.

Storage

Crystic® VE 679-03PA should be stored in its original container and out of direct sunlight. It is recommended that the storage temperature be less than 20°C where practical, but should not exceed 30°C. Ideally, containers should be opened only immediately prior to use. Shelf life from date of manufacture when stored in accordance with these recommendations is 6 months.

Packaging

Crystic® VE 679-03PA can be supplied in 25kg kegs, 200kg drums and 1100kg IBCs

Health and Safety

Please see separate Material Safety Data Sheet.

© 2023 Scott Bader Company Limited, March 2023, Issue No. 1

All information on this data sheet is based on laboratory testing and is not intended for design purposes. Scott Bader makes no representations or warranties of any kind concerning this data. Due to variance of storage, handling and application of these materials, Scott Bader cannot accept liability for results obtained. The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

BÜFA®-Firestop S 425

Fire Protection Laminating Resin

Prod. No. 7160425

Product description BÜFA®-Firestop S 425 is a pre-accelerated, thixotropic injection resin that is highly reactive and low viscosity. It is made of a special DCPD resin dissolved in styrene.

The resin contains a halogenfree flame retardant.

Applications BÜFA®-Firestop S 425 can be used for the production of moulded parts with fire protection properties in RTM processes.

Specifications / technical data	Property	Test method	Value	Unit
	Non-Volatile constituents		71-73	%
	Viscosity at 23 °C Physica Z 2, 20 s-1	TM 2313	195-265	mPas
	Viscosity at 23 °C Physica Z 2, 250 s-1	TM 2313	140-190	mPas
	Density at 20/23 °C	DIN 53 217/2	1,10	g/ml
	Flash point	DIN 53 213	32	°C

Curing **Reactivity:**
BÜFA method in accordance with DIN 16 945 6.2.2.1
 (100 g resin + 2 ml Butanox M-50)

20 - 30 °C	22 - 25 min
20 °C - Tmax	30 - 46 min
Tmax	180 - 205 °C

Attention!

The information given above refers exclusively to the use of the catalyst named and the quantity specified. The use of different products or differing quantities may yield different results.

BÜFA®-Firestop S 425

Fire Protection Laminating Resin

Prod. No. 7160425

Properties of the cured base resin	Property*	Test method	Typical value
	Tensile strength	EN 61	55 N/mm ²
	Tensile modulus	EN 61	3 400 N/mm ²
	Flexural strength	EN 63	110 N/mm ²
	Flexural modulus	EN 63	3 500 N/mm ²
	Elongation at break	ISO 527-2	2,0 %
	HDT	ISO 75 - A	114 °C

* Cured with 2% PBO at 1h 80°C + 2h 100°C + 1h 100°C

Directions for use

Due to high thixotropic stabilisation of the resin, there is practically no settling out of the filler. Long stirring procedures should be avoided; the resin should be gently stirred for a maximum of 0.5 h before using. "Gentle stirring" is understood as stirring at low speed, just setting material at the edge of the container in motion. Only a minimal "whirlpool" effect should take place at the centre of the container.

Note:

To achieve the best mechanical and fire protection properties, the moulded parts should be post-cured for at least 8 hours at + 80 °C.

The thickness of the laminate and its entire construction, including any top coats, varnishes, applications, sandwich components, etc. also have a decisive influence on fire behaviour. Always remember that individual component tests are mandatory for most applications.

BÜFA®-Firestop S 425

Fire Protection Laminating Resin

Prod. No. 7160425

Fire protection properties

Test in accordance with BS 476 part 7 – a 4 mm thick random fibre laminate was tested.

Flammability class: Class 2

The laminates were produced under ideal, controlled, laboratory conditions. This information does not replace component tests by the manufacturer.

Storage/Handling

This product must be stored cool in closed containers, protected from sunlight. Shelf-life is at least 3 months in unopened, original containers stored up to a temperature of 20 °C. Gel and curing times may change with increasing duration of storage.

Note: The Information given above is based on our current state of knowledge and experience. In view of the many factors that may influence working conditions and the application of our products, the user is not relieved from carrying out his own tests and experiments. No legally binding warranty of certain properties or suitability for a particular purpose can be derived from this information. It is the responsibility of the receiver or user of our products to observe proprietary rights as well as existing laws and regulations. The latest version of the corresponding EU Safety Data Sheet must also be observed.

BÜFA Composite Systems GmbH & Co. KG
Hohe Looge 2-8
26180 Rastede
GERMANY
Phone +49 4402 975-0
Fax +49 4402 975-300
compositesystems@buefa.de
www.buefa.de
www.buefacompositesystems.com

A member of the BÜFA-Group

NUVOCRYL® FR 60-90 G

UP resin, flame-resistant, halogen free

Technical Data Sheet, provisional
Version 03/19

1/5

General description

NUVOCRYL® FR 60-90 G is a flame-resistant, halogen free, filled, **not pre-accelerated**, low-viscous, unsaturated polyester resin. It has been developed specifically for the construction of high strength parts for public transport vehicles. The resin produces little smoke in the case of fire.

NUVOCRYL® FR 60-90 G is particularly suitable for resin injection processes. The application by hand lay-up is possible if the product is made thixotropic with approx. 2-5 % by weight of untreated pyrogenic silica.

Where outstanding flow is required, NUVOCRYL® FR 60-90 G shall be used in combination with Mäder NUVOFIBER glass products. The production of high strength composites with glass content up to 70% by weight is possible.

1. Specific values of the liquid resin

934.2.0.0090 NUVOCRYL® FR 60-90 G	
Colour	beige
Density at 20°C	1.25 g/cm ³
Viscosity at 23°C Brookfield RTV spindle 3 / 50 rpm	200 - 400 mPa.s
Thixotropic index	>3
Reactivity	average
UV stabilisation	none
Monomer content	30%
Dilutability	not permissible
Glass wetting	good
Volume shrinkage	6%
Flash point (Abel)	28°C
Storage guarantee	ISO 13736 3 months in well sealed containers at max. 20°C. Ideally, the container should only be opened just before use and be stirred. Storage stability can only be guaranteed if the contents of the container are stirred at least every 30 days.

NUVOCRYL[®] FR 60-90 G

UP resin, flame-resistant, halogen free

Technical Data Sheet, provisional
Version 03/19

2/5

2. Specific values of the cured resin ^[1]

The details given in this section are reference values.

Hardness Barcol 934-1, 20°C	60	EN 59
Heat stability (HDT)	95 °C	ISO 75 A
Tensile strength	43 MPa	ISO 527
Elongation at tear	0.6 %	ISO 527
Modulus of elasticity	5'800 MPa	ISO 527
Flexural strength	77 MPa	ISO 178
Elongation at break	1.4 %	ISO 178
Flexural modulus of elasticity	5'100 MPa	ISO 178
Impact strength	6.1 kJ/m ²	ISO 179

^[1] Post-curing 5h at 80°C and 3 h 100°C

3. Specific values of the reinforced resin ^[2]

The details given in this section are reference values.

Glass structure	Laminate with 4 layers of NUVOFIBER quadriaxial fabric 1200/150 g/m ²	
Layer thickness	4.5 mm	
Weight percentage glass	63%	
Tensile strength	146 MPa	ISO 178
Elongation at tear	1.9%	ISO 178
Modulus of elasticity	15'900 MPa	ISO 178
Flexural strength	306 MPa	ISO 527
Breaking elongation	5.9%	ISO 527
Flexural modulus of elasticity	10'148 MPa	ISO 527

^[2] Post-curing 5h at 80°C and 3 h 100°C

Easy processing and high mechanical properties are achieved with Mäder **NUVOFIBER** glass products (biaxial and quadriaxial fabrics, flow mats).

NUVOCRYL® FR 60-90 G

UP resin, flame-resistant, halogen free

Technical Data Sheet, provisional
Version 03/19

3/5

4. Processing and application

The following information is intended for the user and must be interpreted in a professional way.

On account of **NUVOCRYL® FR 60-90 G** being a **filled, non-pre-accelerated** resin, **it must be mixed homogeneously** when preparing the product. The accelerator is then added.

Please note the application recommendation at the end of the leaflet.

Curing system

NUVOCRYL® FR 60-90 G is specifically intended to cure at room temperature and is mainly cured using a cobalt accelerator in combination with a catalyst based on methyl ethyl ketone peroxide (MEKP).

Curing behaviour

100 g of **NUVOCRYL® FR 60-90 G** in the insulating block at 23°C

Curing system

+0.4% Accelerator N10 (4% Co) +2.0% NUVOURE ME 60-210 (MEKP e.g. Butanox M60, Peroxan ME-60 L)	Gel time	10-20 min
+ 0.2% Accelerator N10 (4% Co) +2.0% NUVOURE ME 60-210 (MEKP e.g. Butanox M60, Peroxan ME-60 L)	Gel time	20-30 min
+ 0.2% Accelerator N10 (4% Co) + 0.05% Inhibitor BBK 10% +2.0% NUVOURE ME 60-210 (MEKP e.g. Butanox M60, Peroxan ME-60 L)	Gel time	30-45 min
+ 0.2% Accelerator N10 (4% Co) + 0.1% Inhibitor BBK 10% +2.0% NUVOURE ME 60-210 (MEKP e.g. Butanox M60, Peroxan ME-60 L)	Gel time	45-60 min

To extend the gel time, we recommend using **INHIBITOR BBK 10%** (Art. 895.0.0.0010) from Mäder Composites.

If a different catalyst/accelerator or inhibitor is used, we recommend checking its suitability for **NUVOCRYL® FR 60-90 G**.

Walter Mäder AG
Composites
Industriestrasse 1
CH-8956 Killwangen

 **Mäder**
The Composite Technology

Tel +41 56 417 85 55 · Fax +41 56 401 67 44
info@madercomposites.com · www.madercomposites.com

certified
ISO 9001 / ISO 14001

NUVOCRYL® FR 60-90 G

UP resin, flame-resistant, halogen free

Technical Data Sheet, provisional
Version 03/19

4/5

Warning The hardener and accelerator must never come into direct contact with each other. The additives have to be stirred into the resin one after another.

5. Release agents Most release agents for gelcoats and polyester resins can be used with the **NUVOCRYL® FR 60-90 G** resin. However, we do recommend checking the suitability of the release agent to be used.

6. Fire classification^[3] The following classifications can be achieved under suitable conditions.

European classification EN 45545-2	HL2 (R1) - HL2 (R17)
Gelcoat	Nuvopol 37-05 TGP
Application Laminate thickness	Vacuum infusion process 5 mm
Lateral flame spread (ISO 5658-2)	CFE 21.0 kW/m ² Qsb 5.9 MJ/m ²
Heat release rate (ISO 5660-1)	MARHE 53.2 kW/m ²
Smoke density/toxicity (ISO 5659-2)	Ds(4) 216 Ds(max) 305 VOF(4) 452 CIT(4) 0.02 CIT(8) 0.05

^[3] Post-curing 12h RT, 3h 40°C, 3h 60°C, 8h 80°C

Due to the large range of influences possible during the preparation and application of our products, this information does not release users from conducting their own checks and tests. No liability or obligation can therefore be inferred from this information.

7. Safety The above-mentioned products are intended exclusively for commercial/industrial use. The persons using them must have the appropriate knowledge with regard to handling and industrial safety.

The relevant statutory regulations and warning notices on the containers as well as the safety data sheet must be observed during storage and handling.

Walter Mäder AG
Composites
Industriestrasse 1
CH-8956 Killwangen

 **Mäder**
The Composite Technology

Tel +41 56 417 85 55 · Fax +41 56 401 67 44
info@madercomposites.com · www.madercomposites.com

certified
ISO 9001 / ISO 14001

NUVOCRYL[®] FR 60-90 G

UP resin, flame-resistant, halogen free

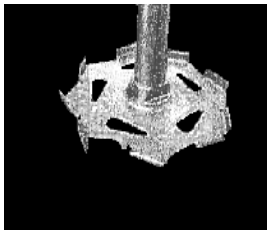
Technical Data Sheet, provisional
Version 03/19

5/5

8. Application recommendation

A 250 kg drum must be mixed for 5 minutes using a 200 mm diameter dissolver disc at 800 r.p.m. When using containers of other sizes, the diameter of the dissolver disc must be adapted accordingly.

Homogeneity must be checked. Special care must be taken to ensure that there are no agglomerations or lumps left at the bottom of the container.



The reagents are then added for the quantity of resin to be prepared:

- Mix in the specified amount of accelerator homogeneously while stirring.
- Mix in the specified amount of inhibitor solution homogeneously while stirring.
- Mix in the specified amount of peroxide homogeneously while stirring.

This leaflet can and is only intended to provide non-binding advice. The information is given to the best of our knowledge based on careful testing and practical experience. Due to the large range of influences possible during the preparation and application of our products, this information does not release users from conducting their own checks and tests. No liability or obligation can therefore be inferred from this information.

X:\Group\VK\Merkblätter\1_Merkblätter_english\Polyesterharze\NUVOCRYL\NUVOCRYL FR 60-90G, english.doc / 2-2017 / MOS

Glossário

Acelerador

O acelerador é o componente químico adicionado à resina para dar início ao seu processo de cura e consome-se durante a cura. O Peróxido de metiletilcetona ou *Methyl ethyl ketone peroxide* (MEKP) foi o utilizado na presente dissertação.

Armadilha de resina

Aparelho construído em aço com um corpo principal totalmente selado e uma tampa com encaixes para permitirem a sua ligação à bomba de vácuo e saco de vácuo. Este aparelho apresenta a função de captar a resina arrastada pelo vácuo nas mangueiras em direção à bomba de vácuo.

Catalisador

Componente químico adicionado à resina para regular o tempo de cura. Este componente precipita-se em forma sólida após a cura do polímero.

Flow mesh

Tecido técnico em plástico cujo objetivo é facilitar e equalizar o fluxo de resina por toda a superfície do molde e reforço.

Gel time

Tempo característico de uma resina, no qual esta mantém a sua fluidez pretendida para o processo de fabrico. Este começa a contar a partir da mistura da resina e aditivos como o acelerador.

Inibidor

Componente químico adicionado à resina para aumentar o seu *gel time*, é consumido durante a cura.

Peelply

Tecido técnico cujo objetivo é criar uma barreira entre o material compósito e o molde ou saco de vácuo para permitir a correta desmoldagem do mesmo.

Tecido técnico

Produto têxtil que apresenta uma função específica, sem qualquer outra utilização.