



Estudo da compactação de reforços no âmbito do processamento de materiais compósitos pelo processo de infusão por vácuo

PAULO MANUEL CORREIA ARAÚJO

outubro de 2023

ESTUDO DA COMPACTAÇÃO DE REFORÇOS NO ÂMBITO DO PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS PELO PROCESSO DE INFUSÃO POR VÁCUO

Paulo Manuel Correia Araújo

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DA COMPACTAÇÃO DE REFORÇOS NO ÂMBITO DO PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS PELO PROCESSO DE INFUSÃO POR VÁCUO

Paulo Manuel Correia Araújo

1180829

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Mestre Ricardo Jorge Braga da Rocha e do Doutor João Miguel Eira Machado.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a toda a minha família pelo apoio incondicional prestado ao longo de todo o meu percurso acadêmico. Sem vocês teria sido mais difícil ultrapassar todos estes desafios e obstáculos que surgiram no meu caminho.

Ao professor Doutor Raul Campilho, orientador da dissertação, agradecer por toda a dedicação, disponibilidade e orientação prestada ao longo deste desafio.

Aos Engenheiros Ricardo Rocha e João Machado, coorientadores da dissertação, por todo o conhecimento compartilhado, orientação e auxílio prestado tanto na parte escrita como na parte experimental desta dissertação.

Ao Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI) pela cedência das instalações para realizar esta dissertação, bem como pela oportunidade de realizar este estágio num contexto empresarial. Por fim, agradecer a todos os colaboradores da Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas (UMEC) por toda a hospitalidade prestada ao longo do meu estágio.

Um muito obrigado a todos!

RESUMO

A infusão por vácuo é um processo de fabrico realizado em molde fechado que pertence à família dos processos de transferência de resina. Na infusão por vácuo, os reforços fibrosos são colocados entre um molde rígido e um saco flexível, e é aplicado vácuo no interior do molde para gerar um gradiente de pressão responsável por conduzir a resina para o interior do molde, impregnando desta forma o reforço. Uma limitação presente neste processo é a baixa pressão de compactação a ser exercida sobre o reforço, que não excede a pressão atmosférica, dificultando assim o fabrico de peças com elevada fração volúmica de fibras. Um conhecimento mais aprofundado da compactação do reforço é assim de extrema importância, uma vez que vai permitir projetar o processo de fabrico tirando o máximo partido das limitações inerentes ao processo. Alguns estudos realizados nesta área indicam que a imposição de ciclos de compactação ao reforço seco, antes da impregnação com resina, aumenta a fração volúmica de fibras final da peça, tirando partido do comportamento de histerese dos reforços fibrosos. No entanto, ainda há falta de conhecimento sobre o processo de compactação de reforços fibrosos, pois ainda não foi proposto um procedimento detalhado para a compactação do reforço antes da impregnação da resina através da infusão por vácuo. O objetivo deste estudo é investigar o comportamento da compactação em reforços *non crimp fabrics* (NCF), a fim de propor metodologias mais eficientes que promovam o aumento da fração volúmica de fibras e, conseqüentemente, melhorem as propriedades mecânicas da peça em laminados feitos através da infusão por vácuo, requisitos impostos pela indústria aeronáutica. Foram realizados testes com diferentes curvas de pressão em função do tempo para descobrir qual seria o melhor procedimento para aumentar a fração volúmica de fibras dos laminados. Concluiu-se que o número de ciclos aplicados ao reforço, o tipo e o período da função escolhida têm uma influência significativa nos resultados da fração volúmica de fibras.

PALAVRAS-CHAVE

Infusão por vácuo; reforços fibrosos; pressão atmosférica; comportamento da compactação; fração volúmica de fibras.

ABSTRACT

Vacuum infusion is a closed-mold manufacturing process that belongs to the family of liquid composite molding. In vacuum infusion, fibrous reinforcements are placed between a rigid mold and a flexible bag, and vacuum is drawn inside the mold to generate a pressure gradient that will drive the resin into the mold, impregnating the reinforcement. One limitation of this process is the low compaction pressure that can be exerted on the reinforcement, which cannot exceed the atmospheric pressure, and thus hinders the manufacturing of parts with high fiber volume fraction. A deeper understanding of the reinforcement compaction is thus of extreme importance, because it will enable designing the manufacturing process taking full advantage of the limitations inherent to the process. Studies indicate that imposing cyclic compaction on the dry reinforcement prior to resin impregnation increases the final fiber volume fraction of the part, by taking advantage of the hysteretic behavior of fibrous reinforcements. However, there is still lack of knowledge regarding the compaction process of fibrous reinforcements, by which a detailed procedure for reinforcement compaction prior to impregnation in vacuum infusion is yet to be proposed. The aim of this study is to investigate the compaction behavior of a non-crimp fabric (NCF), in order to propose more efficient methodologies that promote the increase of fiber volume fraction and, consequently, improve the mechanical properties of the part in vacuum infused laminates, which are requirements imposed by the aeronautical industry. Tests were carried out with different pressure curves as a function of time to find out which would be the best procedure to increase the fiber volume fraction of the laminates. It was concluded that the number of cycles imposed on the reinforcement, the type and the period of the chosen function have a significant influence on the fiber volume fraction results.

KEYWORDS

Vacuum infusion; fiber reinforcements; atmospheric pressure; compaction behavior; fiber volume fraction.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura da dissertação.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Materiais compósitos	4
2.1.1. Caracterização	4
2.1.2. Reforço.....	5
2.1.2.1. Fibra de vidro.....	5
2.1.2.2. Fibra de carbono	6
2.1.3. Matriz.....	6
2.1.3.1. Matrizes termoplásticas	6
2.1.3.2. Matrizes termoendurecíveis	7
2.1.4. Aplicações	7
2.1.5. Tipos de ensaios em materiais compósitos	9
2.1.5.1. Ensaio de composição.....	9
2.1.5.2. Ensaio mecânicos.....	10
2.2. Processo de infusão por vácuo.....	12
2.2.1. Descrição do processo	14
2.2.2. Vantagens e limitações	16
2.2.3. Aplicações	17
2.2.3.1. Indústria marítima.....	18
2.2.3.2. Indústria aeronáutica	18
2.2.3.3. Indústria eólica	19
2.2.4. Melhoria do processo	20
2.2.4.1. DBVI	20
2.2.4.2. VAP	21
2.2.4.3. CAPRI	22
2.3. Compactação.....	22
2.3.1. Fundamentos da compactação.....	23
2.3.2. Tipos de comportamentos	24
2.3.2.1. Flexão entre os feixes de fibras.....	24
2.3.2.2. Fricção entre os feixes de fibras.....	24
2.3.2.3. Fenómeno <i>nesting</i>	25

2.3.3. Propriedades relevantes para a compactação.....	26
2.3.3.1. Viscoelasticidade.....	26
2.3.3.2. Deformação permanente.....	27
2.3.4. Estado da arte.....	29
3. DESENVOLVIMENTO.....	33
3.1. Entidade acolhedora.....	33
3.2. Enquadramento do projeto.....	34
3.3. Materiais necessários para o procedimento experimental.....	35
3.3.1. Descrição do reforço.....	35
3.3.2. Materiais e aparelhos.....	36
3.4. Preparação do procedimento experimental.....	37
3.4.1. Ensaio quase estático.....	37
3.4.2. Ensaio de compactação cíclica.....	39
3.4.3. Fabrico de laminados para extração de provetes.....	47
3.5. Procedimento experimental.....	50
3.5.1. Ensaio quase estático.....	50
3.5.2. Ensaio de compactação cíclica.....	53
3.5.3. Ensaio de queima.....	55
3.6. Resultados e análise experimental.....	56
3.6.1. Resultados para o ensaio quase estático.....	56
3.6.2. Resultados para ensaio de compactação cíclica.....	59
3.6.3. Comparação de desempenho mecânico.....	68
3.7. Discussão de resultados.....	68
4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	73
4.1. Conclusões.....	73
4.2. Trabalhos futuros.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do McLaren MP4-1 [3].	8
Figura 2 - Navio MCMV 52 Koster-class [14].	9
Figura 3 - Representação do ensaio de densidade [16].	10
Figura 4 - Representação dos extensómetros colocados no ensaio de tração referente à norma ISO 527 [20].	11
Figura 5 - Representação esquemática do ensaio de flexão (a) em três pontos e (b) em quatro pontos (adaptado de [6]).	12
Figura 6 - Relação custo/volume de produção de processos da família dos processos de transferência de resina [23].	13
Figura 7 - Representação da montagem do setup no processo de infusão por vácuo: 1) canal de entrada de resina; 2) saco de vácuo; 3) flow-enhanced medium; 4) peel ply; 5) laminado; 6) canal de saída de resina; 7) fita isoladora; 8) molde rígido (adaptado de [29]).	15
Figura 8 - Esquema dos diferentes estágios do processo de infusão por vácuo [30].	15
Figura 9 - Diferença de espessura ao longo do comprimento do laminado devido ao gradiente de pressão aplicado no processo de infusão por vácuo [26].	17
Figura 10 - Percurso do escoamento da resina no casco do Contest 55 [2].	18
Figura 11 - Painel da asa direita do avião Irkut MC-21-300 [35].	19
Figura 12 - Representação da infusão de resina, através do processo VARTM, na pá de uma turbina eólica [38].	19
Figura 13 - Instalação das pás da turbina eólica no parque eólico em Tieling, China [39].	20
Figura 14 - Representação esquemática do processo DBVI [40].	21
Figura 15 - Representação esquemática do processo VAP [1].	21
Figura 16 - Representação esquemática do processo CAPRI [42].	22
Figura 17 - Estrutura do reforço a) plain weave e b) 5H sateen (adaptado de [45]).	24
Figura 18 - Vista em corte de um empilhamento de duas camadas de reforços entrelaçados sem a ocorrência do nesting (em cima) e com a ocorrência do nesting (em baixo) [49].	25
Figura 19 - Resposta do fenómeno nesting para (a) reforços entrelaçados e (b) para reforços NCF [44].	26
Figura 20 - Curvas de compactação e relaxação representadas no gráfico da pressão em função do tempo para diferentes velocidades de compactação [60].	27
Figura 21 - Curvas de carregamento e descarregamento no reforço plain weave sujeito a compactação cíclica [43].	28
Figura 22 - Instalações do INEGI [66].	33
Figura 23 - Logótipos das três empresas participantes no projeto GAVIÃO (retirado de [68], [66] e [69]).	34
Figura 24 - Demonstração da secção cilíndrica da fuselagem onde os estudos realizados para o projeto GAVIÃO vão intervir [72].	35
Figura 25 - Esboço da estrutura do reforço NCF (adaptado de [44]).	36
Figura 26 - Prensa disponível no Laboratório.	37
Figura 27 - Procedimentos correspondentes desde o corte das camadas com recurso ao punção até ao seu embalamento.	38
Figura 28 - Sensor de distância da série Baumer OADM20.	38

Figura 29 - a) Marcações realizadas no reforço com o auxílio da régua e da fita-cola e b) Fita-cola, régua e tesoura elétrica.	39
Figura 30 - Amostras seladas e devidamente identificadas.	40
Figura 31 - Mesa onde foram realizados os ensaios de compactação cíclica.	40
Figura 32 - Bomba de vácuo.	41
Figura 33 - Máquina de controlo de vácuo.	41
Figura 34 - Colocação da amostra em cima da mesa.	42
Figura 35 - Saco de vácuo.	42
Figura 36 - Aplicação do saco de vácuo na mesa.	43
Figura 37 - LVDT.	43
Figura 38 - Estrutura feita com perfis Bosch para fixação do LVDT.	44
Figura 39 - Coluna para fixar o sensor de distância.	44
Figura 40 - Posicionamento da placa e da fita-cola sobre o saco de vácuo e amostra.	45
Figura 41 - a) Placa de aquisição de dados e b) Sensor de pressão.	46
Figura 42 - Software LabVIEW.	46
Figura 43 - Imagem ampliada da leitura dos valores obtidos através do software LabVIEW.	47
Figura 44 - Setup completo para um ensaio de compactação cíclica.	47
Figura 45 - Aplicação do mould cleaner.	48
Figura 46 - Corte do peel ply.	48
Figura 47 - Colocação dos reforços em cima do molde.	49
Figura 48 - Setup completo da infusão.	49
Figura 49 - Progresso da posição da frente de fluxo da resina.	50
Figura 50 - Representação da Instron 5900.	51
Figura 51 - Representação do software BlueHill Universal Versão 4.06.	52
Figura 52 - Representação da aplicação da carga na amostra a) para a posição inicial e b) posição final da célula de carga.	52
Figura 53 - Função sinusoidal com um período de noventa segundos.	53
Figura 54 - Função trapezoidal com um período de noventa segundos.	53
Figura 55 - Função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos.	54
Figura 56 - Função trapezoidal utilizada por Yenilmez et al. [47].	54
Figura 57 - Representação esquemática da localização dos provetes retirados do laminado.	55
Figura 58 - Provetes colocados no interior da mufla.	56
Figura 59 - Gráficos da força e do deslocamento em função do tempo de ensaio para a amostra #1 de vinte camadas.	56
Figura 60 - Sobreposição dos gráficos dos três ensaios para o empilhamento de oito camadas.	57
Figura 61 - Sobreposição dos gráficos dos três ensaios para o empilhamento de vinte camadas.	58
Figura 62 - Gráfico representativo da força média em função do tempo para obtenção do tempo ótimo de relaxação da força aplicada.	58
Figura 63 - Gráfico da pressão em função do tempo para um ensaio de compactação cíclica.	59
Figura 64 - Gráfico representativo da espessura do empilhamento em função do nº de ciclos de um ensaio com a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos e com um empilhamento de vinte camadas.	59
Figura 65 - Gráficos representativos dos valores máximos e mínimos da espessura medidos a) pelo sensor de distância (laser) e b) pelo LVDT para cada ciclo.	60

Figura 66 - Gráfico do ganho de espessura em função do nº de ciclos de compactação para a função sinusoidal.	60
Figura 67 - Gráfico do ganho de fração volúmica de fibras em função do nº de ciclos de compactação para a função sinusoidal.	61
Figura 68 - Gráfico do ganho de espessura em função do nº de ciclos de compactação para a função trapezoidal com um período de noventa segundos.	61
Figura 69 - Gráfico do ganho de fração volúmica de fibras em função do nº de ciclos de compactação para a função trapezoidal com um período de noventa segundos.	61
Figura 70 - Gráfico do ganho de espessura em função do nº de ciclos de compactação para a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos.	62
Figura 71 - Gráfico do ganho de fração volúmica de fibras em função do nº de ciclos de compactação para a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos.	62
Figura 72 - Curvas da compactação cíclica obtida por Robitaille e Gauvin [65].	69
Figura 73 - Curva de compactação correspondente ao ensaio com a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos para um empilhamento de vinte camadas (nota: a linha a traço contínuo corresponde à fase de carregamento e a linha a tracejado corresponde à fase de descarregamento).	70
Figura 74 - Demonstração da taxa de deformação inicial para a função trapezoidal.....	71
Figura 75 - Demonstração da taxa de deformação inicial para a função sinusoidal.....	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais utilizados no Boeing 777 e Boeing 787 (adaptado de [12]).	8
Tabela 2 - Indústrias onde é aplicado o processo de infusão por vácuo (retirado de [2]).....	17
Tabela 3 - Estudos relacionados com a compactação de reforços.	29
Tabela 4 - Espessura inicial das amostras.	39
Tabela 5 - Diferenças verificadas no procedimento experimental entre Yenilmez et al. [47] e a presente dissertação.....	55
Tabela 6 - Deslocamento das amostras até atingir a força máxima.	57
Tabela 7 - Espessura final das amostras.....	57
Tabela 8 - Valores dos ganhos para dez ciclos de compactação.....	63
Tabela 9 - Valores dos ganhos para trinta ciclos de compactação.	64
Tabela 10 - Valores dos ganhos para sessenta ciclos de compactação.	65
Tabela 11 - Valores dos ganhos para cem ciclos de compactação.	65
Tabela 12 - Valores dos ganhos para 00h30 de ensaio.	66
Tabela 13 - Valores dos ganhos para 01h00 de ensaio.....	67
Tabela 14 - Valores dos ganhos para 01h30 de ensaio.....	67
Tabela 15 - Resultados da fração volúmica de fibras e da espessura dos provetes com e sem a aplicação dos ciclos de compactação antes da infusão da resina.	68

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

A-Glass	Fibra de vidro do tipo A
CAPRI	<i>Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion</i>
C-Glass	Fibra de vidro do tipo C
CIT	Centro de Interface Tecnológico
DBVI	<i>Double Bag Vacuum Infusion</i>
DEMEGI	Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
EADS	<i>European Aeronautic Defense and Space Company</i>
E-Glass	Fibra de vidro do tipo E
FEUP	Faculdade do Engenharia da Universidade do Porto
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISQ	Instituto Nacional de Soldadura e Qualidade
JEC Innovation	<i>Journals and Exhibitions on Composites Innovation</i>
JEC World	<i>Journals and Exhibitions on Composites World</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
NCF	<i>Non-Crimp Fabrics</i>
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
PA	Poliamida
PAN	Poliacrilonitrilo
PC	Policarbonato
PEEK	Poli-éter-éter-cetona
PP	Polipropileno
PPS	Polisulfureto de fenileno
RIFT	<i>Resin Infusion under Flexible Tooling</i>
RTM	<i>Resin Transfer Moulding</i>
SCRIMP	<i>Seeman Composites Resin Infusion Moulding Process</i>
S-Glass	Fibra de vidro do tipo S
SRIM	<i>Structural Reaction Injection Molding</i>
UMEC	Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas
VAP	<i>Vacuum Assisted Process</i>
VARTM	<i>Vacuum-Assisted Resin Transfer Moulding</i>
VIP	<i>Vacuum Infusion Process</i>

Lista de Símbolos

γ	coeficiente de <i>nesting</i>	<i>adimensional</i>
K	coeficiente de permeabilidade do meio poroso	<i>adimensional</i>
ν_{12}	coeficiente de Poisson	<i>adimensional</i>
L	comprimento da fibra	<i>m</i>
γ	deformação de corte	<i>adimensional</i>
d	densidade	<i>adimensional</i>
d_w	densidade da água	<i>adimensional</i>
d_r	densidade real do material compósito	<i>adimensional</i>
d_t	densidade teórica do material compósito	<i>adimensional</i>
$D_{amostras}$	diâmetro das amostras	<i>mm</i>
T_1	espessura de apenas uma camada	<i>m</i>
T_n	espessura de cada camada para n número de camadas	<i>m</i>
$2h_y$	espessura de uma camada de reforço	<i>m</i>
h	espessura do laminado	<i>m</i>
$r_z^{nesting}$	fator que representa a redução de espessura resultante do <i>nesting</i>	<i>adimensional</i>
$F_{máx}$	força máxima	<i>N</i>
V_f	fração volúmica de fibras	<i>%</i>
V_{f0}	fração volúmica de fibras inicial	<i>%</i>
V_v	fração volúmica de vazios	<i>%</i>
dP/dx	gradiente de pressão	<i>Pa/m</i>
A_m	gramagem (massa por unidade de área)	<i>g/m²</i>
w_w	massa da amostra medido dentro da água	<i>kg</i>
w_a	massa da amostra medido fora da água	<i>kg</i>
ρ_s	massa volúmica da fibra	<i>g/m³</i>
G	módulo de corte	<i>GPa</i>
E	módulo de elasticidade	<i>GPa</i>
E_1	módulo de elasticidade na direção das fibras	<i>GPa</i>
E_2	módulo de elasticidade na direção perpendicular às fibras	<i>GPa</i>
N	número de camadas	<i>adimensional</i>
C	parâmetro material que indica a queda de pressão depois de 1 segundo	<i>adimensional</i>
D	parâmetro material que indica o índice de relaxação	<i>adimensional</i>
A	parâmetro material que representa a fração volúmica de fibras para pressão de compactação de 1 Pa	<i>adimensional</i>
B	parâmetro material que representam índice de rigidez	<i>adimensional</i>
A	parâmetro relacionado com a rigidez das fibras	<i>adimensional</i>
P	pressão de compactação	<i>bar</i>
P_0	pressão inicial de compactação	<i>bar</i>

$P_{máx}$	pressão máxima	<i>bar</i>
σ_c	resistência à compressão	<i>Pa</i>
X_t	resistência à tração a 0°	<i>Pa</i>
Y_t	resistência à tração a 90°	<i>Pa</i>
dP/dt	taxa de compactação	<i>KPa/s</i>
T	temperatura	$^{\circ}C$
t	tempo	<i>s</i>
t'	tempo ótimo de relaxação da força	<i>s</i>
σ_u	tensão de rotura	<i>Pa</i>
τ	tensão máxima de corte	<i>Pa</i>
L_c	valor crítico do comprimento da fibra	<i>m</i>
u	velocidade de escoamento do fluido	<i>m/s</i>
μ	viscosidade do fluido	<i>Pa.s</i>
v_v	volume de vazios	m^3
v_c	volume do material compósito	m^3

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem o objetivo de fazer uma introdução do trabalho a ser desenvolvido. No subcapítulo 1.1 é apresentado um enquadramento geral do trabalho, para além das motivações para a realização do mesmo. Os objetivos do estudo a realizar são debatidos no subcapítulo 1.2. No subcapítulo 1.3 é descrita a metodologia utilizada no desenvolvimento do estudo a fazer. Por fim, o subcapítulo 1.4 refere-se à estrutura do relatório.

1.1. Contextualização

Ao longo dos anos, os materiais compósitos foram ganhando destaque nas mais variadas indústrias, tendo particularmente conquistado o seu espaço no seio da indústria aeronáutica. O processamento de materiais compósitos, através da utilização da autoclave, é um processo amplamente utilizado na indústria aeronáutica devido às boas propriedades verificadas na peça final, cumprindo os requisitos deste setor. Contudo, existem algumas limitações associadas a este processo, como os tempos de ciclo demorados, o enorme consumo energético (através da aplicação em simultâneo de vácuo, pressão e temperatura) e os custos de manutenção muito elevados.

Assim, o processo de infusão por vácuo surgiu como um processo fora da autoclave, usado na produção de peças de grandes dimensões (como por exemplo pás de turbinas eólicas e cascos de barcos), que veio tentar suprimir estas restrições. É importante realçar que este processo tem sido alvo de vários estudos na procura da otimização do mesmo para que, de facto, tenha cada vez mais preponderância na produção de peças destinadas à indústria aeronáutica. Ter um bom controlo sobre os vários parâmetros associados à infusão por vácuo ajuda a identificar algumas tendências e a prever o comportamento do laminado, uma vez que o conhecimento destes aspetos se traduz na qualidade final da peça.

A fração volúmica de fibras é um dos aspetos principais no que diz respeito à inspeção da qualidade final da peça. Como tal, é possível alcançar frações volúmicas de fibras consideravelmente elevadas através da compactação de reforços, uma das etapas associada ao processo. A otimização de procedimentos que favoreçam o aumento da fração volúmica de fibras é decisiva na obtenção de melhores propriedades mecânicas do material. Este conhecimento é extremamente relevante na indústria aeronáutica, visto que os requisitos finais da peça são, naturalmente, muitos exigentes. A procura por uma fração volúmica de fibras por volta dos 65%, por um teor de vazios não superior a 1% e a garantia da boa consolidação da peça com grau de cura superior a 98% são alguns desses requisitos em estruturas primárias de aeronaves feitas em materiais compósitos [1]. No entanto, apesar do processo de infusão por vácuo ter muito potencial para ser utilizado com bastante frequência nesta indústria, ainda apresenta algumas limitações na obtenção destes requisitos, principalmente na garantia de um teor de vazios inferior a 1% [1].

A baixa pressão de compactação, que não excede a pressão atmosférica, é uma limitação do processo de infusão por vácuo, uma vez que dificulta a obtenção de frações volúmicas elevadas. Por isso, uma compreensão mais aprofundada da compactação permitirá projetar o processo de fabrico de uma melhor forma, tirando o máximo proveito das condições limitadas que o processo

de infusão por vácuo oferece, garantindo assim a aproximação das propriedades mecânicas das peças produzidas por processos associados à autoclave.

1.2. Objetivos

O propósito da presente dissertação baseia-se no estudo da compactação de *non-crimp fabrics* (NCF) de fibra de carbono, com a finalidade de estudar as condições ótimas do processo, no sentido de propor metodologias mais eficientes para o fabrico de laminados com a fração volúmica de fibras pretendida. A não existência de qualquer norma ou protocolo responsável por ensaios de compactação para caracterização de reforços em laminados revela-se num grande desafio na realização deste estudo. Posto isto, os objetivos principais que se pretendem cumprir com este estudo são:

- Caracterizar ao pormenor todo o procedimento experimental realizado;
- Determinar o número de ciclos de compactação ideal (a partir de que ciclo de compactação é atingido o estado de equilíbrio);
- Identificar a função (pressão de compactação em função do tempo) que melhor promove o aumento da fração volúmica de fibras em laminados antes da infusão da resina;
- Comparar os resultados de fração volúmica de fibras de dois laminados (em que num deles aplicaram-se ciclos de compactação antes da infusão da resina) e quantificar o efeito da metodologia de compactação aplicada na fração volúmica de fibras.

1.3. Metodologia

A realização deste trabalho é compreendida, inicialmente, pela pesquisa bibliográfica, e respetiva análise do estado da arte acerca dos temas caracterizados como pertinentes para o estudo a ser desenvolvido. A pesquisa bibliográfica baseou-se, essencialmente, na procura de livros e artigos relacionados principalmente com o processo de infusão por vácuo e compactação de reforços.

Com base na pesquisa bibliográfica realizada, a estratégia adotada de seguida foi a descrição de um procedimento detalhado para a compactação de reforços antes da impregnação da resina com vista ao aumento da fração volúmica de fibras de laminados produzidos através do processo de infusão por vácuo. Para tal, realizou-se um ensaio de compactação quase-estático e um ensaio de compactação cíclica, nos quais foram estudadas diferentes curvas de pressão em função do tempo, a fim de descobrir o procedimento que melhor promovia o aumento da fração volúmica de fibras em laminados. Para validar os resultados obtidos investigaram-se os valores da fração volúmica de fibras de laminados com e sem a aplicação dos ciclos de compactação antes da infusão por vácuo.

No final realizou-se uma discussão de todos os resultados obtidos experimentalmente para analisar, através de uma perspetiva crítica, os possíveis motivos que podem estar na origem dos melhores resultados relativos à fração volúmica de fibras. Foram analisadas três curvas de compactação com o objetivo de verificar qual destas promovia um aumento mais significativo da fração volúmica de fibras.

1.4. Estrutura da dissertação

A organização deste relatório encontra-se dividida em 4 capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Desenvolvimento, e Conclusões e propostas de trabalhos futuros. Em cada um dos capítulos são apresentados diversos subcapítulos que pretendem descrever os assuntos abordados em cada um deles com mais detalhe.

No primeiro capítulo é feito um enquadramento geral acerca do tema da presente dissertação, no qual é abordado o processo de infusão por vácuo em materiais compósitos, bem como a sua procura na indústria aeronáutica e também a importância da compactação de reforços. Ainda neste capítulo, seguem-se os objetivos centrais que se pretendem cumprir, bem como a metodologia a adotar neste estudo e estrutura da dissertação.

A revisão da literatura encontra-se no capítulo 2 e está dividida em três secções. O subcapítulo 2.1 inicia com uma análise genérica acerca dos materiais compósitos. No subcapítulo 2.2 é feita uma caracterização, e respetiva contextualização do processo de infusão por vácuo. O último subcapítulo (2.3) refere-se à compactação de reforços, que é o ponto chave da realização deste trabalho.

O capítulo 3 diz respeito ao desenvolvimento deste trabalho e está subdividido em 8 partes. O principal objetivo deste capítulo é demonstrar todo o procedimento experimental relativo aos ensaios de compactação realizados. No final são apresentados os resultados obtidos e é realizada uma discussão e análise crítica dos mesmos.

O último capítulo está reservado para as conclusões finais e para a apresentação de propostas de trabalhos futuros acerca do trabalho desenvolvido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo corresponde à revisão da literatura dos temas relevantes ao trabalho a desenvolver e encontra-se dividido em três secções. A primeira secção tem como objetivo fazer uma pequena introdução e dar a conhecer os fundamentos básicos teóricos acerca dos materiais compósitos. Na segunda secção é feita uma análise genérica sobre o processo de infusão por vácuo, nos quais são explorados alguns temas tais como as suas vantagens e limitações, aplicações e outros processos associados à infusão por vácuo que contribuíram para sua melhoria. Por fim, é analisada a compactação dos reforços no âmbito do processo de fabrico explicado na segunda secção. Este último tópico é o tema principal a ser estudado.

2.1. Materiais compósitos

Os materiais compósitos são formados pela combinação de dois ou mais componentes distintos, que possuam características complementares, com o objetivo de criar uma estrutura que apresente propriedades superiores face a cada um dos componentes individualmente [2].

2.1.1. Caracterização

Os componentes que caracterizam os materiais compósitos são o reforço e a matriz. O reforço é identificado como a fase dispersa no interior da matriz responsável por conferir uma elevada resistência e garantir capacidade de resistir a elevados esforços. A matriz é definida como a fase contínua que envolve o reforço que tem como principal função garantir uma união estável com os reforços [3]. Os materiais compósitos são caracterizados principalmente pelas propriedades dos reforços de fibras, como: alta rigidez, resistência e baixa densidade que unidos à matriz formam um material com características muito interessantes. Estas propriedades mecânicas aliadas ao seu ótimo desempenho fazem com que as fibras de carbono e as fibras de vidro se distingam dos demais reforços utilizados em materiais compósitos. No entanto, o mercado onde estão inseridos os materiais compósitos à base de fibras de carbono e de vidro exige muita especialização e os custos dos componentes dependem fortemente do seu desempenho. Apesar dos custos que lhes estão associados serem elevados em alguns casos, os materiais compósitos continuam cada vez mais a ganhar vantagem no mercado relativamente aos aços e ao alumínio, uma vez que estão a ser utilizados numa vasta gama de aplicações, que vai desde componentes associados ao desporto até à indústria automóvel e aeroespacial [4]. Atualmente, os materiais compósitos são muito utilizados em engenharia, com destaque na indústria aeroespacial e aeronáutica. Isto deve-se às suas inúmeras vantagens das quais se destacam o baixo peso, o custo reduzido e a maior facilidade de processamento quando comparados com materiais de origem maciça. Além disto, nos materiais compósitos evidencia-se a obtenção de boas propriedades mecânicas, tais como a elevada resistência mecânica, à corrosão, à fadiga e a elevada rigidez. O aumento progressivo dos estudos e investigações acerca dos materiais compósitos prevê uma adesão cada vez maior dos mesmos em variadas aplicações [5].

2.1.2. Reforço

O reforço desempenha um papel importante na determinação das propriedades finais do material compósito. Desta forma, as propriedades dos reforços são importantes, uma vez que são responsáveis por:

- Conferir uma elevada rigidez e resistência mecânica;
- Prevenir a propagação de fissuras;
- Suportar cargas elevadas;
- Reduzir o peso.

As fibras de reforço ou reforços fibrosos são cada vez mais utilizadas relativamente a materiais convencionais como o aço e o alumínio, porque apresentam uma densidade menor e uma resistência e rigidez bastante elevadas [2], [6]. As fibras de reforço são, normalmente, classificadas como contínuas ou curtas. Segundo Castro [7], a classificação das fibras depende do seu comprimento (L) e do valor crítico (L_c) que está diretamente relacionado com o diâmetro da fibra e com a união entre a matriz e a fibra. Logo, as fibras de reforço são designadas por fibras contínuas se o L for muito superior ao L_c . Em contrapartida, se o L for inferior a L_c então as fibras de reforço são designadas por fibras curtas [5]. As fibras mais conhecidas da família dos reforços são:

- Fibra de vidro;
- Fibra de carbono.

2.1.2.1. Fibra de vidro

As fibras de vidro são os reforços mais utilizados, representando cerca de 95% das fibras mais utilizados no mercado devido, principalmente, ao bom compromisso existente entre o seu custo e desempenho [5]. Os materiais compósitos com fibra de vidro possuem uma resistência aceitável, o seu fabrico é relativamente simples e tem boa resistência à corrosão. No entanto, o seu uso pode ser condicionado devido à baixa rigidez e à temperatura de serviço entre os 200°C e os 300°C [7]. Inicialmente, as fibras de vidro tinham o propósito de serem usadas na indústria têxtil, mas com o desenvolvimento das resinas termoendurecíveis, estas começaram a ganhar preponderância como reforços de materiais compósitos.

Os tipos de fibra de vidro que atualmente possuem uma importância comercial significativa no mercado são o *E-Glass*, *A-Glass*, *S-Glass* e *C-Glass*. O tipo de fibra *E-Glass* é o reforço utilizado com mais abundância, visto que constitui mais de 90% de toda a produção de fibra de vidro [6]. Este tipo de fibra foi responsável pela substituição do tipo de fibra *A-Glass* devido ao seu baixo teor alcalino e boas propriedades mecânicas, químicas e elétricas [5]. Em contrapartida, o tipo de fibra *A-Glass* possui um teor fortemente alcalino que contribui ativamente para o envelhecimento das fibras [3]. As fibras de vidro do tipo *S-Glass* possuem as melhores propriedades térmicas, mecânicas e elétricas de todas as fibras de vidro existentes no mercado [6] e são, especialmente, utilizadas pela indústria aeronáutica, uma vez que a sua produção é baseada em vidro de alta resistência [3]. Por fim, as fibras de vidro do tipo *C-Glass* são aplicadas em materiais sujeitos a uma grande exposição a ambientes corrosivos, uma vez que estes são caracterizados pela sua elevada resistência química [2].

2.1.2.2. Fibra de carbono

Ao longo dos últimos anos, a fibra de carbono foi-se tornando uma solução cada vez mais viável quando se trata de materiais compósitos de alto desempenho, uma vez que as suas propriedades mecânicas são superiores às de fibra de vidro. Destas propriedades, destacam-se principalmente a baixa densidade, a boa estabilidade térmica, as excelentes propriedades à tração, a boa condutibilidade térmica e elétrica, e a excelente resistência à deformação por fluência [8]. Quando o requisito principal é a redução de peso conjugado com um bom desempenho, como se verifica na indústria automóvel e aeronáutica, a fibra de carbono ganha vantagem sobre todos os outros tipos de fibras mesmo não sendo tão acessível monetariamente [9].

A produção das fibras de carbono deve-se, essencialmente, a três precursores: Poliacrilonitrilo (PAN), o alcatrão *Pitch* e os *Rayon fibers* que advêm da celulose. De uma maneira simplista, as fibras de carbono são produzidas através da decomposição térmica de estes precursores de cariz orgânico [3]. O PAN é atualmente o precursor mais utilizado, uma vez que o precursor *Pitch* dispõe de propriedades mecânicas inferiores e a produção a partir da celulose é muito dispendiosa [7].

2.1.3. Matriz

A matriz é caracterizada, essencialmente, por atuar como um meio de suporte, proteção e transferência de carga para os materiais de reforço dentro do material compósito [2]. As principais funções da matriz são:

- Conferir coesão ao material compósito – responsável por manter os materiais de reforço juntos e coesos e evitar que eles separem;
- Proteger o material de reforço – protege os materiais de reforço contra danos externos tais como corrosão e abrasão;
- Diminuir concentrações de tensões no material compósito – a matriz é responsável por diminuir as concentrações de tensões através da distribuição das cargas aplicadas no material compósito para os materiais de reforço. Os materiais de reforço conseguem suportar cargas mais elevadas, uma vez que estes são mais resistentes e rígidos do que a matriz.

A matriz é geralmente classificada como um material metálico, cerâmico ou polimérico. No entanto, a matriz de cariz polimérico distingue-se das demais matrizes, principalmente, no que diz respeito à baixa densidade dos polímeros, baixo custo de fabrico e facilidade do processamento [10]. As matrizes poliméricas dividem-se, fundamentalmente, em dois grupos:

- Matrizes termoplásticas;
- Matrizes termoendurecíveis.

2.1.3.1. Matrizes termoplásticas

As matrizes termoplásticas pertencem a uma classe de materiais poliméricos que amolecem quando são aquecidos e solidificam após o arrefecimento. Os termoplásticos podem ser fundidos e reprocessados repetidamente sem degradação significativa das suas propriedades. Esta

capacidade de sofrer uma transição de fase reversível de um estado sólido para a um estado fundido e vice-versa é a principal característica das matrizes termoplásticas, uma vez que as torna facilmente moldáveis possibilitando o fabrico de peças com geometria complexa [6]. Os custos associados à sua utilização são mais altos, no entanto numa perspetiva de produção em grande série a sua utilização é benéfica, uma vez que estas matrizes preservam o ambiente devido à possibilidade de reprocessamento dos materiais [11]. Existem diversos polímeros termoplásticos tais como o polipropileno (PP), poliamida (PA), policarbonato (PC), poli-éter-éter-cetona (PEEK), políimidas termoplásticas e polisulfureto de fenileno (PPS). O PEEK, o PPS e as políimidas termoplásticas são mais indicados para materiais compósitos de alta resistência. Já o PP e o PC são mais indicados para aplicações não estruturais e semiestruturais [3].

2.1.3.2. Matrizes termoendurecíveis

As matrizes termoendurecíveis, ao contrário do que se verifica nas matrizes termoplásticas, passam pelo processo de cura, logo não podem ser amolecidas ou reprocessadas por meio de um aquecimento. Estas matrizes ao serem moldadas e submetidas a processos de cura, sofrem uma reação química irreversível que transforma a estrutura molecular do material numa rede rígida [6]. Devido à sua estrutura molecular rígida, os polímeros termoendurecíveis apresentam uma grande resistência a altas temperaturas. Os poliésteres insaturados, as resinas de vinilester, as resinas fenólicas, as resinas de epóxido, as bismaleimidas e as políimidas termoendurecíveis são alguns exemplos de polímeros termoendurecíveis. As resinas epóxido, as bismaleimidas e as políimidas são mais utilizadas em materiais compósitos de alta resistência. Os poliésteres insaturados, as resinas de vinilester e as resinas fenólicas são mais utilizados em aplicações não estruturais e semiestruturais [3].

2.1.4. Aplicações

Os avanços experimentais e tecnológicos realizados nos materiais compósitos contribuíram bastante para uma expansão no mercado no que diz respeito às suas aplicações. O uso de materiais compósitos tem vindo a aumentar consideravelmente na indústria aeroespacial, devido à necessidade de encontrar alternativas viáveis quanto à seleção de materiais. O principal objetivo de esta procura de mais alternativas relativamente à escolha dos melhores materiais é melhorar os requisitos associados à segurança e desempenho [3]. De facto, as características mecânicas dos materiais compósitos contribuem significativamente para a diminuição de peso e aumento da rigidez do avião de tal forma que se torna possível uma redução considerável de custos no combustível e da pegada ecológica [12].

Como dito anteriormente, os grandes avanços associados ao estudo de materiais compósitos resultaram numa grande inovação no setor aeroespacial, de tal forma que 50% da estrutura do Boeing 787, lançado em 2007, é composta por materiais compósitos, como se verifica na Tabela 1. Na geração anterior, o Boeing 777, lançado 7 anos antes, apenas 11% da sua constituição é feita em materiais compósitos [12].

Tabela 1 - Materiais utilizados no Boeing 777 e Boeing 787 (adaptado de [12]).

Composição (%)	Boeing 777	Boeing 787 <i>Dreamliner</i>
Materiais compósitos	11%	50%
Alumínio	70%	20%
Titânio	7%	15%
Aço	11%	10%
Outros materiais	1%	5%

Os materiais compósitos também se encontram muito presentes na indústria automóvel. A necessidade contínua de obter materiais cada vez eficientes está muito associada a melhorias no desempenho do veículo, tais como a redução de peso, menor consumo de combustível e melhor controlo das emissões de carbono para a atmosfera [4]. No capítulo da competição, o investimento não é, de todo, uma preocupação, uma vez que o desempenho do veículo é o principal objetivo a ser cumprido. Deste modo, há uma constante procura, por parte das equipas de competição automóvel, por soluções cada vez mais inovadoras para conseguir ficar em vantagem em relação aos seus concorrentes [3].

A equipa da McLaren, nos anos 80, foi a grande revolucionadora da utilização de materiais compósitos na fórmula 1, uma vez que outras equipas começaram a aderir a estes materiais por influência do sucesso da construção do chassis do McLaren MP4-1, ilustrado na Figura 1 [3]. No ano de 1993, a McLaren transportou esta inovação para os carros de estrada com a construção do McLaren F1. Desde então, esta empresa não construiu mais nenhum carro sem que o chassis fosse concebido em fibra de carbono. Nos dias de hoje, os materiais compósitos ainda são objeto de estudo no centro de inovação da McLaren, sediado no Reino Unido, na cidade de Woking [13].



Figura 1 - Representação do McLaren MP4-1 [3].

A indústria naval também esteve atenta aos desenvolvimentos associados aos materiais compósitos. Desta maneira, os materiais compósitos começaram a ser introduzidos progressivamente em alguns componentes de navios com o principal objetivo de diminuir o seu peso. Segundo Mafalda et al. [10] a construção de chaminés de navios em materiais compósitos traduz-se numa redução de 50% do peso total do navio. Esta redução de peso tem um impacto bastante significativo na estabilidade do navio, para além de que reduz o custo de construção em cerca de 20% quando comparado com materiais de origem maciça tais como o aço inoxidável e o alumínio.

O MCMV 52 Koster-class, representado na Figura 2, é um exemplo de um navio de contramedida de minas construído à base de materiais compósitos [14].



Figura 2 - Navio MCMV 52 Koster-class [14].

2.1.5. Tipos de ensaios em materiais compósitos

Os materiais compósitos são sujeitos a diferentes tipos de ensaios para caracterizar o comportamento mecânico dos mesmos e analisar experimentalmente determinadas propriedades em condições controladas de laboratório. Neste subcapítulo são analisados os dois tipos de ensaios mais utilizados para caracterização de materiais compósitos.

2.1.5.1. Ensaios de composição

Estes ensaios são realizados no âmbito da caracterização do material compósito através de propriedades não mecânicas, tais como propriedades químicas e físicas [6].

Ensaio de densidade

A densidade é um parâmetro fundamental quando se pretende, por exemplo, determinar a fração volúmica de fibras e da matriz. Por isso, surgiu o ensaio de densidade realizado em função dos procedimentos presentes na norma ASTM D792, baseada no princípio de Arquimedes. Neste ensaio, as amostras são medidas com o recurso de uma balança, fora e dentro da água separadamente. A equação (1) permite chegar ao valor da densidade (d), onde w_a é a massa da amostra medida fora da água, w_w é a massa da amostra medida dentro da água e d_w é a densidade da água [15]

$$d = \frac{w_a d_w}{w_a - w_w}. \quad (1)$$

Para realizar este ensaio é necessário cortar os laminados em pequenos pedaços e, de seguida, atá-los a uma corda que está submersa em água destilada, tal como se verifica na Figura 3. É importante que estes pedaços do laminado não cheguem ao fundo do recipiente e que a água presente no recipiente seja suficiente para que os mesmos se encontrem completamente submersos. A densidade é obtida partindo do pressuposto que o peso da corda é desprezável [16].

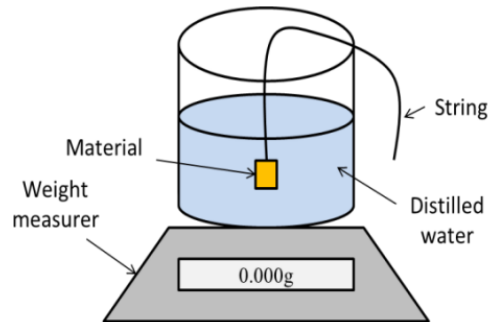


Figura 3 - Representação do ensaio de densidade [16].

Ensaio de fração volúmica de fibras

O ensaio mais conhecido para a determinação da fração volúmica de fibras traduz-se essencialmente na dissolução da matriz em ácido [17]. Este ensaio é baseado nas normas DIN EN 2564 e ASTM D3171-76 e consiste na exposição de uma amostra a um ácido altamente oxidante (como por exemplo o ácido sulfúrico) a elevadas temperaturas até que a matriz seja totalmente dissolvida, sobrando apenas as fibras resistentes a este processo químico. Após este processo, a fração volúmica de fibras é obtida através da pesagem e filtragem destas fibras. Este ensaio é utilizado quando a temperatura em que a matriz e o reforço se degradam é similar [18]. O ensaio ou teste da queima que se encontra descrito na norma ASTM D 3171-99 é muito semelhante ao ensaio da dissolução da matriz. O fator que diferencia ambos está presente na forma em que a matriz é eliminada, uma vez que no ensaio da queima as amostras são aquecidas no interior de uma mufla (forno) a uma temperatura suficiente que faça com que a matriz seja totalmente queimada, restando apenas as fibras. O ensaio da queima é o mais indicado quando a temperatura de degradação da matriz e do reforço são diferentes [19].

Ensaio de conteúdo de vazios

As propriedades mecânicas de um material compósito podem ser afetadas de uma forma negativa devido ao conteúdo de vazios, uma vez que estes atuam como pontos de concentrações de tensões. Por isso, é recomendado que haja um conhecimento acerca do conteúdo de vazios para que possa ser realizada uma estimativa sobre a qualidade e resistência dos materiais dos materiais compósitos. Para a determinação do conteúdo de vazios são seguidos os procedimentos referidos na norma ASTM D2734. Para este ensaio é necessário determinar a densidade real (d_r) e teórica (d_t) do material compósito, propriedades estas que são, naturalmente, diferentes por causa do aparecimento de vazios [6]. A equação (2) permite obter o valor da fração volúmica de vazios (V_v) em %

$$V_v = \frac{v_v}{v_c} \times 100 = \left(1 - \frac{d_r}{d_t} \right) \times 100, \quad (2)$$

onde v_c e v_v são o volume do material compósito e o volume de vazios, respetivamente.

2.1.5.2. Ensaio mecânicos

Os ensaios mecânicos são importantes para avaliar as propriedades mecânicas e o comportamento dos materiais em diferentes condições de carga. Estes ensaios fornecem informações fundamentais

sobre a rigidez, a ductilidade, a tenacidade, entre outras características de um material. Ao longo deste subcapítulo são dados a conhecer vários ensaios mecânicos [6].

Ensaio de tração

O objetivo de este ensaio é aplicar uma força de tração crescente nos topos do provete até à rotura do mesmo para determinar as propriedades mecânicas de tração do material compósito. No entanto, os materiais compósitos podem apresentar comportamentos mecânicos anisotrópicos, isto é, as suas propriedades podem variar dependendo da direção em que são aplicadas as forças, por isso as propriedades elásticas e de resistência do material são determinadas, normalmente, nas direções a 0° e 90° [6]. No que diz respeito às propriedades elásticas, pretende-se obter o módulo de elasticidade na direção das fibras (E_1), o módulo de elasticidade na direção perpendicular às fibras (E_2) e o coeficiente de Poisson (ν_{12}). Relativamente propriedades de resistência do material pretende-se determinar a resistência à tração a 0° (X_T) e a resistência à tração a 90° (Y_T) [3].

De maneira a obter estas propriedades, são colocados extensómetros com fios soldados e de elevada resistência elétrica devidamente alinhados, como ilustrado na Figura 4. O alinhamento é caracterizado como um procedimento fundamental neste ensaio, uma vez que erros de 2% associados a um alinhamento defeituoso podem resultar em erros de leitura de 15% [17]. As normas associadas a estes ensaios são a ASTM D3039 e a ISO 527 [6].

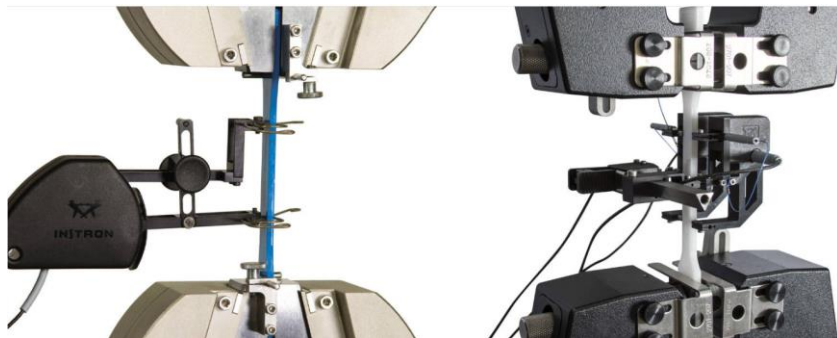


Figura 4 - Representação dos extensómetros colocados no ensaio de tração referente à norma ISO 527 [20].

Ensaio de compressão

Os ensaios de compressão em materiais compósitos são importantes para avaliar a resistência mecânica, bem como o comportamento dos materiais sujeitos a cargas de compressão [3]. O objetivo de este ensaio é muito idêntico ao ensaio de tração. A única diferença verifica-se na aplicação de uma força de compressão nos topos do provete até que se dê a rotura do mesmo. De seguida, são adquiridos os dados necessários para fazer um gráfico de força em função do deslocamento para que se consiga obter propriedades de compressão tais como [6]:

- Resistência à compressão (σ_c);
- Coeficiente de Poisson (ν);
- Módulo de Elasticidade (E);
- Tensão de rotura (σ_u).

As normas seguidas por este tipo de ensaios são: ASTM D695, ASTM D3410 e ASTM D6641 [3].

Ensaio de corte

A resistência ao corte é definida como a habilidade de o material resistir à deformação quando sujeito a forças de corte. Em materiais compósitos, os ensaios de corte ajudam a determinar a resistência do material ao deslizamento entre camadas. Com a realização destes ensaios consegue-se determinar vários parâmetros tais como a tensão máxima de corte (τ), a deformação de corte (γ), o módulo de corte (G) e ainda os modos de falha. Estes parâmetros ajudam a caracterizar o comportamento de um material compósito sujeito ao corte e avaliar o seu desempenho estrutural [3].

Existem vários testes tais como: o teste Iosipescu (também conhecido por *V-notched beam test*) segundo a norma ASTM D5379, o teste a provetes $[\pm 45^\circ]$ segundo a norma ASTM D3518, o teste a provetes *off-axis* a 10° e o teste *rail-shear* segundo a norma ASTM D4255-83 [17].

Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão são realizados com o objetivo de caracterizar propriedades mecânicas tais como o módulo de elasticidade e a resistência mecânica de um provete submetido a cargas de flexão [3]. Para determinar estas propriedades mecânicas são utilizados dois tipos de ensaios, designados por flexão em três pontos e flexão em quatro pontos, que seguem a norma ASTM D790 e ASTM D6272, respetivamente [6].

Em ambos os ensaios o provete é posicionado sobre dois apoios dispostos paralelamente, como se verifica na Figura 5. A única diferença verificada nos dois ensaios está presente na posição onde é aplicada a força ou as forças sobre o provete. No ensaio de flexão em três pontos a força é aplicada no centro do provete, enquanto no ensaio de flexão em quatro pontos são aplicadas duas forças no centro do provete [21].

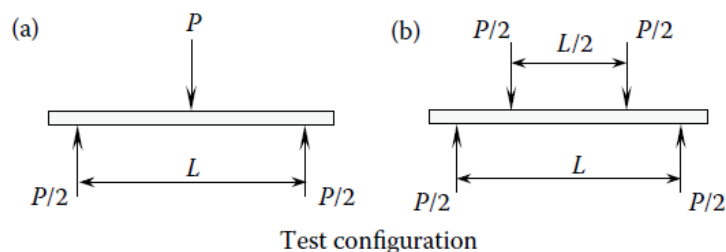


Figura 5 - Representação esquemática do ensaio de flexão (a) em três pontos e (b) em quatro pontos (adaptado de [6]).

2.2. Processo de infusão por vácuo

Nos últimos anos, verificou-se uma utilização crescente dos materiais compósitos por parte de uma indústria tão conceituada como a aeronáutica. Atualmente, o fabrico em autoclave continua a ser dominante, uma vez que as propriedades mecânicas obtidas a partir deste processo permanecem superiores relativamente a todos os outros processos. A principal desvantagem do uso da autoclave na produção de materiais compósitos incide nas elevadas pressões e temperaturas requeridas, que resultam num consumo energético significativo e, conseqüentemente, num investimento bastante elevado. Os longos tempos de ciclo também são, também, considerados uma desvantagem na medida em que vão ser um entrave à produção em grande escala [22]. Na tentativa de encontrar melhores soluções no ponto de vista económico, é possível recorrer a processos fora da autoclave. Posto isto, podem ser considerados processos de transferência de resina como por exemplo o *Resin*

Transfer Moulding (RTM), o *Structural Reaction Injection Molding* (SRIM), a laminagem manual (*Hand Laminating*), a moldação por injeção (*Injection Moulding*), a moldação por compressão (*Compression Moulding*), entre outros. Estes processos são mais vantajosos do que outras técnicas de produção de materiais compósitos, uma vez que podem ser aplicados a uma vasta gama de componentes. O princípio utilizado em todos estes processos é relativamente simples e consiste, primeiramente, na colocação de uma sequência de empilhamento de reforços num molde aberto ou fechado em que a existência de um gradiente de pressão vai ser responsável pela introdução da resina para o interior do molde. Os materiais utilizados no molde e a maneira como o gradiente de pressão é aplicado são algumas variações que vão diferenciar os diversos processos de transferência de resina [23].

Com a interpretação da Figura 6 é possível concluir que a moldação por injeção e por compressão são processos que são mais adequados para produção em grande escala, visto que os custos associados às ferramentas utilizadas para estes processos são significativamente altos. No entanto, estes processos apresentam limitações no que diz respeito a aplicações em elementos não estruturais devido à dificuldade em controlar a orientação das fibras da peça final. A laminagem manual exige inicialmente custos mais baixos, mas não é indicada para a produção em grande escala devido à inexistência de procedimentos automatizados [23].

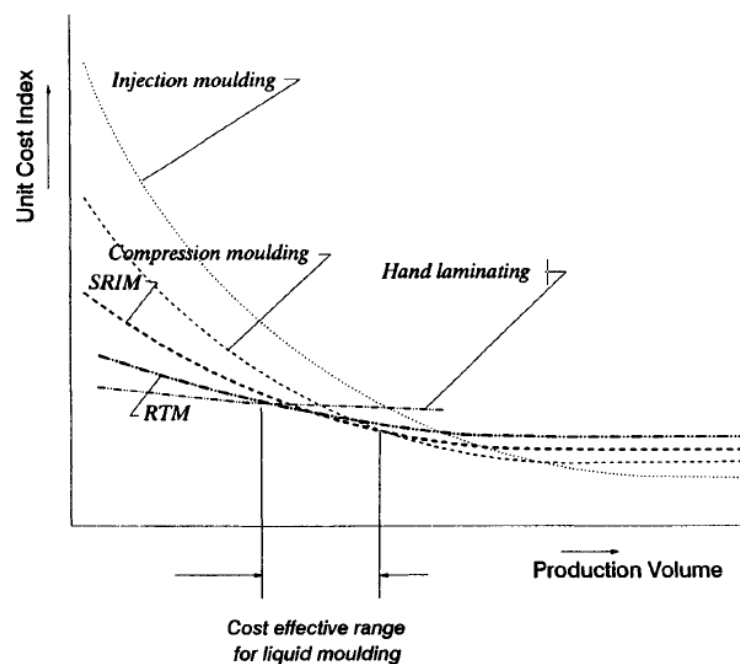


Figura 6 - Relação custo/volume de produção de processos da família dos processos de transferência de resina [23].

Um dos processos mais conhecidos da família dos processos de transferência de resina para o fabrico de materiais compósitos é o RTM. No entanto, este possui algumas restrições, principalmente no que diz respeito ao tamanho das peças e à necessidade de dois moldes rígidos com uma geometria com um nível de complexidade significativo, o que conduz a um esforço financeiro maior associado às ferramentas a utilizar [24]. No entanto, este processo de fabrico permite um bom acabamento superficial e toleranciamento dimensional, para além da peça final obter frações volúmicas de fibras na ordem dos 60% a 70% [22]. O RTM foi um dos processos responsáveis pelo aparecimento do processo de infusão por vácuo, uma vez que os entraves associados aos materiais e geometrias relativos ao molde fizeram aumentar a procura de soluções

mais económicas. Estes custos mais avultados associados aos moldes, no processo RTM, advêm da necessidade de estes estarem sujeitos a elevadas pressões de injeção. Para além disto, o desenvolvimento do processo de infusão por vácuo veio resolver a dificuldade do fabrico de peças portadoras de grandes dimensões que se verificava quando se utilizava o processo RTM [2].

2.2.1. Descrição do processo

O *Marco method* (U.S Patent 2,495,640) registado em 1940 surgiu como a primeira patente do processo de infusão por vácuo [25]. Os estudos e as experiências que se seguiram depois deste acontecimento resultaram em várias designações. Estas diversificações de designações, por vezes, geram alguma confusão, uma vez que estas podem estar associadas a um novo processo ou a modificações de um processo já existente [26]. Desta maneira, o processo de infusão por vácuo pode ser associado às seguintes designações: *Vacuum-Assisted Resin Transfer Moulding* (VARTM), *Resin Infusion under Flexible Tooling* (RIFT), *Seeman Composites Resin Infusion Moulding Process* (SCRIMP), *Double Bag Vacuum Infusion* (DBVI), *Vacuum Assisted Process* (VAP), *Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion* (CAPRI) e *Vacuum Infusion Process* (VIP) [2]. No entanto, a modelação do processo de infusão por vácuo deveu-se à publicação de experiências realizadas pelo francês Henry Darcy no ano de 1856, concentradas no estudo da permeabilidade. A lei de Darcy surgiu através destas experiências no qual foi analisado o comportamento do escoamento da água na areia [27]. Posteriormente, esta lei começou a ser utilizada para analisar o escoamento de qualquer fluido num determinado meio poroso. Desta forma, a equação (3) referente à lei de Darcy permite calcular a velocidade de escoamento do fluido (u)

$$u = \frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx}, \quad (3)$$

onde K é o coeficiente de permeabilidade do meio poroso, μ é a viscosidade do fluido e $\frac{dP}{dx}$ é o gradiente de pressão.

A viscosidade do fluido e a permeabilidade dos reforços (meio poroso) são parâmetros importantes para inspecionar a qualidade da peça final [27], [28], uma vez que se a viscosidade do fluido for elevada e se o reforço for pouco poroso haverá mais dificuldade para o escoamento do fluido. No entanto, quanto maior for o gradiente de pressão, mais rápido será o escoamento do fluido. Para além disto, as pressões e os caudais de entrada e de saída do fluido, bem como o formato do molde, também são variáveis a ter em conta quando se trata de analisar de que forma se comporta um fluido num determinado meio.

O processo de infusão por vácuo baseia-se numa técnica de infusão de resina realizada em molde fechado, como se observa na Figura 7, na qual os reforços são colocados sobre um molde rígido e um saco de vácuo devidamente selado por uma fita isoladora, para que sejam evitadas fugas de ar. Em cima dos reforços é ainda colocada uma camada de *peel ply*, que possui propriedades não aderentes que permitem a separação mais fácil dos canais de entrada e saída do saco de vácuo e também facilitam a remoção da peça final depois de completada a cura. Por fim, é colocada a rede de distribuição (*flow-enhanced medium* ou *flow mesh*) que tem o propósito de facilitar o escoamento da resina e, conseqüentemente diminuir o tempo de enchimento do molde. O canal de entrada é o meio responsável pela introdução da resina no molde, enquanto a aplicação do vácuo e a expulsão da resina em excesso são concebidas através do canal de saída [29].

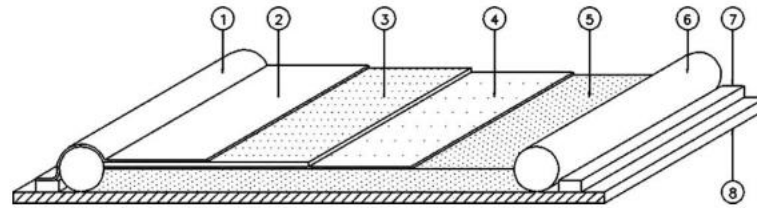


Figura 7 - Representação da montagem do *setup* no processo de infusão por vácuo: 1) canal de entrada de resina; 2) saco de vácuo; 3) *flow-enhanced medium*; 4) *peel ply*; 5) laminado; 6) canal de saída de resina; 7) fita isoladora; 8) molde rígido (adaptado de [29]).

Todo o circuito da resina está ligado a uma bomba de vácuo que é responsável pela remoção do ar no interior do molde. É importante realçar que, dependendo do tipo de resina utilizada, poderá ser necessário aquecê-la antes de se proceder à infusão. Depois de a montagem do *setup* estar completa, o primeiro passo na realização deste processo passa pela verificação da presença de fugas de ar. Só depois de concluir que não existem fugas de ar é que se procede à compactação de reforços, que corresponde ao estágio 1 presente na Figura 8, através da aplicação do vácuo no interior do molde com o canal de entrada de resina fechado. De seguida, abre-se o canal de entrada e a aplicação do vácuo vai gerar um gradiente de pressão, que faz com que a resina seja transferida do recipiente para o interior do molde (estágio 2). Após o processo de transferência da resina estar completo, o procedimento seguinte passa pela cura da mesma (estágio 3). Neste estágio, fecha-se o canal de entrada enquanto se mantém a aplicação do vácuo. Por último, o estágio 4 corresponde à obtenção da peça final [24].

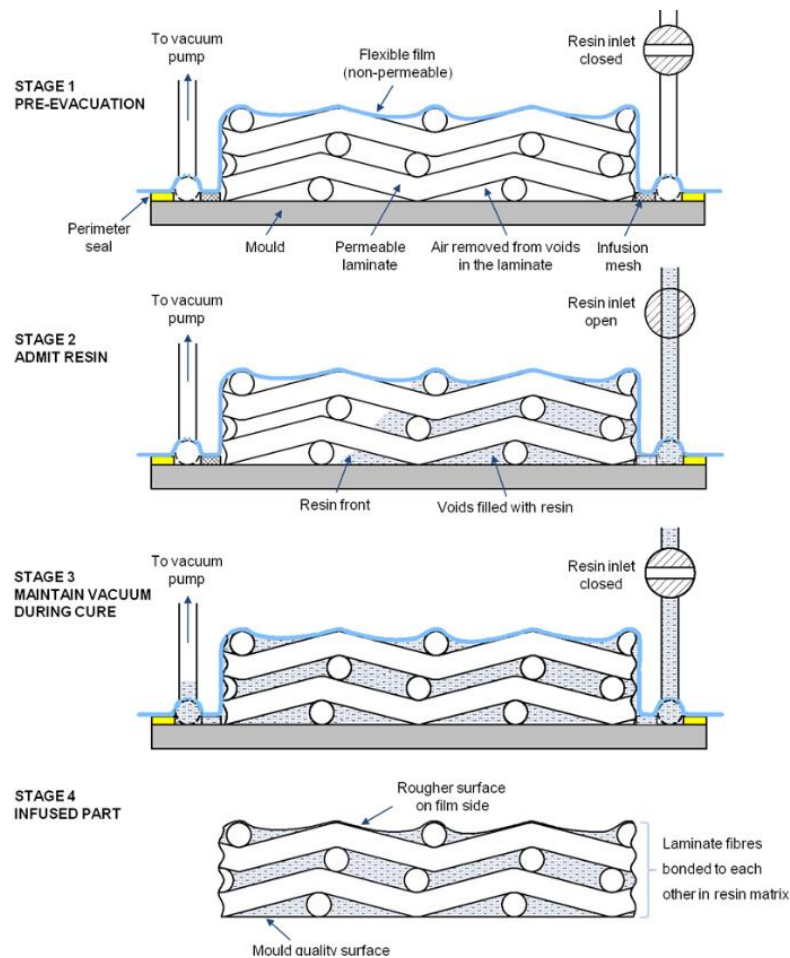


Figura 8 - Esquema dos diferentes estágios do processo de infusão por vácuo [30].

2.2.2. Vantagens e limitações

O processo de infusão por vácuo destaca-se, principalmente, pelo baixo investimento de todo o processo, isto é, os custos de produção dos equipamentos e materiais necessários, tal como a mão de obra, são bem menos dispendiosos do que nos processos em molde aberto. A mão de obra é mais barata, porque os operadores têm menos contacto direto com a resina no processo de infusão por vácuo relativamente aos processos em molde aberto. Como tal, o processo conduz a menos erros e incertezas experimentais e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas obtidas na peça a fabricar. Ao contrário do acontecido nos processos realizados em molde aberto, a inclusão das técnicas de injeção e infusão de resina sob pressão em molde fechado permitem que as emissões de compostos orgânicos voláteis para o exterior sejam eliminadas durante o processo de cura, contribuindo para a redução de problemas de saúde dos operadores associados à inalação destes compostos [31]. Para além disto, esta redução das emissões de compostos orgânicos voláteis contribui significativamente para a diminuição dos custos de ventilação da fábrica. Segundo a KBS [30], a maior parte dos trabalhadores têm relativa facilidade em aprender os procedimentos que lhe competem na aplicação desta técnica de infusão tornando-a, desta forma, ainda mais atraente para a produção de materiais compósitos. De facto, este processo é muito rentável e prático já que permite obter peças mais leves e com boa rigidez aplicáveis, geralmente, em grandes estruturas devido aos bons índices de consolidação da resina, bom controlo da espessura do laminado e elevada fração volúmica de fibras. Na maior parte dos casos, o número de componentes necessários para fazer uma peça pode ser reduzido com a utilização da infusão de resina por vácuo [30], [32].

Em contrapartida, o processo de infusão a vácuo possui algumas limitações, principalmente na montagem do molde, devido à dificuldade acrescida no controlo das fugas de ar, o que compromete os resultados obtidos, já que a existência de áreas com um alto teor de vazios aumentará significativamente. Para além disto, a existência de regiões com excesso ou escassez de resina espalhados pelo laminado, bem como a existência de bolhas de ar devido a fugas também devem ser evitados no processo de infusão por vácuo [28]. Outro inconveniente associado a este processo de fabrico está relacionado com o desperdício verificado nos materiais que não podem ser reutilizáveis, como canais por onde se vai deslocar a resina, sacos de vácuo, fitas de isolamento, *peel ply*, entre outros. É possível verificar que o processo de infusão por vácuo é mais limitado do que o processo RTM no que diz respeito à geração do gradiente de pressão em ambos os processos, uma vez que no processo de infusão por vácuo este é formado através da aplicação de vácuo enquanto, no RTM o mesmo é formado através da aplicação de forças de aperto quando se fecha o molde [2]. Para além disto, no processo RTM a resina contida no recipiente é pressurizada antes de entrar no molde, na qual é atingida uma pressão de injeção situada na ordem dos 3,5 a 7 bar [22]. No processo de infusão por vácuo, a pressão de infusão da resina nunca excede a pressão atmosférica, que corresponde à pressão de 1 bar [31]. O facto de o gradiente de pressão não exceder a pressão atmosférica pode apresentar-se como uma limitação, devido ao tempo adicional necessário para preencher todo o molde [1], havendo uma possibilidade significativa de a resina ficar sólida antes de completar o enchimento. É de realçar que este problema se sobressai mais na direção da espessura do laminado, porque o tempo de enchimento verifica-se, salvo raras exceções, mais demorado segundo esta direção. Outros fatores que podem levar a este inconveniente são a porosidade do material, a elevada viscosidade da resina, a estrutura das fibras e o número de camadas. De maneira a combater estes inconvenientes, é aconselhado o uso de redes de

distribuição cuja função foi explicada no subcapítulo 2.2.1. A aplicação do gradiente de pressão também influencia a espessura, uma vez que quando a resina é introduzida no interior do molde à pressão atmosférica, é verificado um aumento de pressão no canal de entrada da resina.

Este aumento de pressão, que depende da posição da frente de fluxo ou escoamento da resina (*flow front position*), representada na Figura 9, provoca uma relaxação das fibras mais acentuada no início do comprimento do laminado, que resulta num aumento de espessura e, conseqüente, diminuição da fração volúmica das fibras nessa região do laminado. No entanto, é possível verificar que, à medida que decorre o escoamento da resina, a espessura do laminado fica mais homogênea devido à diminuição do gradiente de pressão. Uma maneira de contornar este problema passa por ter um melhor controlo da posição frontal de escoamento da resina através da adição de mais canais de entrada da mesma [26].

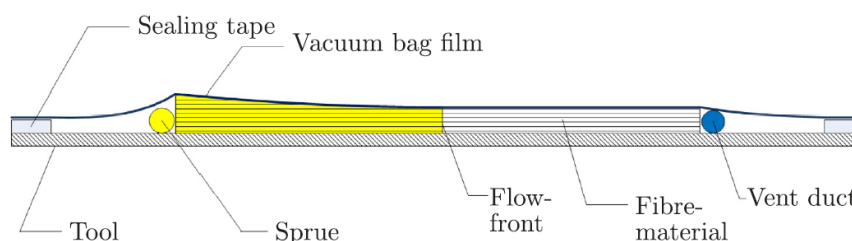


Figura 9 - Diferença de espessura ao longo do comprimento do laminado devido ao gradiente de pressão aplicado no processo de infusão por vácuo [26].

2.2.3. Aplicações

Os primeiros avanços no que diz respeito à utilização do processo de infusão por vácuo aconteceram na indústria marítima. O objetivo principal da sua utilização era substituir processos de fabrico em molde aberto de forma a contornar as dificuldades impostas pelas emissões de compostos voláteis orgânicos, como o estireno [2].

Este processo começou a ganhar alguma preponderância devido, essencialmente, à sua versatilidade, o que permitiu a sua utilização em outros tipos de aplicações, como se verifica na Tabela 2. Nesta secção são identificados alguns exemplos de aplicações associadas ao processo de infusão por vácuo.

Tabela 2 - Indústrias onde é aplicado o processo de infusão por vácuo (retirado de [2]).

SETOR	APLICAÇÕES
MARÍTIMO	Cascos e conveses de navios
TRANSPORTES	Tetos e piso de contentores frigoríficos, painéis exteriores de carroçarias de automóveis
AEROESPACIAL	Painéis de asas de pequenas aeronaves
INDUSTRIAL	Pás de ventiladores e sanitas
ENERGIA	Painéis solares, pás de turbinas eólicas e materiais de isolamento elétrico
INFRASTRUTURAS	Postes de iluminação e pavimento de pontes
MILITAR	Cascos de veículos blindados

2.2.3.1. Indústria marítima

Na indústria marítima, a técnica de infusão por vácuo é aplicada, principalmente, em partes de barcos com grandes dimensões, como os cascos e os conveses, devido à extrema necessidade de estas zonas possuírem excelentes características mecânicas como a elevada rigidez e o baixo peso [33]. Uma das aplicações mais conhecidas do processo de infusão por vácuo nesta indústria encontra-se presente em veleiros.

O veleiro *Contest 55*, que possui 17 metros de comprimento, é um desses exemplos práticos. O casco é constituído por resina de poliéster insaturada e fibras de vidro multiaxiais, sendo aplicado anteriormente um *gelcoat* que se caracteriza por um revestimento de fibra de vidro que dá cor e brilho, para além de proteger a peça de impactos e da corrosão. Na Figura 10 é possível identificar os variados canais de entrada de resina, uma vez que as zonas mais escuras representam a resina já impregnada [2].

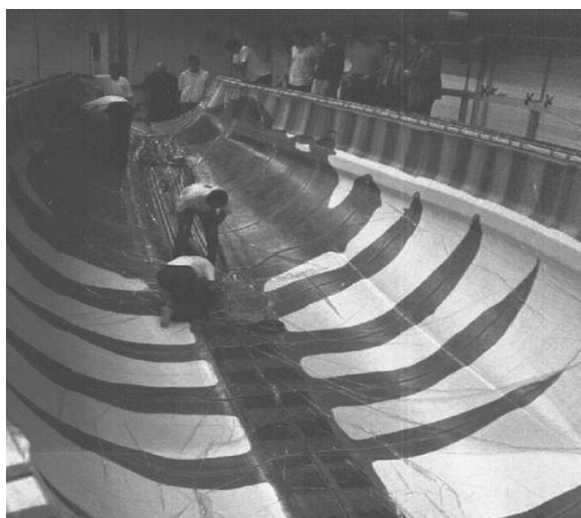


Figura 10 - Percurso do escoamento da resina no casco do *Contest 55* [2].

2.2.3.2. Indústria aeronáutica

Na indústria aeronáutica ainda são utilizadas autoclaves de grandes dimensões para o fabrico de asas e fuselagens de aviões como o Boeing 777, o Boeing 787 e o Airbus A350 XWB. No entanto, alguns fabricantes de aviões consideram o processo de infusão por vácuo uma boa alternativa no que diz respeito à redução do tempo de construção dos componentes através da eliminação da cura em autoclave [34].

A *Irkut Corporation* é uma empresa russa responsável pelo fabrico de aviões, e implementou este processo para fazer os painéis das asas do Irkut MC-21-300 como se verifica na Figura 11 [35]. No ano de 2018, em Paris, ocorreu a entrega dos prémios *JEC Innovation*, que pretendem condecorar as soluções mais inovadoras aplicadas em materiais compósitos do *JEC World*, em várias categorias. A técnica de infusão por vácuo aplicada nas asas do Irkut MC-21-300 venceu duas categorias destes conceituados prémios. Esta técnica venceu a categoria relativa à indústria aeronáutica, onde os critérios que lhe valeram a atribuição deste prémio foram a originalidade, o potencial de crescimento no mercado em que estão inseridos e a superioridade técnica (processo e materiais utilizados) da solução imposta. Para além disto, a técnica de infusão por vácuo foi a vencedora da categoria de melhor projeto dos prémios *JEC Innovation* [36].



Figura 11 - Painel da asa direita do avião Irkut MC-21-300 [35].

2.2.3.3. Indústria eólica

A indústria eólica é outro exemplo prático referente à utilização de processos de infusão de resina na produção de peças de grandes dimensões. A laminação manual e a infusão de resina ocupam 94% da construção de pás de turbinas eólicas a nível mundial [37]. A utilização destes processos procura potencializar o desempenho da peça, aumentar a produção de peças em grande escala e melhorar, significativamente, as condições de trabalho. De seguida, são apresentadas duas empresas que recorreram a este processo para fabricar pás de turbinas eólicas.

A *LM Wind Power* é uma das maiores empresas à escala mundial na produção de pás de turbinas eólicas. Os materiais utilizados nas pás são a fibra de vidro e a resina de poliéster, e ambos são alvo de desenvolvimento por parte da empresa desde 1978, na tentativa de encontrar as soluções mais convenientes para encontrar o melhor compromisso entre os custos associados ao fabrico e o desempenho [38]. Esta empresa é detentora do recorde do fabrico da maior pá de uma turbina eólica pelo processo VARTM (73,5 metros de comprimento), representada na Figura 12.

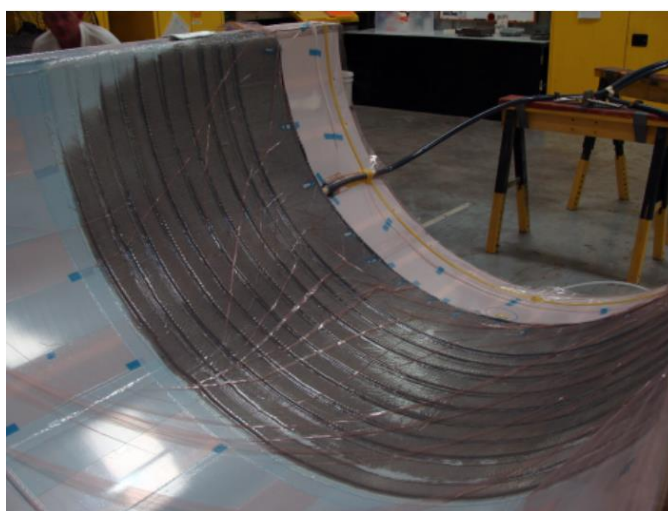


Figura 12 - Representação da infusão de resina, através do processo VARTM, na pá de uma turbina eólica [38].

A *Covestro* foi a primeira empresa a fabricar pás de turbinas eólicas através da infusão por vácuo de resina de poliuretano com a fibra de vidro. Segundo os representantes desta empresa, a resina de poliuretano apresenta baixa viscosidade, boa fluidez e tempos de cura curtos. Estas

características reduzem os custos de produção e, conseqüentemente, aumentam a cadência da produção. O design das pás também foi aperfeiçoado com a finalidade de tornar as mesmas mais leves e resistentes. As pás foram sujeitas a diversos testes (estáticos e de fadiga) para analisar a sua segurança e longevidade. Os resultados provenientes destes testes demonstraram que as pás apresentam um ótimo desempenho em condições ambientais adversas, logo o processo de infusão por vácuo é uma ótima solução para o fabrico de pás de turbinas eólicas. As primeiras pás fabricadas através do processo de infusão de resina de poliuretano, representadas na Figura 13, foram instaladas com sucesso num parque eólico em Tieling no Nordeste da China [39].



Figura 13 - Instalação das pás da turbina eólica no parque eólico em Tieling, China [39].

2.2.4. Melhoria do processo

Como dito anteriormente, a resina é introduzida para o interior do molde devido a um gradiente de pressão. Este acontecimento promove a criação de bolhas de ar no interior do molde, o que resulta na variação da espessura do laminado devido ao aumento de pressão no canal de entrada de resina [40]. Esta variação da espessura é uma limitação neste processo, uma vez que se pretende uma peça com a maior uniformidade possível. Assim sendo, neste subcapítulo são descritas três variantes do processo de infusão por vácuo que foram estudadas com a finalidade de otimização do mesmo, com principal destaque no capítulo da compactação.

2.2.4.1. DBVI

O processo *Double Bag Vacuum Infusion* (DBVI) foi desenvolvido nos anos 80 pelo Centro Naval de Guerra para estudar a cura de pré-impregnados [41]. Neste âmbito, foram realizados diversos estudos com o propósito de analisar o teor de conteúdo de vazios alcançado neste processo e comparar, posteriormente, com a utilização de apenas um saco de vácuo. Os resultados obtidos através desta análise permitiram concluir que houve uma redução de vazios de 6 a 7% para 1 a 3% com a utilização do processo DBVI [41]. Como o próprio acrónimo indica, este processo possui dois sacos de vácuo independentes com funções diferentes. O saco de vácuo interno é responsável por evitar a propagação dos compostos voláteis orgânicos e pela transferência de resina, enquanto o saco de vácuo externo tem a finalidade de compactar o laminado [1].

A adição do segundo saco de vácuo contribui para a uniformidade da espessura final da peça e para o aumento da fração volúmica de fibras. Para evitar que o saco externo colapse sobre o saco interno, é utilizado um meio poroso (*breather cloth*) entre eles, como se verifica na Figura 14. Posto isto, esta variante do processo de infusão por vácuo demonstra ser uma boa opção para aumentar a compactação de reforços e, conseqüente, fração volúmica de fibras [41].

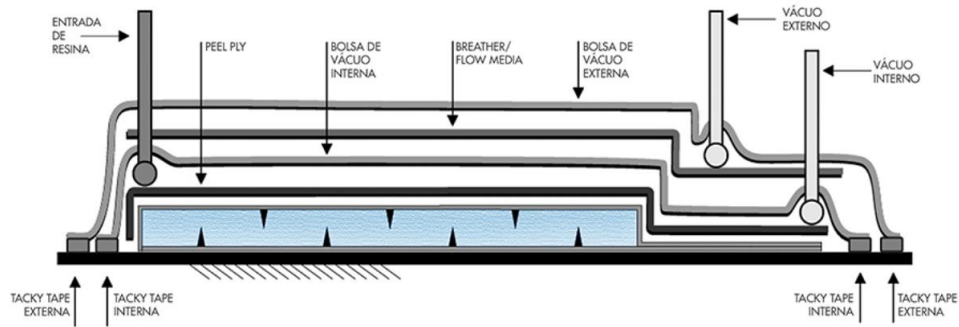


Figura 14 - Representação esquemática do processo DBVI [40].

2.2.4.2. VAP

O *Vacuum Assisted Process* (VAP) é outra variante do processo de infusão por vácuo patenteada pela *European Aeronautic Defence and Space Company* (EADS) sediada em Amsterdão, nos Países Baixos. Este processo é muito idêntico ao processo VARTM, e existe apenas um aspeto responsável pela distinção de ambos.

No VAP, cuja representação esquemática encontra-se ilustrada na Figura 15, é utilizada uma membrana semipermeável situada debaixo do *breather cloth* [41] com o objetivo de separar a saída de vácuo da superfície da peça. A utilização desta membrana permite uma estabilização da posição frontal de escoamento da resina e uma compactação mais uniforme do laminado, o que resulta na diminuição do conteúdo de vazios e no aumento da fração volúmica de fibras. Para além disto, esta membrana promove uma desgaseificação contínua ao longo da superfície da peça, algo que não é visto num processo de infusão convencional. Um ponto menos favorável deste processo reside na demora do tempo de infusão da resina ao longo do reforço. No entanto, este processo apresenta-se como uma alternativa totalmente viável na obtenção de boas propriedades mecânicas da peça final [1].

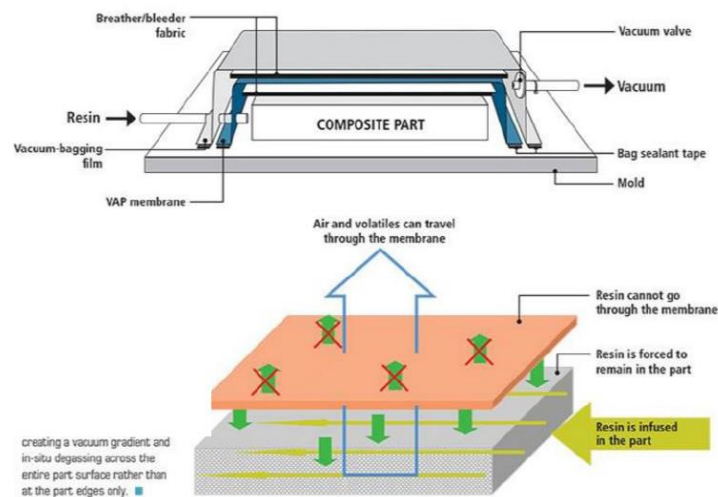


Figura 15 - Representação esquemática do processo VAP [1].

2.2.4.3. CAPRI

No ano de 2003, a Boeing Corporation patenteou um processo designado por *Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion (CAPRI)*, cujo objetivo era promover o aumento da fração volúmica de fibras. O objetivo do CAPRI, cuja representação esquemática se encontra ilustrada na Figura 16, consiste em diminuir a espessura do laminado e respetivo aumento considerável da fração volúmica de fibras através da aplicação de ciclos de compactação (*debulking cycles*) nos reforços de fibras antes da infusão. Neste processo são necessárias duas bombas de vácuo, onde uma das bombas é responsável pela aplicação de vácuo total no interior do molde, enquanto a outra bomba promove o vácuo parcial no recipiente onde está contida a resina.

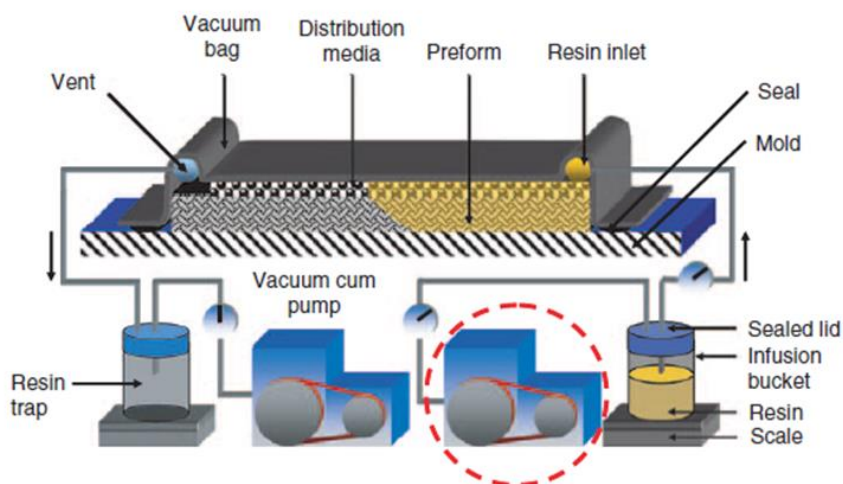


Figura 16 - Representação esquemática do processo CAPRI [42].

A utilização de duas bombas de vácuo proporciona uma redução do gradiente de pressão, o que torna a espessura mais uniforme ao longo do comprimento do laminado [41]. No entanto, quanto menor for o gradiente de pressão, menor será a velocidade de escoamento da resina e, portanto, mais demorado será o tempo de enchimento do molde. Apesar disto, este processo tem ganho preponderância na indústria aeronáutica, mesmo com a concorrência muito forte de processos associados à autoclave, devido a boas frações volúmicas de fibras e boa repetibilidade do processo [1]. Como tal, é possível concluir que a compactação de reforços desempenha um papel muito importante quando se pretende obter peças com excelente qualidade e desempenho.

2.3. Compactação

A compactação é uma etapa do processo de infusão por vácuo que ocorre na fase de pré impregnação da resina e consiste, essencialmente, na aplicação de uma força na direção da espessura de um determinado empilhamento de materiais de reforço quando é aplicada pressão negativa (vácuo) no interior do molde [43]. Nesta etapa, o ar presente no interior do molde é removido e o saco de vácuo é ajustado ao material do reforço o que resulta na sua compactação. A compactação dos reforços é de facto uma etapa importante do processo de infusão por vácuo, uma vez que permite que os reforços atinjam uma fração volúmica de fibras elevada e um volume de vazios reduzido antes da infusão da resina [44].

2.3.1. Fundamentos da compactação

No contexto do processo de infusão por vácuo, a compactação de reforços refere-se à aplicação de pressão sobre as camadas de fibras antes de iniciar a infusão da resina por vácuo. Os principais objetivos que se pretendem atingir com a compactação dos reforços são [43]:

- Aumentar a fração volúmica de fibras;
- Reduzir o conteúdo de vazios.

A compactação é uma etapa relevante do processo de infusão por vácuo uma vez que permite que os feixes de fibras fiquem mais próximos entre si, o que resulta no aumento da fração volúmica de fibras e na redução do conteúdo de vazios. A fração volúmica de fibras elevada, bem como o conteúdo de vazios reduzido, são os principais responsáveis por conferir excelentes propriedades mecânicas tais como elevada rigidez, elevada resistência mecânica e um peso reduzido ao laminado [44].

Para um material de reforço apresentar excelentes propriedades mecânicas é necessário que este seja compactado até atingir uma fração volúmica de fibras relativamente elevada [45]. Para determinar a fração volúmica de fibras é necessário monitorizar a espessura do laminado ao longo do processo de compactação. Como tal, como se verifica na equação (4), a fração volúmica de fibras (V_f) é correlacionável com a espessura do laminado (h)

$$V_f = \frac{A_m N}{\rho_s h}, \quad (4)$$

onde A_m é a gramagem (massa por unidade de área), N é o número de camadas e ρ_s é a massa volúmica da fibra [43].

Contudo, quando se trata de analisar a compactação em reforços fibrosos é necessário ter em consideração vários fatores tais como [43]:

- A pressão aplicada no interior do molde;
- O número de ciclos de compactação aplicados;
- A estrutura do reforço utilizada;
- O número de camadas.

Quanto maior for a pressão aplicada no interior do molde, maior é deformação do reforço (menor é a espessura do reforço). Os gráficos da espessura em função da pressão de compactação em diversos estudos [44]–[46] comprovam este acontecimento. Os ciclos de compactação também contribuem para a redução da espessura do reforço e, conseqüente, aumento da fração volúmica de fibras do laminado [47]. A escolha do reforço é um fator muito significativo, uma vez que se pretende que o mesmo possua uma estrutura que imponha pouca resistência à deformação para que o laminado adquira uma fração volúmica de fibras elevada [45]. O aumento do número de camadas contribui para uma fração volúmica de fibras mais elevada. No entanto, este fator está de certa forma relacionado com a estrutura dos reforços, uma vez que este aumento da fração volúmica de fibras depende da facilidade da ocorrência de um fenómeno designado por *nesting* mencionado posteriormente (subcapítulo 2.3.2.3) [45].

2.3.2. Tipos de comportamentos

A compactação contribui para que as fibras evidenciem alguns comportamentos, tais como a flexão entre os feixes de fibras (*tows*), a fricção (deslizamento) e o fenômeno *nesting*. Conforme descrito na literatura [45], [48], [49], a estrutura dos reforços é um dos principais fatores com influência nestes tipos de comportamentos. Como tal, o principal objetivo desta secção é caracterizar estes três tipos de comportamentos.

2.3.2.1. Flexão entre os feixes de fibras

Quando a pressão é aplicada sobre o reforço, os feixes de fibras têm tendência a deformar por flexão. No entanto, a capacidade de resistir à deformação à flexão varia de acordo com a estrutura do reforço (Figura 17). Se a estrutura do reforço possuir muitos entrelaçamentos como o *plain weave* então é mais difícil ocorrer deformação à flexão. Em contrapartida, o reforço *5H sateen* possui menos entrelaçamentos do que o *plain weave*, pelo que é mais fácil reduzir a sua espessura final, uma vez que o reforço possui pouca resistência à deformação por flexão. Já o reforço NCF possui uma estrutura especial e, em semelhança ao reforço *5H sateen*, tem uma baixa rigidez à flexão [50]. De acordo com Saunders et al. [51], o reforço NCF tem maior facilidade para deformar sob compactação do que o *plain weave* e o *5H sateen*.

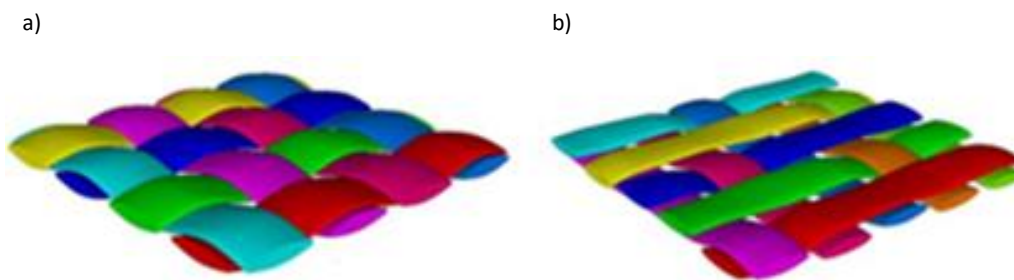


Figura 17 - Estrutura do reforço a) *plain weave* e b) *5H sateen* (adaptado de [45]).

A análise da deformação por flexão das fibras é muito importante, visto que deu origem ao primeiro modelo, proposto por Van Wyk [52], que consiste no estudo da compactação em reforços com fibras dispostas aleatoriamente. Este modelo assume a deformação do reforço como um sistema de unidades à flexão, através da criação da ideia de que o comportamento elástico de um feixe de fibras é controlado por um mecanismo de flexão de fibras [53]. Esta abordagem permitiu chegar à relação da lei de potência [52] descrita na equação (5) relativa à pressão de compactação (σ_f)

$$\sigma_f = A(V_f^3 - V_{f0}^3), \quad (5)$$

Onde V_f é a fração volúmica de fibras, V_{f0} corresponde à fração volúmica de fibras inicial e A é um parâmetro relacionado com a rigidez das fibras.

2.3.2.2. Fricção entre os feixes de fibras

A fricção dos feixes de fibras também é um comportamento influente no que diz respeito à compactação, uma vez que o contacto entre os feixes de fibras impõe resistência ao movimento das mesmas [43]. Desta forma, para que um determinado material de reforço apresente alta compressibilidade é fundamental que exista espaço para que as fibras se movimentem. O melhor

exemplo que comprova este acontecimento está presente nos reforços unidirecionais, que são mais compressíveis do que os reforços bidirecionais, uma vez que neste último caso a posição das fibras induz a uma maior fricção entre os feixes de fibras, o que impõe uma maior resistência ao movimento das mesmas [54]. Já os reforços com fibras dispostas aleatoriamente apresentam uma alta compressibilidade antes da aplicação de qualquer carga no reforço. No entanto, à medida que a pressão de compactação é aplicada, o reforço torna-se cada vez menos compressível, visto que a interação entre as fibras e o número de pontos de contacto aumenta. Da mesma forma, a densidade dos fios de costura presentes na estrutura de reforços como o NCF dificulta o movimento dos feixes de fibras dado que, quanto maior for a densidade dos mesmos, menos compressível será esse material de reforço [54]. Por exemplo, o reforço NCF em fibra de carbono possui um coeficiente de fricção das fibras mais baixo relativamente à fibra de vidro, uma vez que o peso por unidade de área, bem como a densidade dos fios de costura, é inferior [50].

2.3.2.3. Fenómeno *nesting*

O *nesting* é um fenómeno citado regularmente na literatura [44], [45], [49] que acontece devido aos deslocamentos geométricos existentes entre as camadas de um determinado empilhamento de reforços fibrosos quando estas estão sob compactação. Estes deslocamentos geométricos permitem que os espaços vazios entre os feixes de fibras de uma camada superior sejam ocupados pelos feixes de fibra da camada inferior. A forma como as configurações deformadas de duas camadas adjacentes se encaixam uma na outra permite a redução da espessura média por camada em relação à espessura de uma camada individual [45]. Considerando que $2h_y$ corresponde à espessura de uma camada, e que $r_z^{nesting}$ é um fator que representa a redução de espessura resultante do *nesting*, é possível verificar, de acordo com a Figura 18, que a espessura é inferior quando ocorre o *nesting* entre as camadas do que quando não ocorre [49].

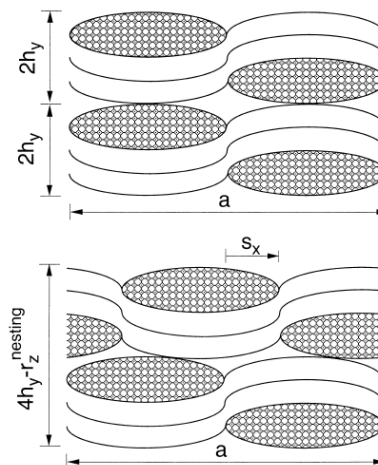


Figura 18 - Vista em corte de um empilhamento de duas camadas de reforços entrelaçados sem a ocorrência do *nesting* (em cima) e com a ocorrência do *nesting* (em baixo) [49].

A tendência para a ocorrência deste fenómeno depende da estrutura do reforço utilizado. De acordo com a Figura 19 (a), é possível verificar a maior facilidade de ocorrência do *nesting* nos reforços entrelaçados, uma vez que há mais espaço entre as camadas. Em contrapartida, para o reforço NCF não existe tanto espaço entre as camadas. No entanto, é possível reduzir a espessura do reforço devido aos fios de costura, representados a azul na Figura 19 (b), uma vez que estes conseguem penetrar nos espaços vazios existentes entre os feixes de fibras [44].

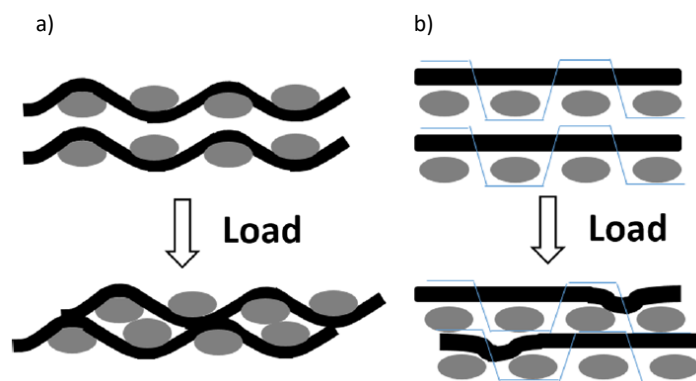


Figura 19 - Resposta do fenômeno *nesting* para (a) reforços entrelaçados e (b) para reforços NCF [44].

O coeficiente de *nesting* (γ), apresentado na equação (6), permite identificar a maior ou menor incidência do *nesting*. Essencialmente, um valor de γ superior indica que o seu efeito é menos preponderante. Desta forma, pretende-se que este coeficiente seja o mais pequeno possível para que haja uma redução de espessura mais significativa. O aumento da pressão de compactação, bem como do número de camadas, apresentam-se como alterações relevantes para o processo de compactação, uma vez que estes contribuem para a diminuição deste coeficiente [44]

$$\gamma = \frac{T_n}{T_1}, \quad (6)$$

em que T_n é a espessura de cada camada para n número de camadas e T_1 corresponde à espessura de apenas uma camada.

2.3.3. Propriedades relevantes para a compactação

Quando o reforço é sujeito a compactação, assume-se que este apresenta uma deformação não linear elástica [55]. Alguns estudos, inclusivamente, utilizaram modelos elásticos não lineares para caracterizar a deformação instalada nos reforços [56], [57]. No entanto, estes modelos não demonstram na totalidade a complexidade desta deformação, uma vez que não são analisados comportamentos viscoelásticos e a deformação permanente [58]. Como resultado da sua importância, esta secção está reservada para a análise destas duas propriedades.

2.3.3.1. Viscoelasticidade

Segundo Dinis [59], o comportamento viscoso é caracterizado por uma deformação parcialmente reversível ao longo do tempo e o comportamento elástico é caracterizado por uma deformação totalmente reversível ao longo do tempo. Os materiais com comportamento viscoso apresentam uma resposta que depende da taxa de deformação aplicada. Por exemplo, se for aplicada uma força para tentar deformar um material viscoso, este irá deformar-se gradualmente com o tempo. Quanto maior a força ou a taxa de deformação, maior será a taxa de deformação viscosa. Já o comportamento elástico pode ser observado numa mola. Quando esta é comprimida verifica-se uma deformação temporária, mas quando se remove a força aplicada, a mola regressa à sua posição original. Desta forma, o comportamento viscoelástico caracteriza-se por uma deformação que apresenta comportamentos viscosos e elásticos em simultâneo.

No âmbito da compactação de reforços, a viscoelasticidade é um fenómeno que se verifica quando se remove a carga aplicada no reforço (após a fase da compactação), uma vez que as tensões internas das fibras começam a diminuir ao longo do tempo e parte da energia armazenada nas fibras da fase de compactação é dissipada, o que leva à relaxação das fibras. Desta maneira, uma parte do reforço deformou-se permanentemente, enquanto a relaxação das fibras levou à recuperação elástica de uma parte da deformação instalada no reforço [43].

Kelly et al. [60] desenvolveram um modelo viscoelástico não linear para caracterizar deformações com e sem a impregnação de resina na fase da compactação e da relaxação das fibras. Experimentalmente, realizou-se um teste com uma velocidade de compactação baixa, de cerca de 0,035 mm/min, para obtenção de uma aproximação de compactação infinitamente lenta no qual se pretende que todos os fenómenos viscosos ocorram durante a fase compactação. Para efeitos de comparação, procedeu-se a um teste com uma velocidade de compactação rápida de cerca de 100 mm/min para a obtenção de uma aproximação de compactação infinitamente rápida no qual se pretende que todos os fenómenos viscosos ocorram depois da fase da compactação terminar (na fase da relaxação). O modelo permitiu obter curvas de compactação idênticas às obtidas experimentalmente, como se verifica na Figura 20. Estas curvas permitem verificar que [60]:

- o pico da pressão máxima aumenta em consonância com o aumento da velocidade de compactação;
- a relaxação das fibras aumenta à medida que a velocidade de compactação diminui;
- quanto maior a pressão de compactação na amostra menor será a relaxação das fibras;
- a pressão necessária para compactar a amostra dos reforços com a resina já impregnada (*Wet material*) é 40% menor do que a necessária para compactar a amostra com reforços sem resina impregnada (*Dry material*).

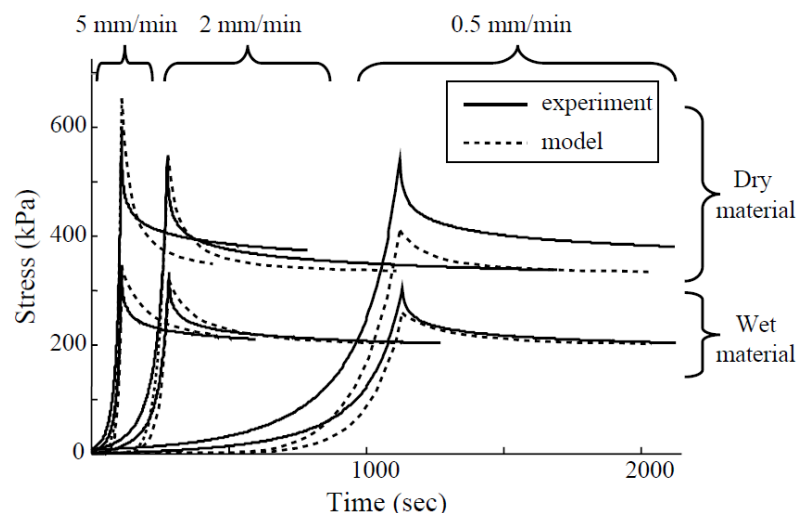


Figura 20 - Curvas de compactação e relaxação representadas no gráfico da pressão em função do tempo para diferentes velocidades de compactação [60].

2.3.3.2. Deformação permanente

A deformação permanente refere-se a uma alteração física na forma ou estrutura de um material que permanece após a remoção da carga que causou a deformação. Por outras palavras, o material

é permanentemente alterado e não pode voltar à sua forma original através da deformação elástica, que é temporária e reversível. Este tipo de deformação ocorre tipicamente quando um material é sujeito a uma força ou tensão para além do seu limite elástico, o que conduz a uma deformação plástica que resulta em alterações permanentes da sua forma, tamanho ou propriedades mecânicas [61].

Na Figura 21 está representado o ciclo de histerese para um ensaio de compactação cíclica no reforço *plain weave*, no qual o reforço é sujeito a vários ciclos de carregamento e de descarregamento até atingir uma certa fração volúmica de fibras.

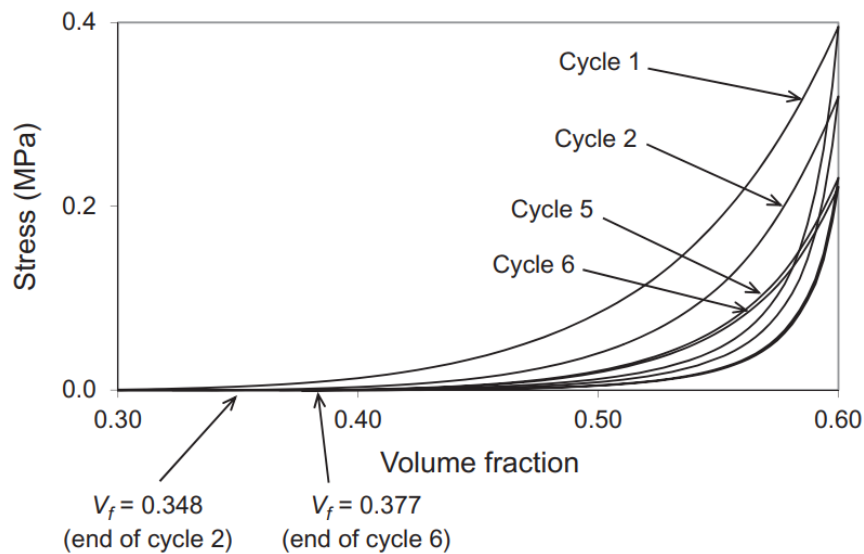


Figura 21 - Curvas de carregamento e descarregamento no reforço *plain weave* sujeito a compactação cíclica [43].

A histerese é um fenómeno diretamente relacionado com a deformação permanente, uma vez que esta ocorre quando se verifica uma diferença entre as curvas de carregamento e de descarregamento. Como tal, a diferença entre as duas curvas evidencia a presença de deformação permanente, dado que após o ciclo de carregamento uma parte da deformação instalada no reforço não retorna totalmente à sua forma original [43]. No entanto, quando as curvas ficam muito próximas umas das outras, como se verifica nos ciclos 5 e 6, a histerese diminui e é atingido um estado de equilíbrio, no qual as fibras começam a recuperar elasticamente (deixa de ocorrer deformação permanente) [44].

Por fim, a análise da deformação por fluência também pode ser interessante neste âmbito, uma vez que esta constitui uma deformação que depende do tempo, tal como a viscoelasticidade e deformação permanente. A deformação por fluência é um fenómeno que ocorre quando um material se deforma gradualmente sob a aplicação de uma tensão constante ao longo do tempo [62]. No que diz respeito à compactação, este fenómeno é pouco mencionado na literatura. No entanto, um estudo recente [63], direcionado para o desenvolvimento de um modelo viscoelástico com objetivo de prever o comportamento dos reforços sujeitos a compactação, verificou a existência de deformação por fluência quando se aplicou uma pressão de compactação constante ao reforço.

2.3.4. Estado da arte

A compactação de reforços antes da infusão da resina desempenha um papel fundamental na obtenção de um material compósito bem consolidado, de alta qualidade, com um conteúdo de vazios reduzido, escoamento da resina mais rápido e eficiente, bom controlo da espessura e defeitos minimizados [28]. Como tal, o objetivo desta secção é apresentar os estudos mais recentes e relevantes, representados na Tabela 3, e respetivas conclusões retiradas dos mesmos, de maneira a comprovar a importância do estudo da compactação de reforços.

Tabela 3 - Estudos relacionados com a compactação de reforços.

Autor	Descrição
Robitaille e Gauvin [64]	<p>Estes autores foram os primeiros a estudar a compactação em reforços de fibras. O objetivo deste estudo foi analisar a compactação e a relaxação em reforços entrelaçados (<i>plain weave</i>) e em reforços com fibras dispostas aleatoriamente (<i>random mats</i>). A partir deste estudo foi proposto o primeiro modelo desenvolvido para caracterizar a compactação. Este modelo demonstrou ser muito importante, uma vez que permitiu obter analiticamente as curvas de compactação e de relaxação através das equações (7) e (8), respetivamente</p> $v_f = AP^B, \quad (7)$ <p>em que v_f é a fração volúmica de fibras, P é a pressão de compactação, A é a fração volúmica de fibras para uma pressão de compactação de 1 Pa e B é um parâmetro do material que representam índice de rigidez</p> $\frac{P}{P_0} = 1 - Ct^{(1/D)}, \quad (8)$
Robitaille e Gauvin [65]	<p>em que P é a pressão de compactação, P_0 é a pressão inicial de compactação, t é o tempo, C é um parâmetro do material que indica a queda de pressão depois de 1 segundo e D é um parâmetro do material que indica o índice de relaxação. Este modelo permitiu obter curvas de compactação e de relaxação muito idênticas às obtidas nos ensaios experimentais para a compactação e relaxação de reforços.</p> <p>Este estudo focou-se na investigação da reorganização das fibras e do efeito da fricção provocada pelos contactos entre as fibras depois da aplicação de ciclos de compactação em reforços antes e depois da infusão da resina. As principais conclusões do estudo foram as seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A aplicação de ciclos de compactação antes da infusão da resina reduz a fração volúmica de vazios, evita o aparecimento de áreas com excesso de resina e aumenta a rigidez da peça; • A fração volúmica de fibras aumenta à medida que o número de ciclos de compactação aplicados nos reforços aumenta; • Os valores da fração volúmica de fibras aumentam significativamente nos primeiros dez ciclos de compactação; • Depois dos primeiros dez ciclos de compactação, os valores da fração volúmica de fibras tendem a estabilizar, o que permite concluir que a maior parte da reorganização e dos deslocamentos das fibras acontecem nos primeiros ciclos de compactação; • A aplicação de ciclos de compactação depois da infusão da resina permite a obtenção de melhores resultados de fração volúmica de fibras relativamente à aplicação de ciclos de compactação antes da infusão da resina. Esta diferença deve-se ao efeito da lubrificação da resina que diminui o coeficiente de fricção entre as fibras (o que permite que estas se movimentem com mais liberdade), resultando numa maior facilidade em compactar o reforço por ação do <i>nesting</i>.

Yang et al. [46]	<p>O trabalho desenvolvido consistiu na análise da influência da pressão de compactação, do tempo de compactação (tempo de aplicação de pressão constante de 1 bar), dos ciclos de compactação e do número de camadas em cinco tipos de reforços diferentes usados em condições reais do processo de infusão por vácuo. As principais conclusões do estudo foram as seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none">• A fração volúmica de fibras aumenta em função do aumento da pressão de compactação aplicada no reforço;• As maiores reduções de espessura acontecem nos primeiros 20 minutos de compactação. Isto significa que para atingir a fração volúmica de fibras desejada é necessário aplicar uma pressão constante de 1 bar no reforço durante 20 minutos, visto que depois deste tempo não existem reduções de espessura significativas;• O aumento do número de ciclos de compactação contribui para o aumento da fração volúmica de fibras. O estado de equilíbrio é atingido no 80º ciclo para os cinco reforços, o que significa que a partir deste ciclo as fibras começam a recuperar elasticamente, e deixa de ser possível reduzir mais a espessura do laminado;• O aumento do número de camadas contribui para o aumento da fração volúmica de fibras e também para o aumento da relaxação das fibras. No entanto, a diferença da fração volúmica de fibras de 10 para 100 camadas é inferior a 2,5 %, logo é possível atingir uma fração volúmica de fibras muito considerável para um empilhamento de 10 camadas.
Yenilmez et al. [47]	<p>Estes autores caracterizaram a compactação de reforços entrelaçados (<i>woven fabric</i>) no processo de infusão por vácuo em cinco etapas: (I) aplicação de uma pressão mínima (1kPa) constante, (II) compactação, (III) aplicação de uma pressão máxima (100kPa) constante, (IV) descompactação e (V) a relaxação. Foram analisados os efeitos que a taxa de compactação (dP/dt), a infusão da resina na amostra e os ciclos de compactação têm no aumento da fração volúmica de fibras. As principais conclusões do estudo foram as seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none">• O efeito da taxa de compactação (dP/dt) tem pouco efeito no aumento da fração volúmica, uma vez que os testes realizados com diferentes taxas de deformação obtiveram, sensivelmente, os mesmos resultados no que diz respeito à fração volúmica de fibras;• Tal como verificado na referência [65], observaram-se melhores resultados de fração volúmica de fibras quando se aplicaram ciclos de compactação em reforços com a resina impregnada do que em reforços sem a resina impregnada.
Li et al. [44]	<p>Este artigo pretendeu estudar a compactação em reforços NCF com o objetivo de investigar a influência do número de camadas, dos ciclos de compactação e da sequência de empilhamento. As principais conclusões do estudo foram as seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none">• O aumento do número de camadas contribui para que haja uma maior deformação do reforço devido ao fenómeno <i>nesting</i>;• Foi verificada a existência de deformação permanente nos primeiros dois ciclos de compactação. A partir do 3º ciclo, as curvas de compactação começaram a aproximar-se uma das outras evidenciando a recuperação elástica das fibras. Contudo, deve-se referir que as pressões de compactação envolvidas nestas experiências (pressão máxima a rondar os 6 bar) foram bastante superiores às verificadas no processo de infusão por vácuo;• O fenómeno <i>nesting</i> também está relacionado com a sequência de empilhamento, uma vez que a forma como a orientação das fibras está disposta pode contribuir para uma redução de espessura mais significativa devido ao maior efeito do <i>nesting</i>.

Neste estudo foi investigada a influência da estrutura dos feixes de fibras e o efeito do fenômeno do *nesting* em reforços entrelaçados, tais como o *plain weave*, *3/1 twill*, *5H sateen* e NCF quando sujeitos a compactação. As principais conclusões do estudo foram as seguintes:

Yousaf et al. [45]

- O aumento do número de camadas do laminado contribui para uma maior redução de espessura devido ao fenômeno *nesting*;
 - A resistência à deformação por flexão dos feixes de fibras depende do número de entrelaçamentos do reforço. Por exemplo, a estrutura do reforço que possui mais entrelaçamentos (*plain weave*) apresenta mais resistência à deformação por flexão do que os restantes reforços (*3/1 twill* e *5H sateen*);
 - A menor redução de espessura verificou-se no reforço *plain weave*, apesar de este apresentar uma melhor capacidade para deformar através do fenômeno *nesting*. Em contrapartida os reforços *3/1 twill* e *5H sateen* apresentaram maiores reduções de espessura, uma vez que estes oferecem menos resistência à deformação por flexão. Logo, a deformação por flexão dos feixes de fibras contribui de forma mais preponderante para a redução de espessura do laminado do que o fenômeno *nesting*;
 - Quanto maior for a densidade dos fios de costura em reforços NCF, mais fácil é a ocorrência do fenômeno *nesting*, uma vez que os feixes de fibras apresentam uma forma mais arredondada, o que contribui para o aumento do espaço entre os feixes de fibras;
 - Os valores da fração volúmica de fibras são mais elevados para o reforço NCF do que para os reforços *plain weave*, *3/1 twill* e *5H sateen*.
-

3. DESENVOLVIMENTO

O presente capítulo constitui a descrição do trabalho realizado no âmbito desta dissertação. Este capítulo é iniciado com a apresentação da empresa de acolhimento (subcapítulo 3.1). No subcapítulo 3.2 é feito um enquadramento do projeto onde está inserido este trabalho. O subcapítulo 3.3 corresponde à apresentação dos materiais e aparelhos necessários para realizar o procedimento experimental. A representação de todos os procedimentos que antecederam os ensaios experimentais encontra-se situado no subcapítulo 3.4. De seguida, é descrito o procedimento experimental de todos os ensaios realizados (subcapítulo 3.5). No subcapítulo 3.6 estão apresentados os resultados obtidos dos ensaios realizados no subcapítulo 3.5. O último subcapítulo (3.7) é o mais relevante, uma vez que este diz respeito à discussão e análise crítica dos resultados obtidos em 3.6.

3.1. Entidade acolhedora

O Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI) é um centro de interface tecnológico (CIT) dedicado ao desenvolvimento de atividades relacionadas com a investigação em diversas áreas, incluindo engenharia mecânica, engenharia de materiais, energia e ambiente, robótica e automação, entre outros. O INEGI é um instituto de referência em Portugal e tem desempenhado um papel essencial na promoção da inovação e do desenvolvimento científico e tecnológico no país [66]. A sua origem remonta ao ano de 1986, sendo o Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) os responsáveis pela sua fundação [66]. Inicialmente, as instalações do INEGI estavam localizadas em Leça do Balio, mas a procura por aumentar a ligação do INEGI à FEUP e melhorar as condições para os colaboradores fizeram com que as instalações fossem substituídas para o campus da FEUP no ano de 2008. Os arquitetos Luís Ramalho e Pedro Ramalho, em parceria com o Instituto de Engenharia Mecânica da FEUP foram os responsáveis pelo projeto das novas instalações do INEGI, representada na Figura 22 [66].



Figura 22 - Instalações do INEGI [66].

O INEGI é uma organização privada sem fins lucrativos com um estatuto de utilidade pública que conta com mais de 275 colaboradores, 135 projetos de inovação com a indústria, 736 clientes, 398 parceiros internacionais, 8 patentes, 6 empresas *spin-off* no mercado e com um volume de negócios de 14,1 milhões de euros em 2022 [66].

O INEGI conta com 6 grupos de investigação:

- Materiais e Processos de Fabrico;
- Estruturas e Sistemas Mecânicos;
- Energia, Ambiente e Sustentabilidade;
- Sistemas e Controlo Inteligentes;
- Biomecânica;
- Gestão e Engenharia Industrial.

Os serviços laboratoriais, a formação avançada e a consultoria são oferecidos de forma a responder aos variados desafios impostos em diferentes níveis de negócio. Desta maneira, o INEGI conta com alguns parceiros e também clientes, dos quais se destacam a AAPICO, ABB, ACCIONA ENERGIA, Águas do Porto, Air Liquide, AIRTRICITY, ALSTOM, Amorim Cork Composites, Amorim e Irmãos, Amtrol-Alfa e AMWM [66].

3.2. Enquadramento do projeto

Neste subcapítulo é apresentado o enquadramento geral do projeto GAVIÃO onde está inserido o estudo desta dissertação. O objetivo deste projeto é investigar e desenvolver tecnologias fora da autoclave para produção de componentes de aeronaves em grande escala [67].

O INEGI, o Instituto Nacional de Soldadura e Qualidade (ISQ) e a Optimal Structural Solutions, ilustradas na Figura 23, são as três empresas nacionais que se juntaram à Airbus com a finalidade de cumprir este objetivo do projeto [67].



Figura 23 - Logótipos das três empresas participantes no projeto GAVIÃO (retirado de [68], [66] e [69]).

A escolha do nome GAVIÃO foi intencional, uma vez que pretende representar o impacto que este projeto terá no setor aeronáutico, por meio do desenvolvimento de novas tecnologias de fabrico de estruturas aeronáuticas de grandes dimensões em materiais compósitos [67]. Este projeto vem da sequência de outro projeto com o nome “PÁSSARO”, cujo objetivo era promover conceitos de *design thinking* e realizar estudos ergonómicos para a nova geração de cockpits [70], [71].

No contexto do projeto GAVIÃO, os estudos são focados “numa secção cilíndrica da fuselagem de uma aeronave de transporte regional”, como representado na Figura 24, atualmente fabricada com recursos a ligas metálicas [72]. Com a intervenção de novos materiais e novas tecnologias de fabrico

na concepção das aeronaves, pretende-se reduzir o peso e, conseqüentemente, diminuir o consumo de combustível, bem como as emissões de CO₂. De acordo com estudos preliminares realizados pelo ISQ, a criação da secção cilíndrica da fuselagem em materiais compósitos torná-la-á 20% mais leve levando a uma redução de 30% dos gastos energéticos de fabrico [73].

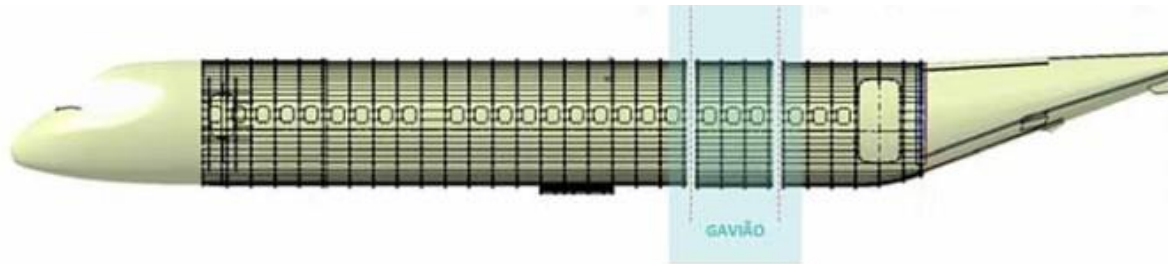


Figura 24 - Demonstração da secção cilíndrica da fuselagem onde os estudos realizados para o projeto GAVIÃO vão intervir [72].

Uma das limitações que afetam os grandes construtores de aeronaves como a Airbus está presente nos processos de fabrico utilizados com baixa cadência de produção. De maneira a ser possível dar uma resposta mais imediata às encomendas, é necessário implementar novas tecnologias de fabrico fora da autoclave. A função do INEGI neste projeto é, precisamente, investigar e otimizar processos de fabrico inovadores de maneira a combater esta limitação imposta. Paralelamente, o INEGI também está responsável pelo desenvolvimento das ferramentas necessárias de apoio aos processos de fabrico. Estes processos inovadores não só diminuem os tempos de ciclo de produção como reduzem o investimento em ferramentas e moldes, para além de serem processos mais sustentáveis e eficientes comparativamente ao processo de fabrico por cura na autoclave. O INEGI é ainda responsável por desenvolver ferramentas de *Virtual Testing* que irão suportar o projeto de componentes, realizando ensaios virtuais em detrimento de ensaios físicos [67].

3.3. Materiais necessários para o procedimento experimental

Este subcapítulo inicia com a descrição do reforço utilizado para os ensaios de compactação. De seguida, são apresentados todos os materiais e dispositivos necessários para o procedimento experimental.

3.3.1. Descrição do reforço

No âmbito do estudo e desenvolvimento do processo de infusão por vácuo do projeto GAVIÃO, selecionou-se um reforço (tecido) NCF de fibra de carbono da HEXCEL com 194 gsm. De salientar que foi assinado um "*Non-disclosure agreement*" entre o INEGI e a HEXCEL sobre este produto que é o utilizado para levar a cabo os ensaios de compactação. Segundo Lomov [50], o reforço NCF, que dispõe de excelentes propriedades mecânicas, tornou-se recentemente popular devido à sua boa permeabilidade, resistência e rigidez. O NCF é um reforço bidirecional, como se verifica na Figura 25, uma vez que os feixes de fibras estão dispostos em duas direções perpendiculares. Uma das diferenças para os reforços entrelaçados como por exemplo o *plain weave*, *3/1 twill* e *5H sateen* é a forma como os feixes de fibras ficam unidos. Nos reforços entrelaçados, a união dos feixes de fibras é estabelecida pelos próprios entrelaçamentos existentes entre estes, enquanto no reforço NCF os fios de costura são os responsáveis pela união dos feixes de fibras [45].

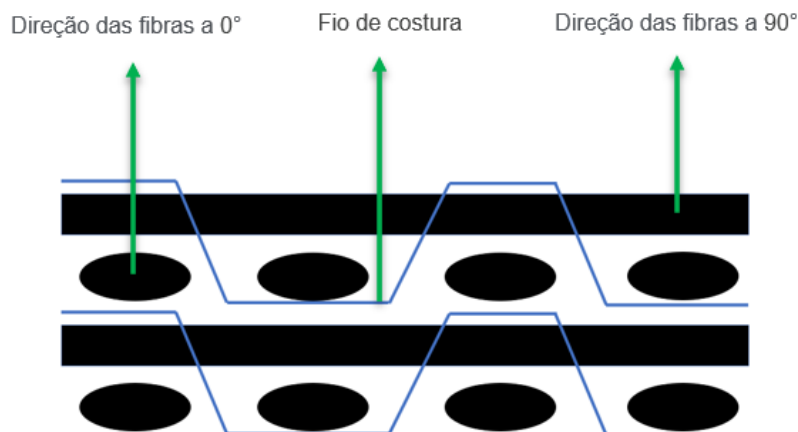


Figura 25 - Esboço da estrutura do reforço NCF (adaptado de [44]).

A estrutura deste reforço apresenta características muito interessantes no que diz respeito à resistência imposta a deformação proveniente da compactação. Como tal, o baixo coeficiente de fricção aliado à baixa rigidez das fibras à flexão permitem que, durante a compactação, os feixes de fibras tenham mais liberdade para se movimentarem, resultando assim em baixos índices de resistência à deformação [44]. Logo é possível concluir que podem ser atingidos valores de fração volúmica de fibras muito significativos em reforços NCF.

As sequências de empilhamentos utilizadas para realizar os ensaios de compactação foram definidas na tarefa do desenho preliminar dos componentes a desenvolver no projeto. A sequência de empilhamento para a espessura mínima (8 camadas) é a seguinte: $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$, enquanto que para espessura máxima (20 camadas) a sequência de empilhamento é a seguinte: $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$.

3.3.2. Materiais e aparelhos

Nesta secção são mencionados os materiais, bem como os aparelhos necessários para realizar os ensaios de compactação.

Materiais necessários:

- Reforço NCF de fibra de carbono da HEXCEL com 194 gsm;
- Resina RTM6-monocomponente da HEXCEL;
- Régua;
- Fita-cola (papel) para fazer marcações no reforço;
- Tesoura elétrica para cortar os reforços;
- Tubos para fazer a ligação da bomba de vácuo à máquina com o sistema de controlo de vácuo e, posteriormente, para o interior do molde;
- *Mould cleaner*;
- *Peel ply*;
- Saco de vácuo;
- Tesoura;
- Fita para isolamento;
- Espiral de Nylon;
- Paquímetro;

- Chapa de aço inoxidável para colocar sobre o saco de vácuo para evitar que o LVDT esteja em contacto direto com o mesmo;
- Mesa para realizar os ensaios de compactação cíclica;
- Coluna para fixar o sensor de distância;
- Estrutura feita com perfis Bosch para fixar o LVDT;
- Chaves umbrako;
- Nível.

Aparelhos necessários:

- Máquina de testes universal - Instron 5900R;
- *Software BlueHill Universal Versão 4.06;*
- Sensor de distância da série *Baumer OADM20;*
- LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*);
- Computador com o software *LabVIEW* instalado;
- Máquina de controlo de vácuo;
- Sensores de pressão;
- Bomba de vácuo;

3.4. Preparação do procedimento experimental

O objetivo desta secção é apresentar todos os procedimentos que antecederam os ensaios experimentais.

3.4.1. Ensaio quase estático

A série de procedimentos de preparação para os ensaios quase-estáticos foi a seguinte:

1. Corte das camadas de reforço;
2. Montagem das camadas com as respetivas sequências de empilhamentos;
3. Embalamento das amostras através da atribuição de um número de série a cada uma;
4. Medição da espessura inicial das amostras.

No dia da realização dos ensaios, o primeiro passo consistiu no corte das camadas com uma forma redonda com recurso ao punção e à prensa disponível no laboratório, esta última ilustrada na Figura 26. De seguida, procedeu-se ao empilhamento das camadas do reforço. Por fim, selaram-se novamente as amostras para evitar contaminação com pó ou outros resíduos.



Figura 26 - Prensa disponível no Laboratório.

A série de procedimentos desde o corte das camadas com a forma redonda até ao embalamento das mesmas está descrita na Figura 27. De referir também que foi utilizada uma escala angular fornecida pela empresa de acolhimento com as respetivas orientações, com o propósito de auxiliar o processo de empilhamento das camadas do reforço (amostras).

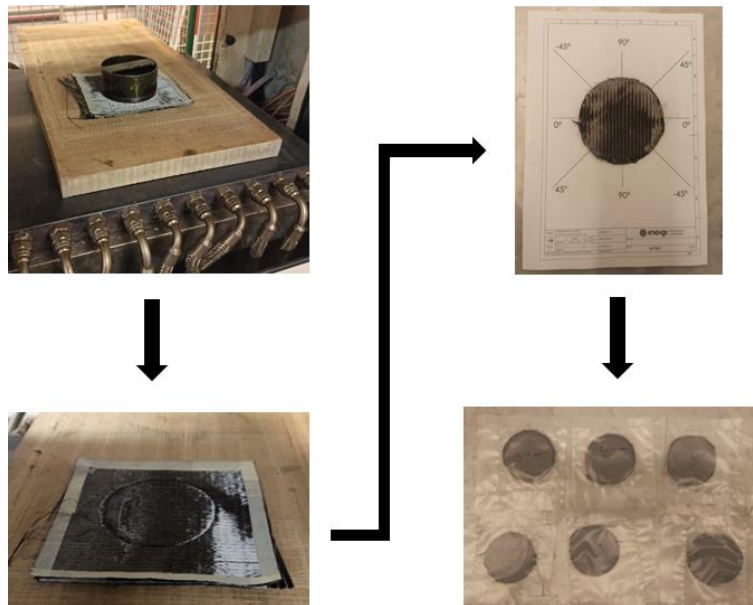


Figura 27 - Procedimentos correspondentes desde o corte das camadas com recurso ao punção até ao seu embalamento.

O último passo correspondente aos procedimentos que antecedem os ensaios quase estáticos consistiu na medição da espessura inicial de todas as amostras. Para obter estas medições recorreu-se a um sensor de distância da série *Baumer OADM20*.

O sensor de distância da série *Baumer OADM20*, representado na Figura 28, é designado como um sensor fotoelétrico, logo as medições foram efetuadas através de um método ótico sem contacto. O aparelho é composto por dois elementos principais, nomeadamente a fonte de luz e o recetor. A fonte é responsável pelo envio de um sinal laser sob a forma de um ponto com diâmetro de 0,4 mm. A função do recetor é ler estes sinais que são refletidos pelo feixe. É com base nestes impulsos recebidos que são obtidos os valores das medições pretendidas [74].

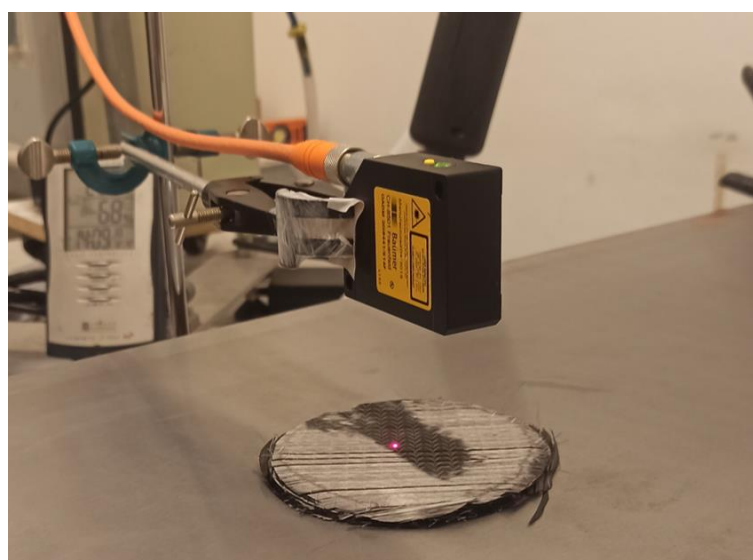


Figura 28 - Sensor de distância da série Baumer OADM20.

Para adquirir a maior precisão possível na leitura dos valores, é muito importante que o aparelho não seja deslocado durante o processo de medição, para que os valores das medições não fiquem comprometidos. Para o registo dos valores da espessura inicial das amostras evidenciados na Tabela 4 foi utilizado o *software LabVIEW*.

Tabela 4 - Espessura inicial das amostras.

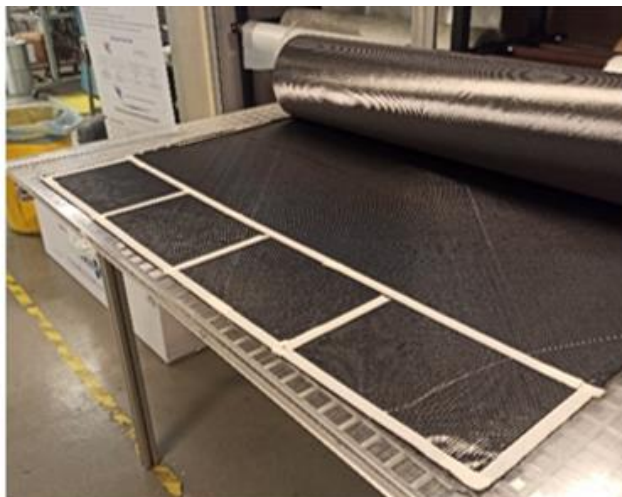
AMOSTRA	8 CAMADAS	20 CAMADAS
#1	2,603 mm	6,043 mm
#2	2,671 mm	6,058 mm
#3	2,965 mm	6,780 mm

3.4.2. Ensaio de compactação cíclica

A primeira tarefa de preparação dos ensaios de compactação cíclica a realizar consiste no corte das camadas do reforço, pelo que se torna necessário começar por definir as dimensões das mesmas. As dimensões das camadas (300 mm × 200 mm) foram escolhidas de maneira a garantir a representatividade do sistema testado face ao tipo de peças produzidas no projeto em que este estudo está inserido.

Com as dimensões do empilhamento definidas, procedeu-se às devidas marcações no reforço, como é passível de ser verificado na Figura 29 a). Para que fosse possível realizar esta tarefa foi necessário ter à disposição a mesa de trabalho, a fita-cola e a régua ilustradas na Figura 29 b).

a)



b)



Figura 29 - a) Marcações realizadas no reforço com o auxílio da régua e da fita-cola e b) Fita-cola, régua e tesoura elétrica.

Depois de concluídas todas as marcações no reforço utilizou-se a tesoura elétrica, também ilustrada na Figura 29 b), para proceder ao corte do reforço. Com todas as camadas do reforço necessárias cortadas procedeu-se, de seguida, aos empilhamentos dos laminados (as sequências de empilhamentos para a espessura mínima e máxima estão descritas no subcapítulo 3.3.1). Por fim, foram seladas e identificadas todas as amostras, como retratado na Figura 30, para evitar a contaminação das mesmas. Outro motivo pelo qual se realizou este procedimento foi a impossibilidade de efetuar os ensaios no mesmo dia em que se realizaram estas tarefas.

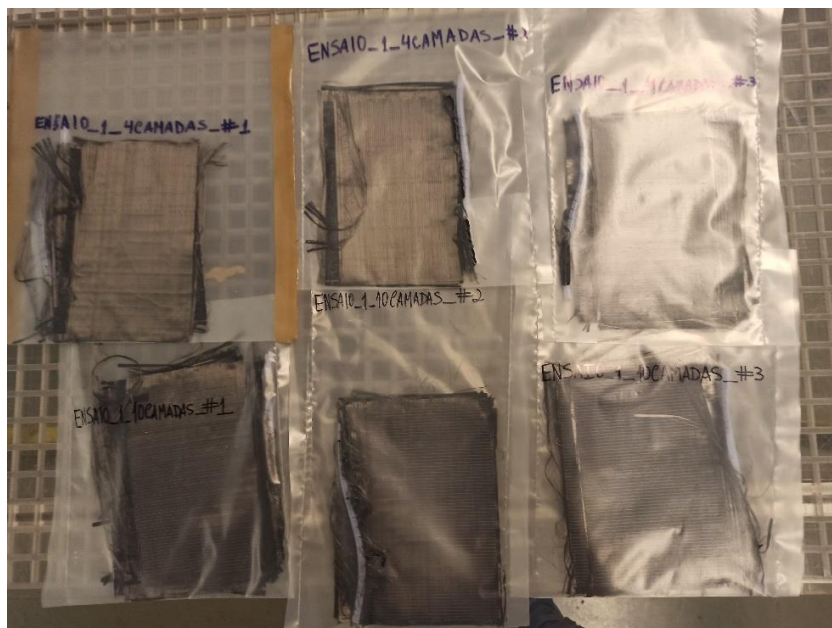


Figura 30 - Amostras seladas e devidamente identificadas.

No dia da realização dos ensaios, foi necessário, primeiramente, preparar todos os dispositivos e todos os materiais necessários e proceder à montagem do *setup*. Deste modo, o primeiro procedimento a realizar foi a aplicação de *mould cleaner* na mesa, representada na Figura 31, onde foram realizados os ensaios com a finalidade de retirar todos os resíduos de desmoldante que restaram de outros ensaios realizados na mesma. Com isto, foi possível obter uma boa adesão da fita de isolamento e evitar sujidade na superfície da mesa que poderia, eventualmente, comprometer os resultados dos ensaios, uma vez que havia a possibilidade de existir fugas de ar no interior do molde.

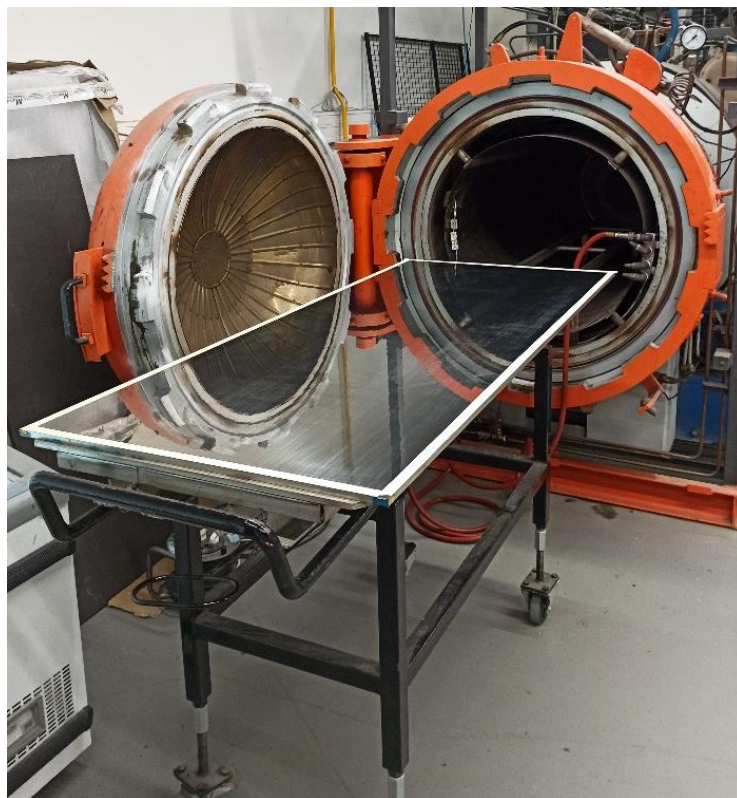


Figura 31 - Mesa onde foram realizados os ensaios de compactação cíclica.

A seguir procedeu-se à montagem dos tubos de ligação da bomba de vácuo, representada na Figura 32, à máquina de controlo de vácuo e, posteriormente, para o interior do molde. Para evitar fugas de ar, os tubos foram isolados com uma fita.

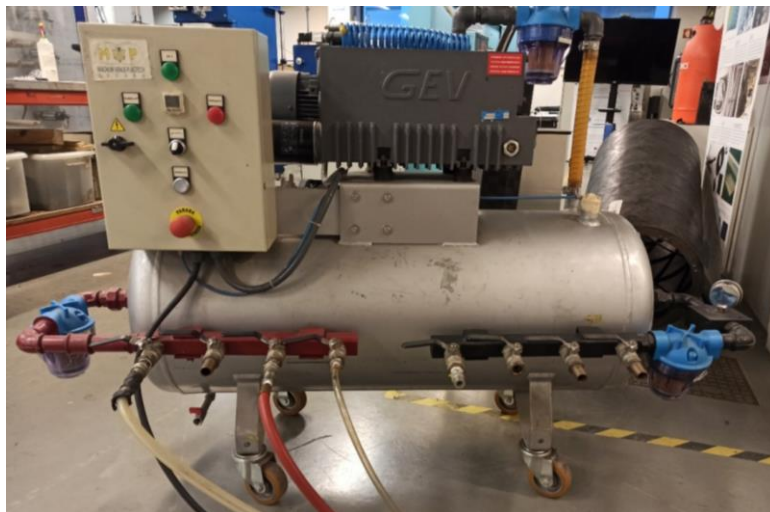


Figura 32 - Bomba de vácuo.

Através da utilização da máquina de controlo de vácuo (Figura 33), configurada pelos colaboradores da automação da empresa foi possível obter as funções dos gráficos da pressão em função do tempo descritas no subcapítulo 3.5.2. A pressão negativa (pressão de vácuo) precedente da máquina foi transferida, subseqüentemente, para o interior do molde.

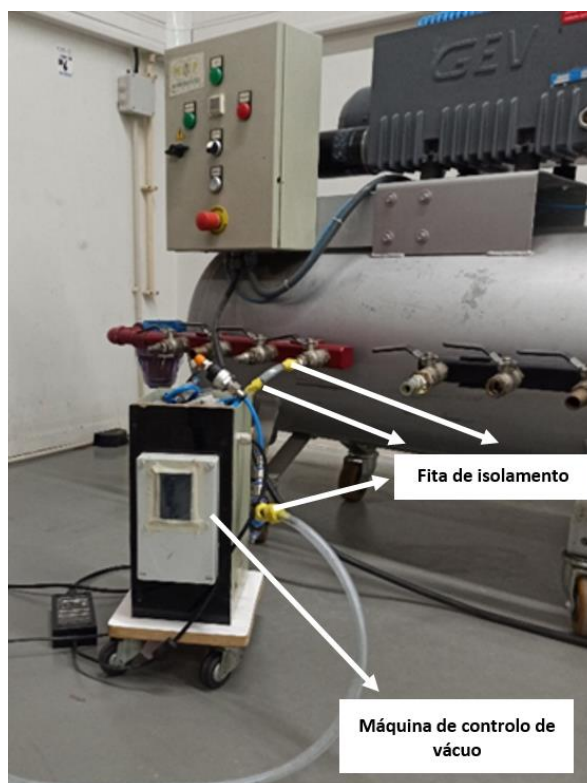


Figura 33 - Máquina de controlo de vácuo.

De seguida, utilizou-se fita cola para fixar o tubo proveniente da máquina de controlo de vácuo, bem como o *peel ply* que ficou em baixo da espiral para evitar riscar a mesa. Por fim, colocou-se a amostra em cima da mesa, como se observa na Figura 34.

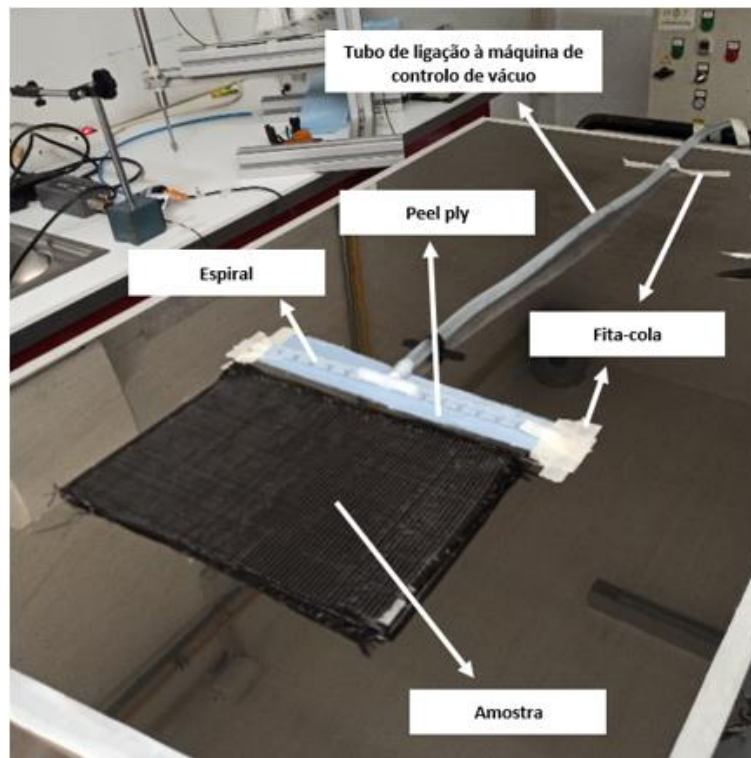


Figura 34 - Colocação da amostra em cima da mesa.

O procedimento seguinte consistiu na preparação do saco de vácuo. O primeiro passo para realizar este procedimento envolveu o corte do material do saco de vácuo. Posteriormente, aplicou-se a esquadria através da colocação da fita de isolamento no material do saco de vácuo, como se verifica na Figura 35. As dimensões do saco de vácuo foram superiores às da amostra, uma vez que se pretendia que o saco de vácuo cobrisse toda a área onde estava inserida a amostra. É importante referir que foi necessário pressionar a região, na qual foi aplicada a fita de isolamento para assegurar que esta estava bem colada ao material do saco de vácuo, de maneira a evitar fugas de ar. Paralelamente, foi preciso ter especial atenção para não dobrar o material do saco de vácuo durante a aplicação da fita de isolamento. De realçar que todos estes procedimentos foram sempre realizados com a maior precisão possível para todos os ensaios.



Figura 35 - Saco de vácuo.

O procedimento subsequente à realização dos sacos de vácuo, consistiu na aplicação dos mesmos na mesa, como se verifica na Figura 36. À semelhança do que se verificou relativamente à preparação do saco de vácuo também foi necessário pressionar todas as regiões com fita de isolamento para evitar possíveis fugas de ar.



Figura 36 - Aplicação do saco de vácuo na mesa.

De seguida procedeu-se à fixação dos aparelhos (LVDT e o sensor de distância) responsáveis pela determinação dos valores de espessura das amostras ao longo dos ensaios. O ideal era possuir três aparelhos para efetuar as medições (um no centro e um em cada extremo da amostra), mas a empresa acolhedora apenas tinha disponível um LVDT e um sensor de distância.

Para garantir a fixação do LVDT, ilustrado na Figura 37, foi necessário recorrer à montagem de uma estrutura com perfis Bosch, retratada na Figura 38. Quando se realizou a montagem desta estrutura identificaram-se algumas incertezas que poderiam comprometer a precisão da leitura dos valores das medições, tais como o desnível e a existência de folgas entre os perfis. Como tal, para tentar eliminar ou pelo menos mitigar estas incertezas foi necessário aplicar um aperto adicional a todos os componentes de ligação dos perfis.



Figura 37 - LVDT.

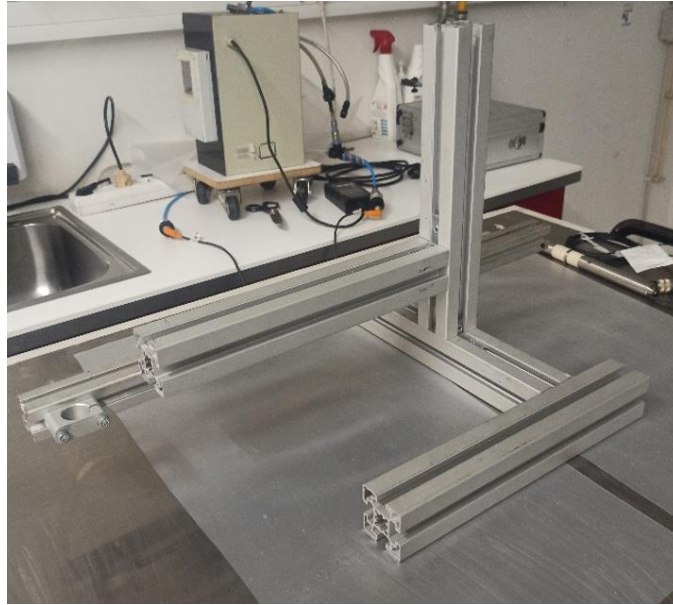


Figura 38 - Estrutura feita com perfis Bosch para fixação do LVDT.

O sensor de distância também deve estar bem posicionado e fixado pelas mesmas razões apresentadas para o LVDT. Portanto, a coluna, representada na Figura 39, ficou responsável pela fixação do sensor de distância.



Figura 39 - Coluna para fixar o sensor de distância.

De acordo com as dimensões das amostras considerou-se um bom compromisso a utilização de um aparelho em cada extremidade da amostra para obter uma melhor percepção dos valores da espessura ao longo de toda a amostra. Como tal, o passo seguinte consistiu no posicionamento do LVDT e do sensor de distância na amostra. De referir que para posicionar os dois aparelhos foi preciso ter especial atenção para não danificar o saco de vácuo.

No caso do LVDT foi necessário colocar uma chapa lisa com as arestas limadas sobre o saco de vácuo para que o LVDT não estivesse em contacto direto com este. De notar que, para obter os valores da espessura da amostra, foi necessário subtrair o valor da espessura desta chapa e o valor da espessura do saco de vácuo ao valor da espessura total lida pelo LVDT.

Para o sensor de distância foi utilizada fita-cola no saco de vácuo, na zona onde o sinal laser sob a forma de um ponto ia atuar. A finalidade da aplicação da fita-cola no saco de vácuo advém de uma melhor adaptação face ao saco e à amostra, isto porque a geometria das amostras é inconstante. Por exemplo, se a fita-cola não estivesse aplicada quando fosse aplicado o vácuo no interior do molde, o sensor de distância poderia estar a medir a espessura de um feixe de fibras mais saliente, o que resultaria numa medição menos precisa. À semelhança do que se sucedeu para o LVDT, tornou-se necessário subtrair os valores da espessura da fita-cola e do saco de vácuo ao valor total lido pelo sensor de distância para obter, exatamente, a espessura da amostra.

O posicionamento da chapa e da fita-cola no saco de vácuo também foi definido estrategicamente. Desta maneira, para haver coerência nas medições foi necessário garantir que ambos estavam centrados relativamente à largura da amostra e, de seguida, alinhados entre eles, como é passível de ser verificado na Figura 40.

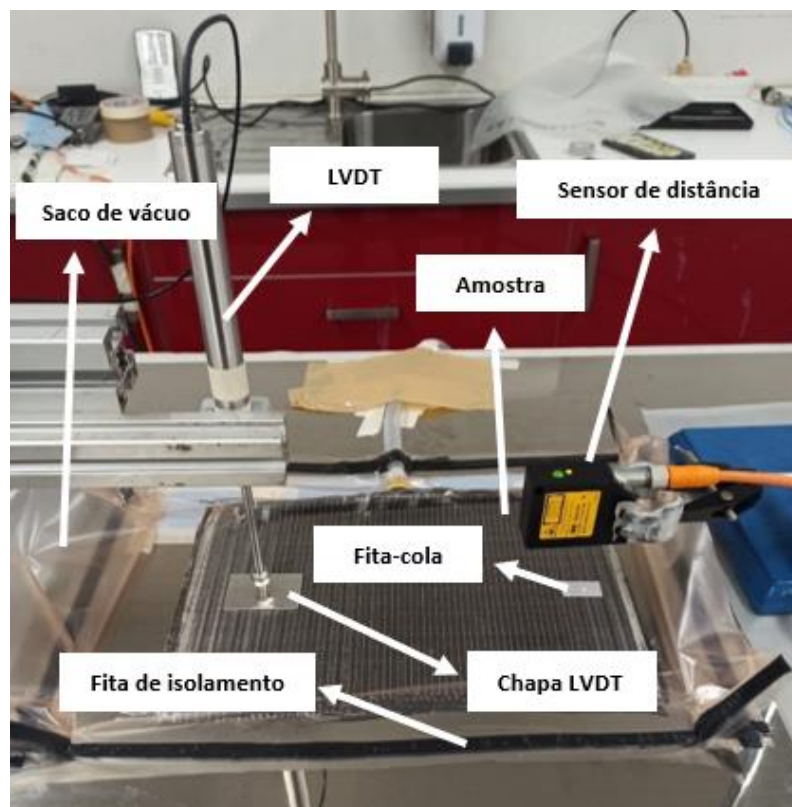


Figura 40 - Posicionamento da placa e da fita-cola sobre o saco de vácuo e amostra.

Os valores da espessura obtidos pelo LVDT e pelo sensor de distância foram transmitidos para o *software LabVIEW* através da placa de aquisição de dados, representada na Figura 41 a). Por sua vez, a esta placa estavam ligados o LVDT, o sensor de distância e um sensor de pressão. O sensor de pressão está anexado à máquina de controlo de vácuo, como se verifica na Figura 41 b).

a)



b)



Figura 41 - a) Placa de aquisição de dados e b) Sensor de pressão.

Na Figura 42 e na Figura 43 estão ilustrados de forma representativa os valores das medições no *software LabVIEW* à medida que os ensaios foram decorrendo. Desta forma foi possível começar a monitorizar os valores da espessura medidos pelo LVDT e pelo sensor de distância, bem como os valores da pressão ao longo de todos os ensaios.

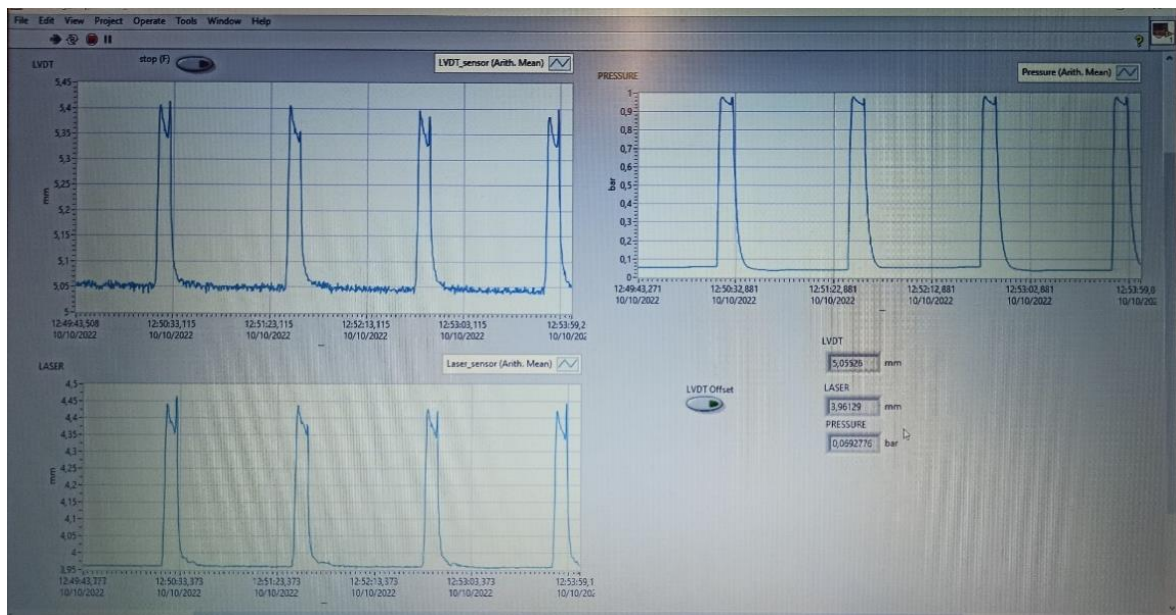


Figura 42 - *Software LabVIEW*.

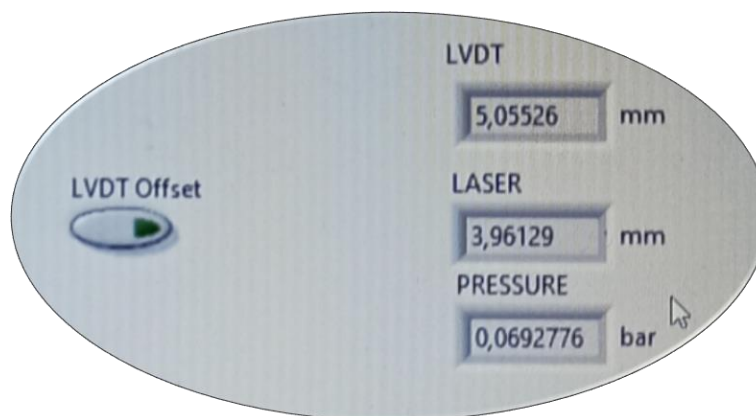


Figura 43 - Imagem ampliada da leitura dos valores obtidos através do *software LabVIEW*.

Posto isto, o *setup* completo para a realização de todos os ensaios de compactação cíclica encontra-se ilustrado na Figura 44.



Figura 44 - Setup completo para um ensaio de compactação cíclica.

3.4.3. Fabrico de laminados para extração de provetes

Para realizar o ensaio de queima é necessário extrair provetes de laminados produzidos através do processo de infusão por vácuo. Como tal, esta secção é responsável pela apresentação dos procedimentos relativos ao fabrico dos mesmos. O processo de infusão por vácuo é composto por várias etapas. O primeiro passo para a realização da infusão por vácuo consistiu na limpeza e preparação do molde. Para este efeito foi aplicado o *mould cleaner*, ilustrado na Figura 45 e, de seguida, *mould release agent*. O primeiro tem a função de limpar o molde, enquanto o segundo facilita a extração da peça quando o processo de infusão por vácuo estiver finalizado.

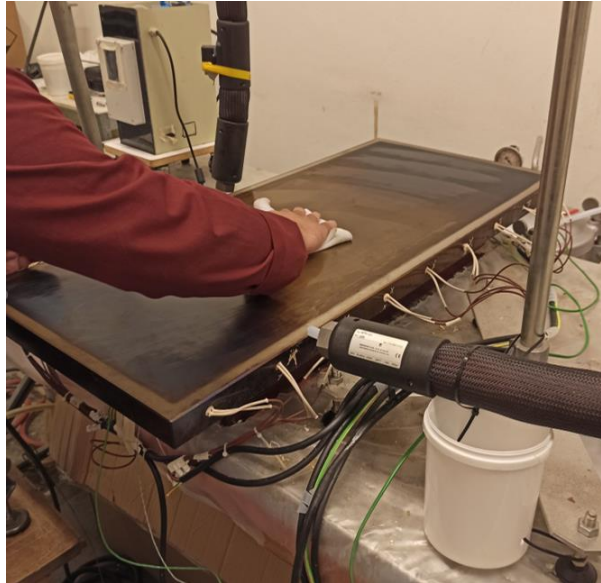


Figura 45 - Aplicação do *mould cleaner*.

Posteriormente, procedeu-se à preparação dos tecidos técnicos, que consistiu no corte de uma camada de *peel ply* e de outra camada de *flow enhanced medium (flow mesh)*. A função do *peel ply*, representado na Figura 46, é idêntica à do *mould release agent*, enquanto a utilização do *flow enhanced medium* tem o objetivo de facilitar o escoamento da resina e, conseqüentemente, diminuir o tempo de impregnação da resina.



Figura 46 - Corte do *peel ply*.

O passo seguinte consistiu em colocar os reforços com a respetiva sequência de empilhamento em cima do molde, como representado na Figura 47. A sequência de empilhamento e o número de camadas (vinte camadas) estão evidenciados em 3.3.1. Por cima dos reforços foram aplicadas as camadas de *peel ply* e de *flow enhanced medium*, respetivamente.



Figura 47 - Colocação dos reforços em cima do molde.

A seguir aplicaram-se as espirais ligadas aos tubos responsáveis pela introdução da resina e da pressão negativa (pressão de vácuo) para o interior do molde. Posto isto, procedeu-se à montagem do saco de uma forma muito idêntica à apresentada no subcapítulo 3.4.2 (ensaios de compactação cíclica). De referir que as espirais têm de ficar colocadas na direção do comprimento da amostra para que a frente de fluxo da resina decorra na direção de menor comprimento (na direção da largura da amostra), tal como está evidenciado na Figura 48.

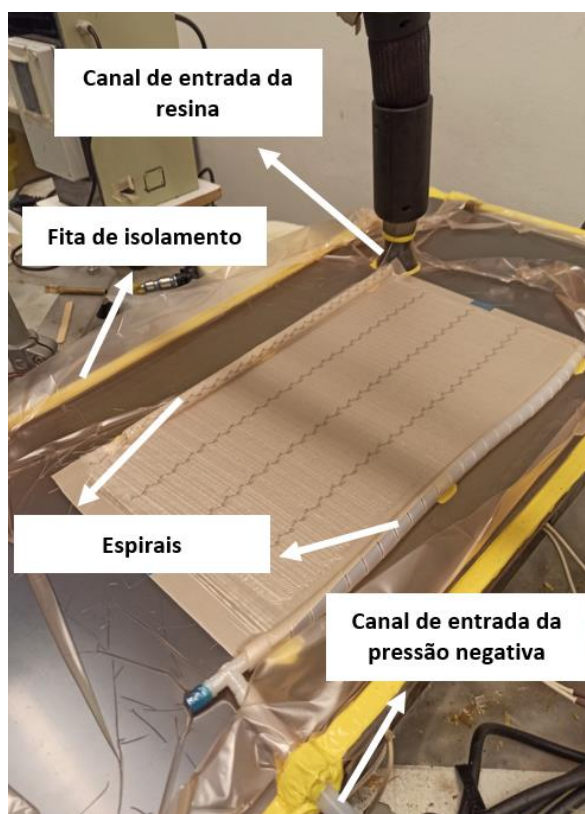


Figura 48 - Setup completo da infusão.

Antes de iniciar o processo de infusão foi, ainda, necessário realizar uma série de procedimentos, tais como o teste de fugas, os ciclos de compactação aplicados antes da infusão e a degaseificação da resina. É importante realizar sempre o teste de fugas para evitar a possível entrada de ar no interior do molde. Os ciclos de compactação foram realizados com vista a um aumento da fração

volúmica de fibras antes da infusão. A degaseificação da resina apresenta-se relevante já que minimiza as bolhas de ar.

Depois de todos estes procedimentos estarem realizados iniciou-se o processo da infusão por vácuo. Na Figura 49, está evidenciado o progresso da frente de fluxo da resina ao longo da amostra. Na parte final da infusão foi realizada a cura da resina, que consiste num aumento controlado da temperatura até ser atingida a temperatura de cura da resina (de acordo com o especificado na ficha técnica da resina em questão).

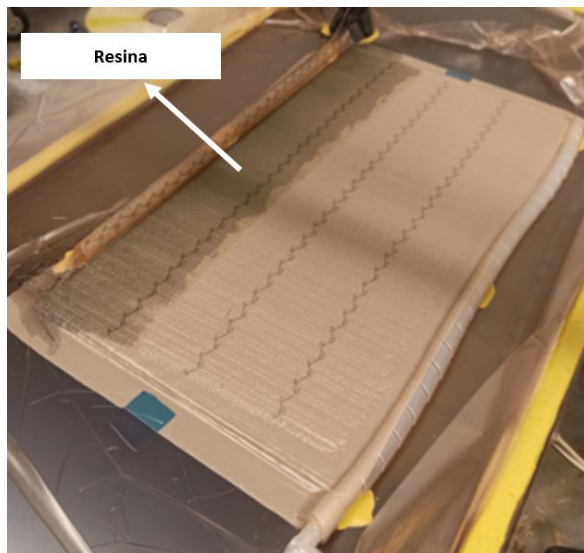


Figura 49 - Progresso da posição da frente de fluxo da resina.

Por fim, fabricaram-se dois laminados com e sem a aplicação de ciclos de compactação antes da infusão, cujo objetivo do seu fabrico está descrito em 3.6.3.

3.5. Procedimento experimental

Esta secção pretende dar a conhecer a metodologia utilizada em todos os ensaios realizados, nos quais são descritos ao pormenor todos os procedimentos experimentais.

3.5.1. Ensaio quase estático

O primeiro ensaio de compactação realizado no procedimento experimental foi o ensaio quase-estático. O objetivo deste ensaio foi avaliar o comportamento do material face à compactação de uma forma quase-estática. Com este ensaio pretende-se obter as curvas de compactação da pressão em função do tempo e descobrir o tempo ótimo de relaxação da força (*settling time*) para os ensaios de compactação cíclica dentro das curvas analisadas. Para ter uma visão mais ampla dos acontecimentos verificados nas experiências, achou-se razoável realizar três ensaios quase-estáticos para a espessura mínima e máxima, que correspondem ao empilhamento de oito e vinte camadas, respetivamente. As sequências de empilhamentos dos laminados de oito e vinte camadas estão descritas em 3.3.1.

Para cumprir este objetivo foi necessário ter à disposição uma máquina de testes universal designada por Instron 5900, representada na Figura 50, que é conhecida por apresentar uma elevada precisão na realização de vários ensaios mecânicos. Estas máquinas de testes universal são

capazes de realizar uma ampla gama de ensaios, incluindo ensaios de tração, compressão, flexão e de corte em diversos materiais como metais, plásticos, materiais compósitos, etc.



Figura 50 - Representação da Instron 5900.

Características da Instron 5900 [75]:

- Compatível com o software *Bluehill Universal Versão 4.06*;
- Capacidade mínima -> 0,5 kN;
- Capacidade máxima -> 600 kN;
- Velocidade de compactação mínima -> 0,0001 mm/min;
- Velocidade de compactação máxima -> 3000 mm/min.

Para dar início aos ensaios foi necessário definir alguns parâmetros tais como a velocidade de compactação e a carga máxima da célula de carga, bem como o diâmetro das amostras e a pressão máxima a ser efetuada nas mesmas. O diâmetro das amostras foi definido consoante as dimensões do punção e da amarra onde estas foram colocadas. Já a carga máxima da célula de carga foi definida de acordo com um ensaio semelhante realizado por Somashekar et al. [55]. A velocidade de compactação foi estabelecida de acordo com a metodologia experimental apresentada por Yousaf et al. [45] e segundo a norma ASTM D3039 para ensaios de tração, dado esta velocidade ser adequada para ensaios quase-estáticos.

Parâmetros:

- Carga máxima da célula de carga -> 200 kN;
- Velocidade de compactação -> 1 mm/min;
- $P_{Máx.} = 1 \text{ bar} = 0,1 \text{ MPa}$;
- $D_{Amostras} = 99 \text{ mm}$;
- $F_{Máx.} = 0,1 \times [(\pi \times 99^2) / 4] = 770 \text{ N}$.

O *software*, associado à Instron 5900, utilizado para a extração de resultados foi o *BlueHill Universal Versão 4.06*, como se verifica na Figura 51.

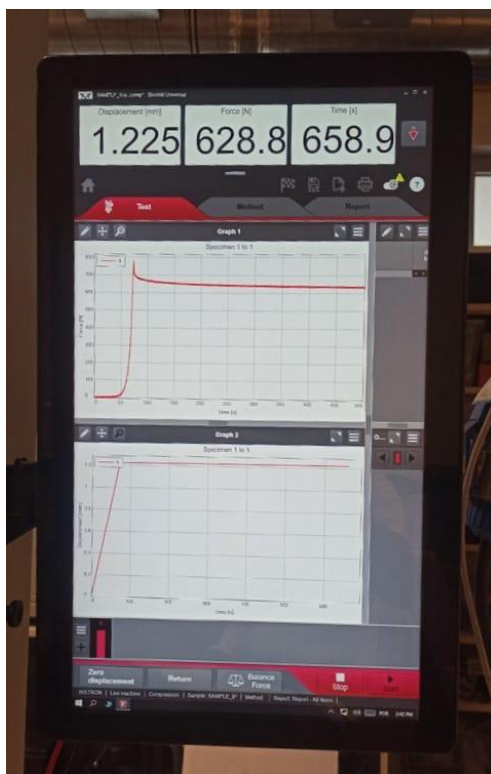
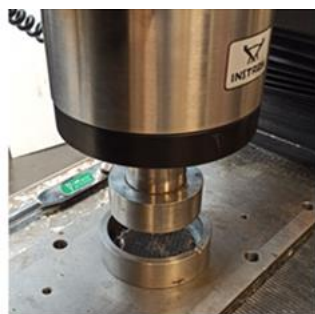


Figura 51 - Representação do software *BlueHill Universal Versão 4.06*.

Os ensaios quase-estáticos consistiram, essencialmente, na aplicação de uma força de compactação nas amostras até ser atingida a força máxima de 770 N. Depois de atingir a força máxima, a célula de carga foi imobilizada, enquanto se continuavam a registar os valores da força. Na Figura 52 está representado o processo de aplicação da carga na amostra, no qual é possível identificar a posição inicial e final da célula de carga.

a)



b)



Figura 52 - Representação da aplicação da carga na amostra a) para a posição inicial e b) posição final da célula de carga.

3.5.2. Ensaio de compactação cíclica

Os objetivos principais da realização deste ensaio consistem na obtenção das curvas da espessura em função do número de ciclos, a determinação do formato da curva de compactação mais adequado e a determinação do número de ciclos de compactação ótimo. Para cumprir estes objetivos, monitorizou-se a espessura do empilhamento à medida que se aplicavam os ciclos de compactação. Esta abordagem permitiu descobrir os ganhos de fração volúmica de fibras e da espessura para três testes ou três tipos de funções diferentes. No entanto, estes resultados são mencionados ao pormenor no subcapítulo 3.6.2.

Como dito anteriormente, os ensaios de compactação são divididos em três testes com diferentes funções (pressão de compactação em função do tempo) ou formatos da curva de compactação tanto para a espessura mínima como para a espessura máxima. Como tal, o primeiro passo consistiu na definição dos tipos de funções de compactação da pressão em função do tempo.

No primeiro teste, o formato definido para a curva é um perfil sinusoidal com um período de noventa segundos para uma pressão máxima de 1 bar, como ilustrado na Figura 53. Dada a ausência de informação na literatura relativamente ao período da função, optou-se por usar os noventa segundos, uma vez que este já tinha sido utilizado em projetos anteriores da empresa de acolhimento, dado ser o período mínimo em que a máquina de controlo de vácuo consegue garantir estabilidade da curva de pressão.

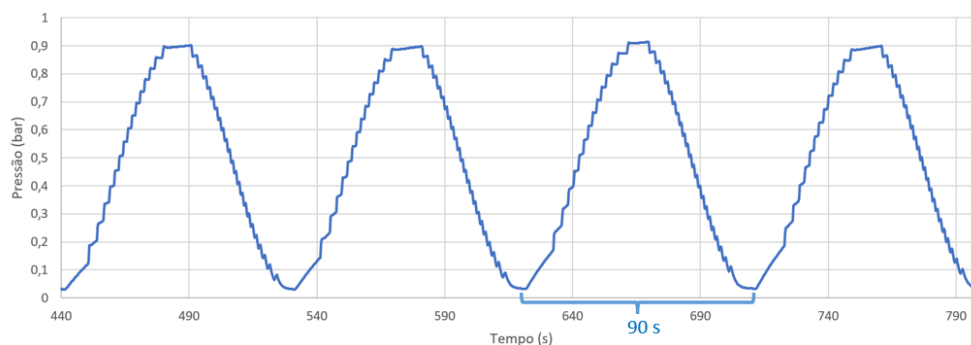


Figura 53 - Função sinusoidal com um período de noventa segundos.

Com o objetivo de verificar melhorias de resultados no que diz respeito à fração volúmica de fibras estudou-se outro tipo de função ou formato da curva de compactação. A função ou o formato da curva definido para o segundo e terceiro teste é um perfil trapezoidal como um período de noventa segundos (Figura 54) e para um período de sessenta e oito segundos (Figura 55), respetivamente. Em ambos os testes é aplicada uma pressão máxima de 1 bar.

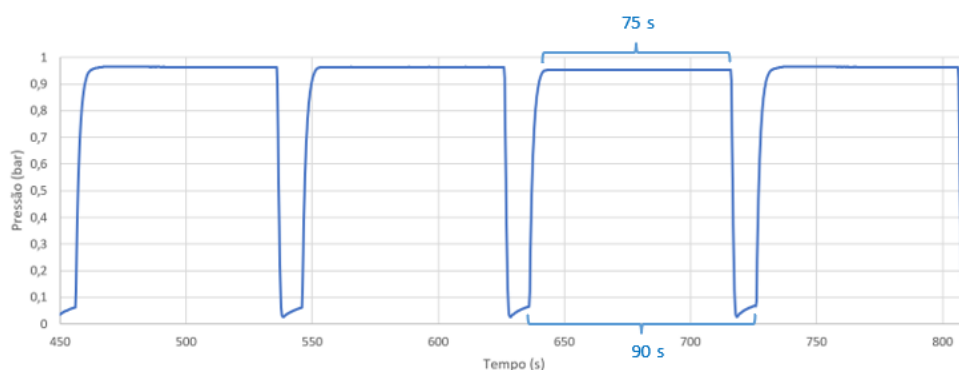


Figura 54 - Função trapezoidal com um período de noventa segundos.

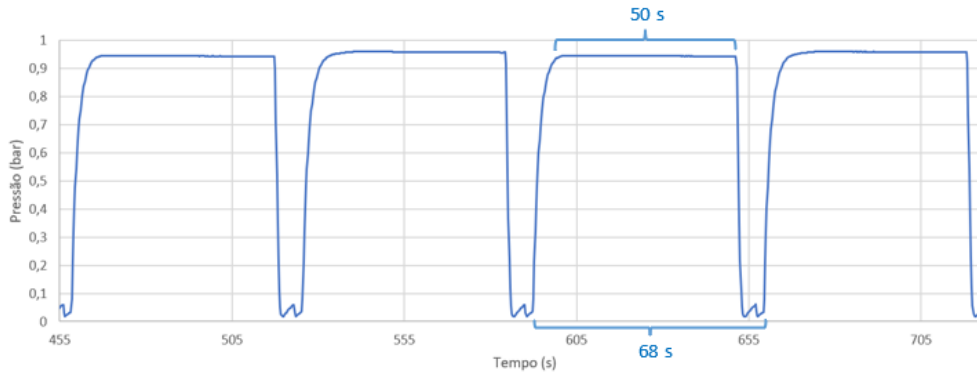


Figura 55 - Função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos.

O objetivo de analisar uma função diferente, mas com o mesmo período foi identificar se, de facto, com esta nova função implementada se obtém melhores resultados de fração volúmica de fibras do que a função sinusoidal. O período da função implementada para o terceiro teste (com um período de sessenta e oito segundos) foi escolhido consoante o resultado do tempo ótimo de relaxação da pressão para os ensaios quase-estáticos (subcapítulo 3.6.1).

Yenilmez et al. [47] também recorreram a uma função do género das apresentadas nas Figura 54 e Figura 55 para analisar as várias fases do processo de infusão por vácuo, tal como está evidenciado na Figura 56.

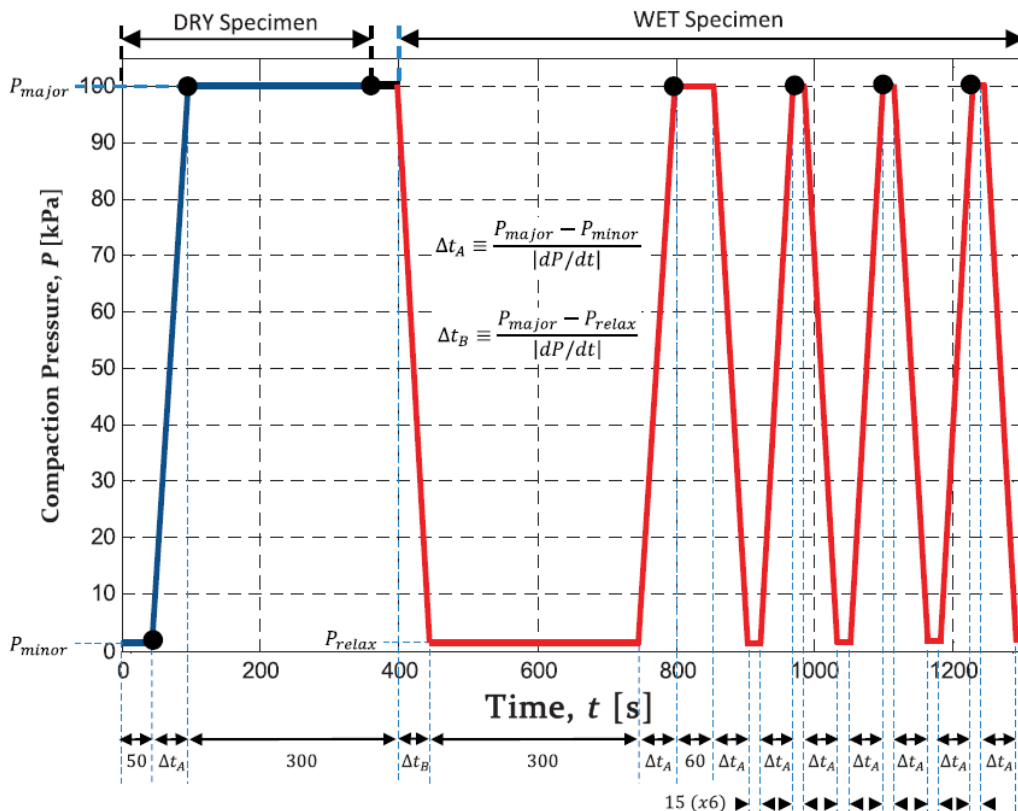


Figura 56 - Função trapezoidal utilizada por Yenilmez et al. [47].

Neste procedimento experimental foram realizados sete ensaios com diferentes parâmetros do processo. Face ao procedimento experimental apresentado nesta dissertação foram identificadas algumas diferenças presentes na Tabela 5.

Tabela 5 - Diferenças verificadas no procedimento experimental entre Yenilmez et al. [47] e a presente dissertação.

Procedimento experimental	
Yenilmez et al. [47]	Presente dissertação
A resina é introduzida no interior do molde ainda durante o primeiro ciclo de compactação.	Não foi aplicada resina no interior do molde
O período de cada onda da função é variável	O período das ondas para cada tipo de função foi sempre constante
Aplicação de apenas 4 ciclos de compactação	Aplicação de 100 ciclos de compactação
Foram estudados os efeitos que a taxa de compactação (dp/dt), a infusão da resina na amostra e os ciclos de compactação têm no aumento da fração volúmica de fibras.	Foi estudada a variação das funções do gráfico da pressão em função do tempo, bem como a variação do período da função (em diferentes ensaios).

3.5.3. Ensaio de queima

Depois de fabricar os dois laminados (com e sem a aplicação dos ciclos de compactação) produzidos através do processo de infusão por vácuo, recorreu-se ao ensaio de queima, realizado em concordância com o procedimento G presente na norma ASTM D 3171, para determinar a fração volúmica de fibras destes.

Para realizar o ensaio de queima foi necessário cortar vários provetes do laminado. Como tal, achou-se razoável retirar provetes das extremidades e do centro de cada um dos laminados, conforme ilustrado na representação esquemática presente na Figura 57.

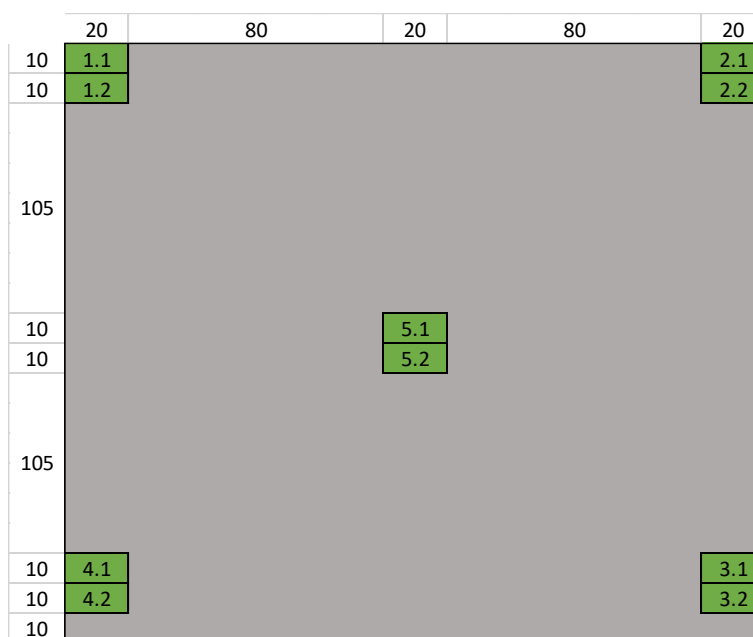


Figura 57 - Representação esquemática da localização dos provetes retirados do laminado.

O primeiro passo para a realização deste ensaio foi determinar o peso inicial de todos os provetes. De seguida, os provetes foram colocados no interior da mufla, como representado na Figura 58, nos quais foi aplicada uma temperatura suficiente para queimar totalmente a matriz (resina RTM6-monocomponente) para que restassem apenas as fibras. Por fim, para determinar a fração volúmica de fibras pesaram-se os provetes após a queima e efetuou-se a comparação com o peso inicial das mesmas.



Figura 58 - Provetes colocados no interior da mufla.

3.6. Resultados e análise experimental

Este subcapítulo está direcionado para a apresentação dos resultados obtidos experimentalmente, bem como para a análise crítica dos mesmos. Nos primeiros dois subcapítulos são apresentados os resultados obtidos nos dois ensaios de compactação realizados. De seguida, é efetuada uma comparação dos resultados da fração volúmica de fibras com e sem a aplicação dos ciclos de compactação em laminados obtidos através do processo de infusão por vácuo.

3.6.1. Resultados para o ensaio quase estático

Os resultados obtidos dos ensaios quase-estáticos através do *software BlueHill Universal Versão 4.06*, permitiram atingir os seguintes gráficos da força e do deslocamento em função do tempo.

Na Figura 59 estão representados o gráfico da força e do deslocamento das amostras em função do tempo de ensaio para a amostra #1 de vinte camadas.

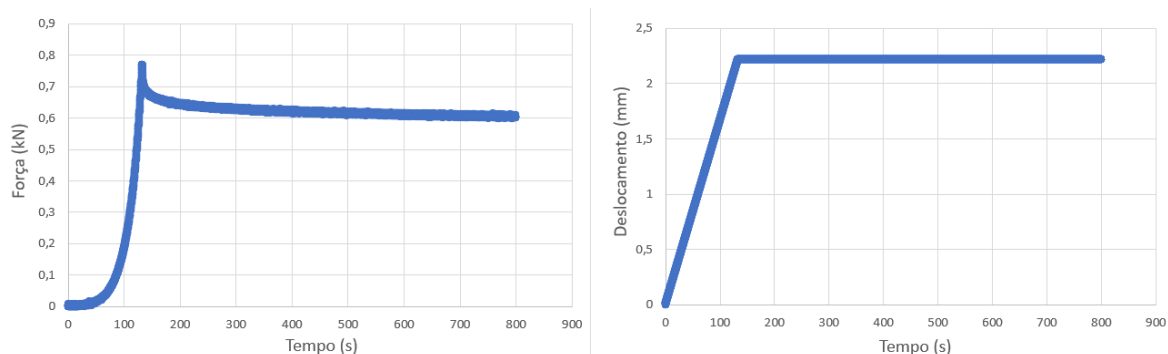


Figura 59 - Gráficos da força e do deslocamento em função do tempo de ensaio para a amostra #1 de vinte camadas.

Com o conhecimento da espessura inicial das amostras, evidenciada em 3.4.1, e o quanto estas se deslocaram até ser atingida a força máxima foi possível determinar a espessura final das amostras. Assim sendo, na Tabela 6 estão indicados os valores dos deslocamentos das amostras até atingir a força máxima.

Tabela 6 - Deslocamento das amostras até atingir a força máxima.

AMOSTRA	8 CAMADAS	20 CAMADAS
#1	1,2245 mm	2,2162 mm
#2	1,2634 mm	2,1235 mm
#3	1,5146 mm	2,8922 mm

Com os valores da espessura inicial das amostras (Tabela 4) e com os valores dos deslocamentos das amostras até atingir a força máxima (Tabela 6) é possível determinar os valores da espessura final das amostras, como se pode observar na Tabela 7.

Tabela 7 - Espessura final das amostras.

AMOSTRA	8 CAMADAS	20 CAMADAS
#1	$2,603 - 1,2245 = 1,3785$ mm	$6,043 - 2,2162 = 3,8268$ mm
#2	$2,671 - 1,2634 = 1,4076$ mm	$6,058 - 2,1235 = 3,9345$ mm
#3	$2,965 - 1,5146 = 1,4504$ mm	$6,78 - 2,8922 = 3,8878$ mm

Posto isto, seguiu-se a análise dos dados obtidos para todos os ensaios. O que foi feito em primeiro lugar foi a sobreposição dos gráficos da força em função do tempo para as três amostras de oito camadas e depois para vinte camadas. O propósito de realizar esta tarefa foi verificar se existia uma disparidade significativa entre os resultados obtidos dos ensaios correspondentes a cada tipo de empilhamento. Como se pode verificar em ambos os gráficos, representados na Figura 60 e na Figura 61, os resultados obtidos são idênticos para cada tipo de empilhamento. No entanto é importante referir que o ensaio correspondente à amostra #1 para o empilhamento de oito camadas (Ensaio_1_EMP_8) foi iniciado, mas devido a um erro experimental teve de ser repetido. Portanto os resultados, ilustrados na Figura 60, relativos a este ensaio correspondem à repetição do mesmo. De notar que já tinha sido aplicada uma certa força na amostra em questão na primeira tentativa de realização do ensaio (antes da repetição do ensaio), por isso o facto dos resultados desta amostra serem ligeiramente dispares em relação aos ensaios realizados para as outras amostras possivelmente estará relacionado com este motivo.

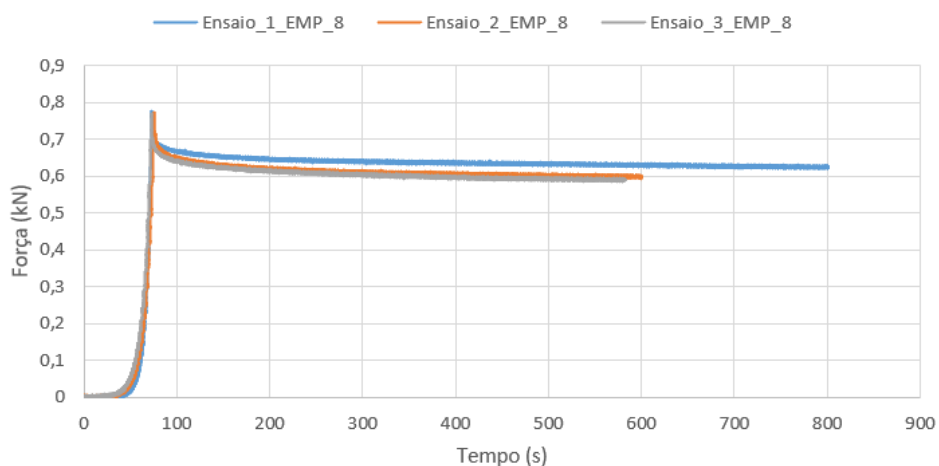


Figura 60 - Sobreposição dos gráficos dos três ensaios para o empilhamento de oito camadas.

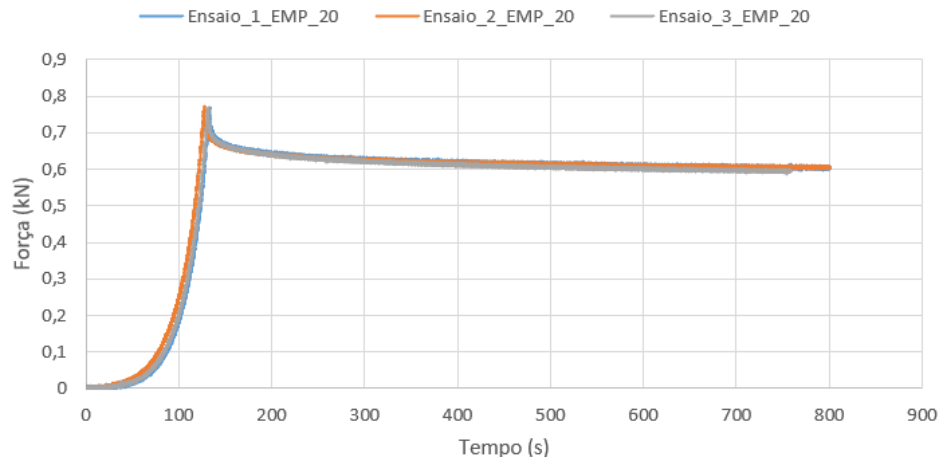


Figura 61 - Sobreposição dos gráficos dos três ensaios para o empilhamento de vinte camadas.

Na procura de descobrir qual seria o tempo ótimo de relaxação da força (*settling time*) para os ensaios de compactação cíclica, estudou-se apenas os dados desde a força máxima até ao último valor de força medido, como se verifica na Figura 62. Para realizar esta análise fez-se a média e o desvio padrão dos valores da força para os três ensaios correspondentes a cada tipo de empilhamento. O desvio padrão obtido nos ensaios de oito e vinte camadas não ultrapassaram os 3% e os 2%, respetivamente. Estes resultados apresentam-se bastante satisfatórios na medida em que os valores do desvio padrão obtidos para ambos os ensaios são bastante reduzidos. Depois procedeu-se a uma interpolação, para todos os valores de F' ao longo da curva de relaxação com a finalidade de descobrir, efetivamente, qual seria o tempo ótimo de relaxação da força aplicada.

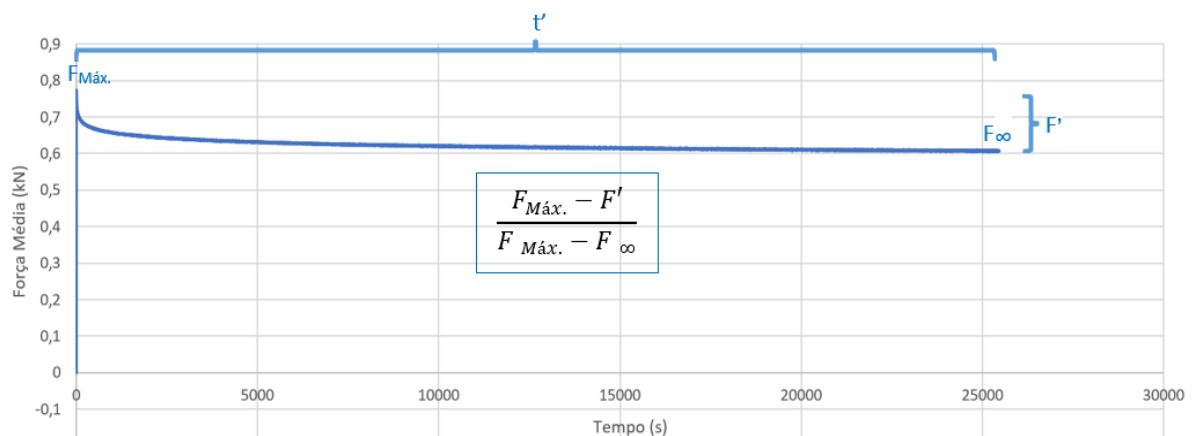


Figura 62 - Gráfico representativo da força média em função do tempo para obtenção do tempo ótimo de relaxação da força aplicada.

A partir destes testes, foi alcançada uma relaxação da força de cerca de 80% da força máxima para os ensaios com o empilhamento de oito e vinte camadas após cinquenta segundos. No tempo restante a relaxação da força foi considerada residual. Por esta razão, este foi um parâmetro escolhido para a realização dos ensaios de compactação cíclica tendo em conta a relação custo/benefício entre o tempo de ciclo de compactação e o nível de relaxação do reforço. Na Figura 63 está representado o tempo ótimo de relaxação num gráfico de pressão em função do tempo para um ensaio de compactação cíclica.

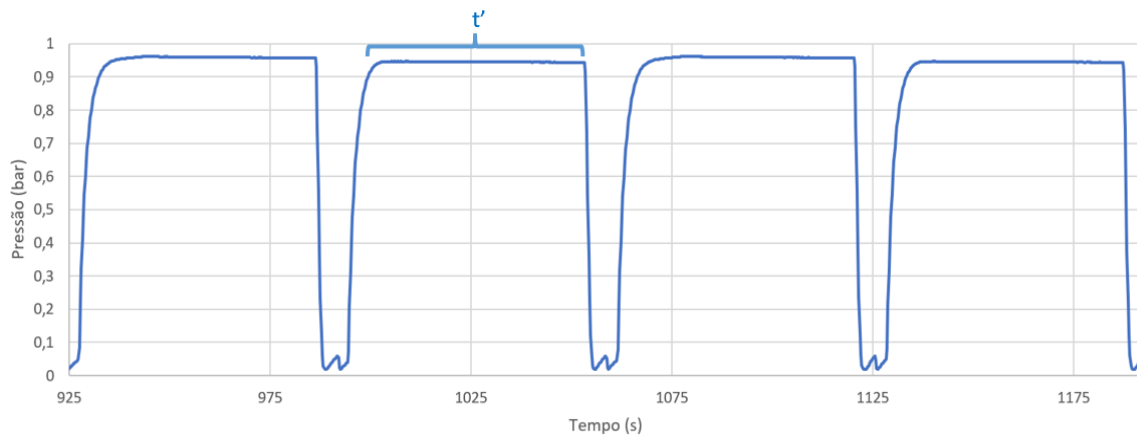


Figura 63 - Gráfico da pressão em função do tempo para um ensaio de compactação cíclica.

3.6.2. Resultados para ensaio de compactação cíclica

Depois de finalizados todos os ensaios de compactação cíclica, o procedimento seguinte passou pelo tratamento dos dados obtidos. As variáveis associadas a estes ensaios foram: o tipo de função ou formato da curva de compactação, o tempo que demora cada ciclo (período da função), o número de ciclos de compactação e a espessura do empilhamento (para oito e vinte camadas). Os pontos essenciais que se intencionaram adquirir desta análise de dados foram o ganho da fração volumica de fibras e o ganho da espessura.

Para estes ensaios realizaram-se cem ciclos de compactação e fez-se um estudo dos valores da espessura dos empilhamentos de dez em dez ciclos. Como tal, a representação dos gráficos da espessura do empilhamento em função do número de ciclos de compactação para todos os ensaios beneficia a interpretação e comparação dos dados. Na Figura 64 está representado apenas o gráfico relativo à função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos para o empilhamento de vinte camadas. No entanto, verificou-se em todos os ensaios, sem exceção, que a aplicação de ciclos de compactação nos reforços diminui, efetivamente, a espessura do empilhamento.

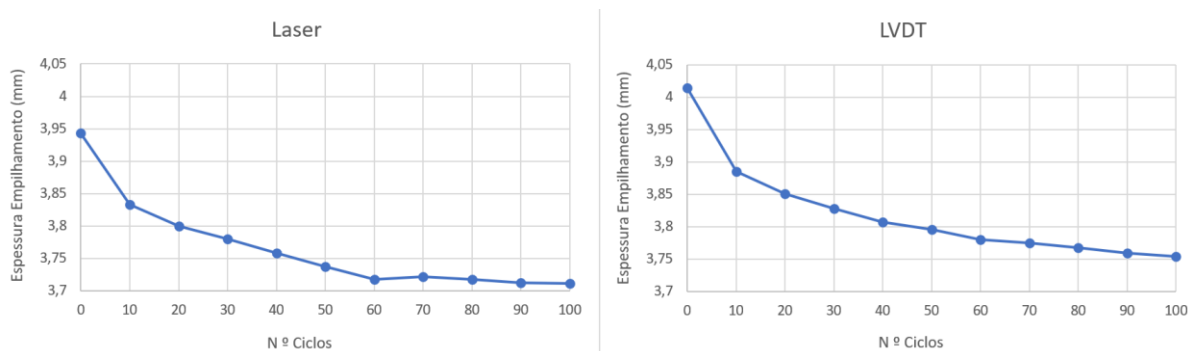
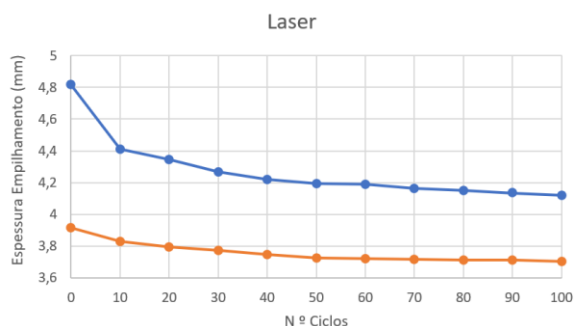


Figura 64 - Gráfico representativo da espessura do empilhamento em função do nº de ciclos de um ensaio com a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos e com um empilhamento de vinte camadas.

Todavia, analisaram-se os valores máximos e mínimos da espessura para cada ciclo estudado. De referir que a diferença nas medições entre o LVDT e o sensor de distância (laser) é mínima (0,05 mm) e, portanto, desprezada. A partir dos gráficos presentes na Figura 65 verificou-se que até ao 50º ciclo de compactação, aproximadamente, a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo da espessura do empilhamento diminuiu. Contudo, depois do 50º ciclo de compactação a diferença entre os valores máximos e mínimos da espessura do empilhamento foi constante (diferenças

pouco significativas entre os valores). A conclusão que se retira desta análise é que o estado de equilíbrio é atingido a partir do 50º ciclo de compactação.

a)



b)

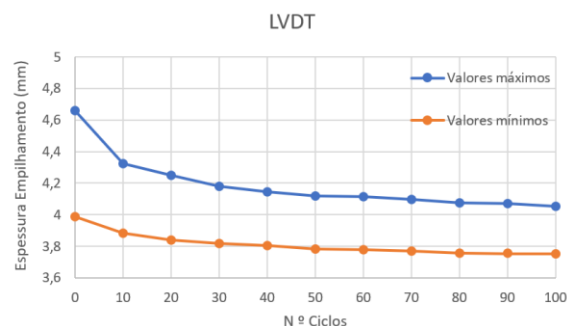


Figura 65 - Gráficos representativos dos valores máximos e mínimos da espessura medidos a) pelo sensor de distância (laser) e b) pelo LVDT para cada ciclo.

De seguida, são apresentados os gráficos dos ganhos médios de espessura e de fração volúmica de fibras obtidos através das medições do LVDT e do sensor de distância para cada ciclo em função do número de ciclos de compactação estudados.

Para a função sinusoidal com um período de noventa segundos é importante realçar que para os três ensaios de vinte camadas surgiu uma contrariedade na leitura (o software *LabVIEW* não fez a leitura das medições) dos valores obtidos no LVDT. Portanto os valores das medições para estes ensaios foram, única e exclusivamente, obtidos pelo sensor de distância. Para os três ensaios realizados para o empilhamento de oito camadas, ao fim dos cem ciclos de compactação verificaram-se ganhos de espessura na ordem dos 8%, aproximadamente, enquanto para o empilhamento de vinte camadas obtiveram-se ganhos de espessura situados na ordem dos 5/6%, como se verifica na Figura 66. Os resultados foram muito idênticos para o ganho de fração volúmica, como consta na Figura 67. No entanto, os valores obtidos para o empilhamento de vinte camadas foram significativamente divergentes em relação ao empilhamento de oito camadas. Desta maneira, o facto de apenas terem sido analisados os valores das medições do sensor de distância poderá ter tido influência nos resultados.

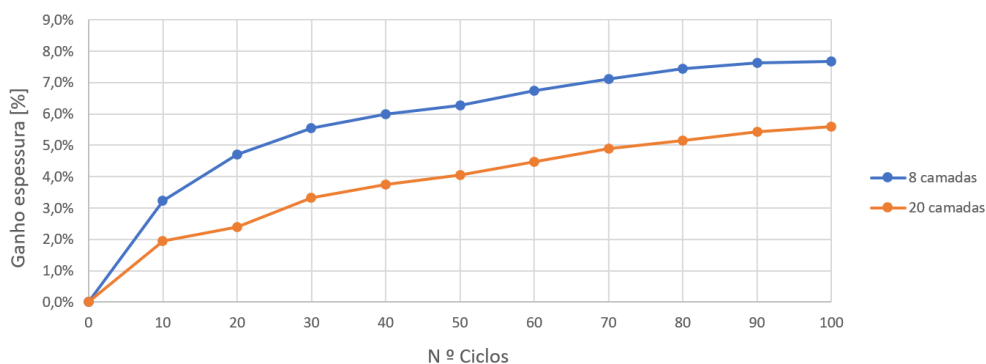


Figura 66 - Gráfico do ganho de espessura em função do nº de ciclos de compactação para a função sinusoidal.

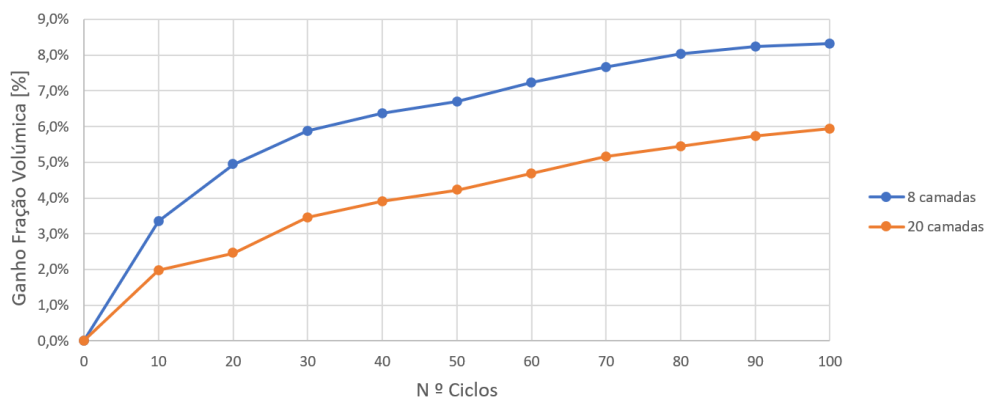


Figura 67 - Gráfico do ganho de fração volúmica de fibras em função do nº de ciclos de compactação para a função sinusoidal.

Nos ensaios realizados para a função trapezoidal com um período de noventa segundos observou-se a mesma incongruência verificada no ensaio da função sinusoidal no que diz respeito aos valores medidos para o LVDT para o empilhamento de vinte camadas. Para além disto, apenas foram realizados sessenta ciclos de compactação neste ensaio devido a um erro experimental. Tal como ilustrado na Figura 68 e na Figura 69 foram analisados sessenta ciclos de compactação para todos os ensaios. Ao contrário do verificado para a função sinusoidal, os valores dos ganhos obtidos para ambos os empilhamentos foram sempre semelhantes ao longo dos sessenta ciclos. No entanto, os resultados para o empilhamento de oito camadas foram ligeiramente melhores.

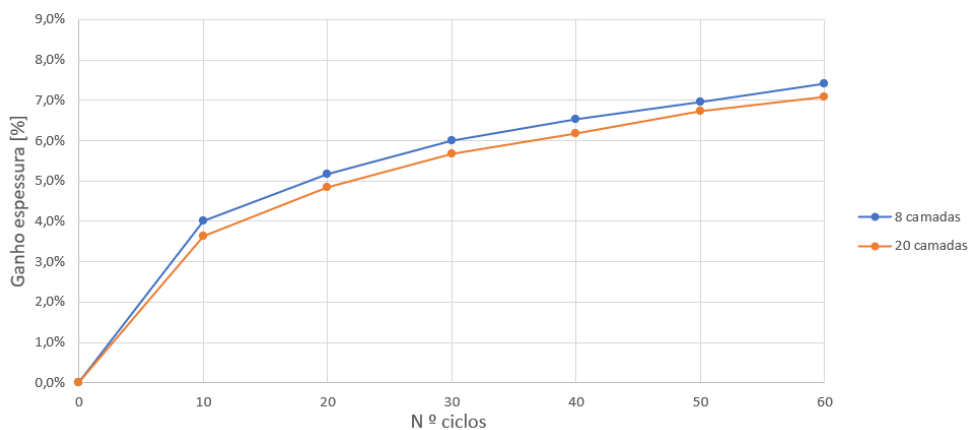


Figura 68 - Gráfico do ganho de espessura em função do nº de ciclos de compactação para a função trapezoidal com um período de noventa segundos.

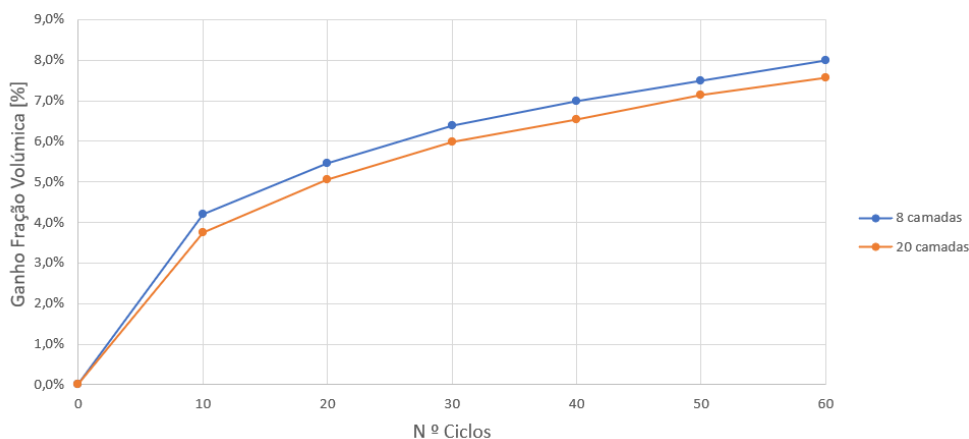


Figura 69 - Gráfico do ganho de fração volúmica de fibras em função do nº de ciclos de compactação para a função trapezoidal com um período de noventa segundos.

Pela primeira vez, para a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos, verificaram-se ganhos de espessura e de fração volúmica de fibras maiores para o empilhamento de vinte camadas, como se verifica na Figura 70 e na Figura 71. No entanto, estes ganhos foram muito similares para os dois tipos de empilhamentos durante todos os ciclos estudados.

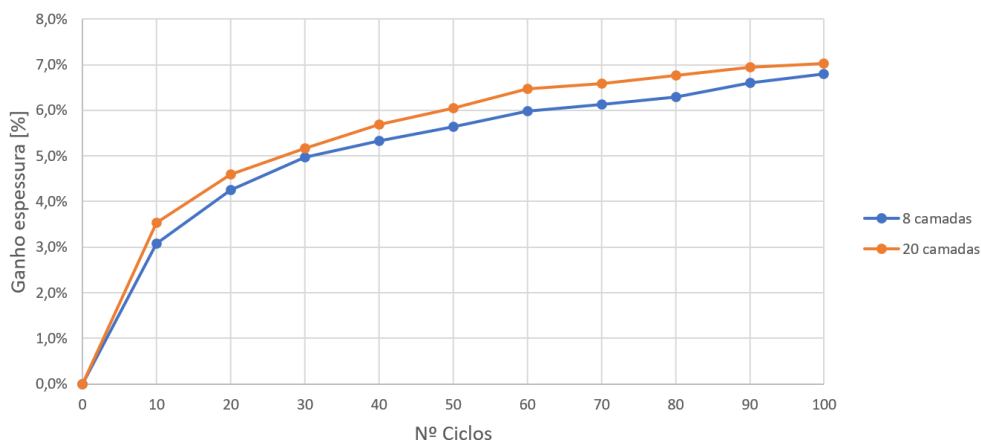


Figura 70 - Gráfico do ganho de espessura em função do nº de ciclos de compactação para a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos.

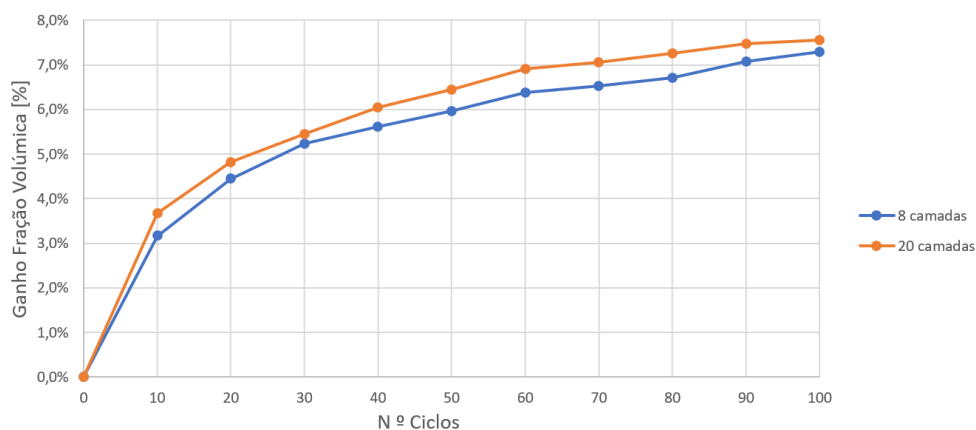


Figura 71 - Gráfico do ganho de fração volúmica de fibras em função do nº de ciclos de compactação para a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos.

Em todos os gráficos apresentados observou-se que:

- Os maiores ganhos de fração volúmica de fibras e de espessura estão presentes nos primeiros dez ciclos de compactação;
- Os ganhos de fração volúmica de fibras e de espessura têm tendência para serem cada vez menores à medida que os ciclos de compactação se sucedem.

De seguida é apresentada uma análise com base nos resultados dos três tipos de funções para o mesmo número de ciclos de compactação e para o mesmo tempo de ensaio. Inicialmente são analisados os ganhos para o mesmo número de ciclos de compactação. Para os primeiros dez ciclos de compactação relativos ao empilhamento de oito camadas (Tabela 8) obtiveram-se maiores ganhos para a função trapezoidal com um período de noventa segundos. Apesar de os ganhos verificados para as outras duas funções terem sido muito idênticos, o ensaio onde se verificaram os menores ganhos foi para a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos. Relativamente aos ensaios realizados para o empilhamento de vinte camadas, verificaram-se ganhos similares para as duas funções trapezoidais havendo uma ligeira supremacia para a função

com um período de noventa segundos. Porém, foi possível observar que os ganhos para a função sinusoidal se apresentaram significativamente baixos quando comparados com os obtidos para as outras funções. Apesar de os resultados terem sido menos benéficos para a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos é de bom tom referir que para esta função apenas foram necessários cerca de onze minutos para realizar dez ciclos de compactação, enquanto para as outras duas funções foram necessários aproximadamente quinze minutos. Quanto às duas funções trapezoidais, para o empilhamento de oito camadas verificou-se uma diferença nos ganhos próxima de 1%, enquanto para o empilhamento de vinte camadas a diferença foi de apenas 0,1%.

Tabela 8 - Valores dos ganhos para dez ciclos de compactação.

10 CICLOS	8 CAMADAS		20 CAMADAS		TEMPO MÉDIO
	Ganhos (%)				
	Espessura	Fração volúmica de fibras	Espessura	Fração volúmica de fibras	
FUNÇÃO SINUSOIDAL	3,243%	3,358%	1,949%	1,988%	00:15:03
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 90 S	4,024%	4,196%	3,641%	3,758%	00:14:59
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 68 S	3,069%	3,168%	3,535%	3,667%	00:10:46

Para a análise para trinta ciclos de compactação (Tabela 9) foi possível verificar, novamente, ganhos superiores para a função trapezoidal de noventa segundos para ambos os empilhamentos. Para além disto, também foi possível verificar que se obtiveram maiores ganhos para a função sinusoidal relativamente à função trapezoidal com período de sessenta e oito segundos para o empilhamento de oito camadas. Em contrapartida, foi observado o oposto para o empilhamento de vinte camadas no qual os maiores ganhos estiveram presentes para a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos. No entanto, a diferença entre os ganhos obtidos para as duas funções trapezoidais foi novamente maior para o empilhamento de oito camadas (cerca de 1%). Para o empilhamento de vinte camadas a diferença entre os ganhos já foi maior do que para a análise feita para os dez ciclos (cerca de 0,5%). É necessário mencionar que a diferença entre os tempos de ensaios para a função sinusoidal e trapezoidal com um período de noventa segundos relativamente à função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos aumentou de quatro para catorze minutos.

Tabela 9 - Valores dos ganhos para trinta ciclos de compactação.

30 CICLOS	8 CAMADAS		20 CAMADAS		TEMPO MÉDIO
	Ganhos (%)				
	Espessura	Fração volúmica de fibras	Espessura	Fração volúmica de fibras	
FUNÇÃO SINUSOIDAL	5,557%	5,888%	3,333%	3,448%	00:44:57
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 90 S	6,006%	6,395%	5,681%	5,983%	00:44:55
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 68 S	4,972%	5,236%	5,162%	5,448%	00:30:55

Para sessenta ciclos de compactação (Tabela 10) continuou-se a verificar um predomínio da função trapezoidal com período de noventa segundos para ambos os empilhamentos no que diz respeito aos ganhos obtidos. Para além disto, estes ganhos foram ainda mais acentuados relativamente à função sinusoidal e à função trapezoidal com período de sessenta e oito segundos quando comparados com o número de ciclos analisados anteriormente. A diferença entre os ganhos das funções trapezoidal foi, de facto, maior para ambos os empilhamentos (cerca de 1,6% para o empilhamento de oito camadas e 0,6% para o empilhamento de vinte camadas), uma vez que a diferença entre os tempos de ensaios entre as duas funções aumentou para 30 minutos, aproximadamente. Contudo, entre a função sinusoidal e a função trapezoidal com período de sessenta e oito segundos continuam-se a verificar maiores ganhos na função sinusoidal para o empilhamento de oito camadas e maiores ganhos na função trapezoidal com período de sessenta e oito segundos para o empilhamento de vinte camadas.

A análise para cem ciclos de compactação (Tabela 11) permite concluir que a função trapezoidal com período de noventa segundos continua a evidenciar maiores ganhos relativamente às outras duas funções para o empilhamento de oito camadas. A tendência verificada nas análises realizadas anteriormente apontava para que os ganhos também fossem maiores para este tipo de função para o empilhamento de vinte camadas, no entanto como não foram realizados cem ciclos de compactação para este empilhamento não é possível concluir esta afirmação. Como se pode observar, continuaram-se a verificar os mesmos acontecimentos das análises anteriores no que diz respeito aos ganhos entre a função sinusoidal e a função trapezoidal de sessenta e oito segundos. Adicionalmente, a diferença verificada entre os ganhos destas duas funções revelou-se cada vez maior à medida que aumentava o número de ciclos de compactação.

Tabela 10 - Valores dos ganhos para sessenta ciclos de compactação.

60 CICLOS	8 CAMADAS		20 CAMADAS		TEMPO MÉDIO
	Ganhos (%)				
	Espessura	Fração volúmica de fibras	Espessura	Fração volúmica de fibras	
FUNÇÃO SINUSOIDAL	6,737%	7,228%	4,483%	4,695%	01:29:53
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 90 S	7,403%	8,004%	7,095%	7,572%	01:29:50
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 68 S	5,990%	6,377%	6,464%	6,916%	01:01:06

Tabela 11 - Valores dos ganhos para cem ciclos de compactação.

100 CICLOS	8 CAMADAS		20 CAMADAS		TEMPO MÉDIO
	Ganhos (%)				
	Espessura	Fração volúmica de fibras	Espessura	Fração volúmica de fibras	
FUNÇÃO SINUSOIDAL	7,679%	8,320%	5,598%	5,932%	02:29:56
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 90 S	8,202%	8,941%	-	-	02:29:28
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 68 S	6,796%	7,295%	7,021%	7,559%	01:41:08

Depois de realizada a análise dos ganhos para o mesmo número de ciclos de compactação segue-se a análise dos ganhos para o mesmo tempo de ensaio. De acordo com os dados presentes na Tabela 12 foi possível verificar ganhos ligeiramente superiores para a função trapezoidal com período de noventa segundos para o empilhamento de oito camadas. Contudo, verificaram-se maiores ganhos para a função trapezoidal com período de sessenta e oito segundos para o empilhamento de vinte camadas. É necessário dar ênfase ao facto de terem sido realizados apenas vinte ciclos de compactação para a função trapezoidal com período de noventa segundos e trinta ciclos de compactação para a função trapezoidal com período de sessenta e oito segundos.

Relativamente à função sinusoidal, os ganhos obtidos foram inferiores para ambos os empilhamentos. Posto isto, a análise feita numa fase inicial dos ensaios permite concluir que quantos mais ciclos forem realizados maiores serão os ganhos.

Tabela 12 - Valores dos ganhos para 00h30 de ensaio.

PARA 00H30 DE ENSAIO	8 CAMADAS		20 CAMADAS		N ° CICLOS
	Ganhos (%)				
	Espessura	Fração volúmica de fibras	Espessura	Fração volúmica de fibras	
FUNÇÃO SINUSOIDAL	4,707%	4,945%	2,402%	2,461%	20
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 90 S	5,169%	5,456%	4,849%	5,068%	20
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 68 S	4,972%	5,236%	5,162%	5,448%	30

Ao fim de uma hora de ensaio (Tabela 13) continuou-se a obter maiores ganhos para a função trapezoidal com um período de noventa segundos para o empilhamento de oito camadas. Para o empilhamento de vinte camadas os maiores ganhos verificaram-se para a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos. Para o empilhamento de oito camadas observou-se uma aproximação dos ganhos da função sinusoidal face à função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos. Os vinte ciclos de compactação feitos a mais para a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos tiveram maior influência nos ganhos para o empilhamento de vinte camadas do que para o empilhamento de oito camadas.

A Tabela 14 que espelha os valores dos ganhos para uma hora e meia de ensaio permitiu concluir que os maiores ganhos foram obtidos para a função trapezoidal com período de noventa segundos para ambos os empilhamentos. Foi possível concluir também que o número de ciclos de compactação não tem tanta influência no que diz respeito aos ganhos obtidos para o empilhamento de oito camadas, visto que para a função trapezoidal com período de sessenta e oito segundos realizaram-se noventa ciclos e os ganhos obtidos foram inferiores às outras duas funções. Já para o empilhamento de vinte camadas, os ganhos para esta função foram superiores aos obtidos para a função sinusoidal e inferiores, ainda que muito idênticos, aos da função trapezoidal com período de noventa segundos.

Tabela 13 - Valores dos ganhos para 01h00 de ensaio.

PARA 01H00 DE ENSAIO	8 CAMADAS		20 CAMADAS		N ° CICLOS
	Ganhos (%)				
	Espessura	Fração volúmica de fibras	Espessura	Fração volúmica de fibras	
FUNÇÃO SINUSOIDAL	5,982%	6,367%	3,760%	3,908%	40
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 90 S	6,528%	6,988%	6,175%	6,537%	40
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 68 S	5,990%	6,377%	6,464%	6,916%	60

Tabela 14 - Valores dos ganhos para 01h30 de ensaio.

PARA 01H30 DE ENSAIO	8 CAMADAS		20 CAMADAS		N ° CICLOS
	Ganhos (%)				
	Espessura	Fração volúmica de fibras	Espessura	Fração volúmica de fibras	
FUNÇÃO SINUSOIDAL	6,737%	7,228%	4,483%	4,695%	60
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 90 S	7,403%	8,004%	7,095%	7,572%	60
FUNÇÃO TRAPEZOIDAL COM PERÍODO DE 68 S	6,604%	7,072%	6,950%	7,477%	90

Em suma, o tipo e o período da função do gráfico da pressão em função do tempo são os elementos que mais influência têm nos ganhos obtidos, uma vez que a função trapezoidal com período de noventa segundos obteve maiores ganhos em quase todas as análises feitas. No entanto, o número de ciclos de compactação e o tempo de ensaio também têm uma influência substancial nestes ganhos.

Como conclusão deste estudo, os melhores resultados de fração volúmica de fibras foram obtidos na função trapezoidal com um período de noventa segundos e o estado de equilíbrio é atingido a partir do 50° ciclo de compactação.

3.6.3. Comparação de desempenho mecânico

O objetivo desta secção é comparar os resultados da fração volúmica de fibras e da espessura dos provetes retirados de laminados fabricados com e sem a aplicação dos ciclos de compactação antes da infusão da resina. De acordo com a conclusão obtida em 3.6.2, aplicaram-se cinquenta ciclos de compactação para uma função trapezoidal com um período de noventa segundos ao laminado antes da infusão.

Na Tabela 15 estão identificados os resultados da fração volúmica de fibras e da espessura obtidos em todos os provetes. Um ponto positivo verificado foi a baixa disparidade entre os resultados, uma vez que o desvio padrão para ambos se apresentou bastante reduzido.

Tabela 15 - Resultados da fração volúmica de fibras e da espessura dos provetes com e sem a aplicação dos ciclos de compactação antes da infusão da resina.

Proвете	Sem ciclos de compactação		Com ciclos de compactação	
	Fração volúmica de fibras (%)	Espessura (mm)	Fração volúmica de fibras (%)	Espessura (mm)
1,1	53,65 %	4,31 mm	64,09 %	3,75 mm
1,2	52,90 %	4,35 mm	63,11 %	3,88 mm
2,1	52,44 %	4,28 mm	62,86 %	3,82 mm
2,2	52,82 %	4,35 mm	60,31 %	3,79 mm
3,1	52,07 %	4,21 mm	60,82 %	3,77 mm
3,2	52,78 %	4,27 mm	60,36 %	3,75 mm
4,1	52,55 %	4,28 mm	61,22 %	3,76 mm
4,2	54,24 %	4,26 mm	60,67 %	3,74 mm
5,1	52,70 %	4,34 mm	59,66 %	3,78 mm
5,2	56,74 %	4,33 mm	61,08 %	3,87 mm
Média	53,29 %	4,30 mm	61,42 %	3,79 mm
Desvio padrão	1,29 %	0,0435 mm	1,36 %	0,0461 mm

De acordo com estes resultados apresentados foi possível observar que, de facto, a aplicação dos ciclos de compactação tem uma influência muito significativa no que diz respeito aos valores da fração volúmica de fibras e da espessura das amostras. Como é possível verificar, atingiram-se valores de fração volúmica de fibras muito superiores com a aplicação dos ciclos de compactação antes da infusão do que sem a aplicação dos ciclos de compactação. Logo conclui-se que a aplicação dos ciclos de compactação antes da infusão da resina é fundamental para aumentar a fração volúmica de fibras do laminado.

3.7. Discussão de resultados

O primeiro ensaio realizado (ensaio quase-estático) foi importante para definir um parâmetro (tempo ótimo de relaxação da força) com um impacto significativo no ensaio que se seguiu (ensaio de compactação cíclica). Destes ensaios foram alcançadas relaxações das forças de compactação na ordem dos 80% da força máxima após cinquenta segundos.

Nos ensaios de compactação cíclica estudaram-se três tipos de funções ou formatos da curva de compactação diferentes com o objetivo de identificar qual destes promovia um aumento da fração volúmica de fibras mais acentuado.

A primeira análise realizada para todos os ensaios consistiu no estudo da espessura do empilhamento em função do número de ciclos de compactação. Tal como Stankovic [76] previu, a aplicação de ciclos de compactação em reforços, independentemente da função (ou formato da curva de compactação) escolhido, diminui a espessura do empilhamento.

De seguida analisaram-se os valores máximos e mínimos da espessura ao longo dos ciclos de compactação, no qual se verificou que o estado de equilíbrio é atingido no 50º ciclo de compactação. Isto significa que até ao 50º ciclo as fibras não apresentam uma recuperação elástica, mas sim viscoelástica, visto que a diferença entre os valores máximos e mínimos da espessura do empilhamento diminuiu. Em contrapartida, depois do 50º ciclo a diferença entre os valores máximos e mínimos da espessura do empilhamento foi pouco significativa, o que significa que as fibras apresentaram uma recuperação elástica. De facto, este acontecimento vai de encontro ao obtido por Li et al. [44] que concluiu que as fibras começam a recuperar elasticamente depois de atingir o estado de equilíbrio.

A análise que se seguiu permitiu identificar os ganhos de espessura e de fração volúmica de fibras obtidos de dez em dez ciclos de compactação para cada função. Em todos os ensaios realizados verificou-se que os maiores ganhos de fração volúmica de fibras e de espessura ocorreram nos primeiros dez ciclos de compactação.

Na tentativa de encontrar um motivo para justificar esta tendência, analisaram-se as curvas de compactação para os ciclos 1, 11, 21, 31, 41 e 51, tal como feito na literatura por Robitaille e Gauvin [65] (Figura 72).

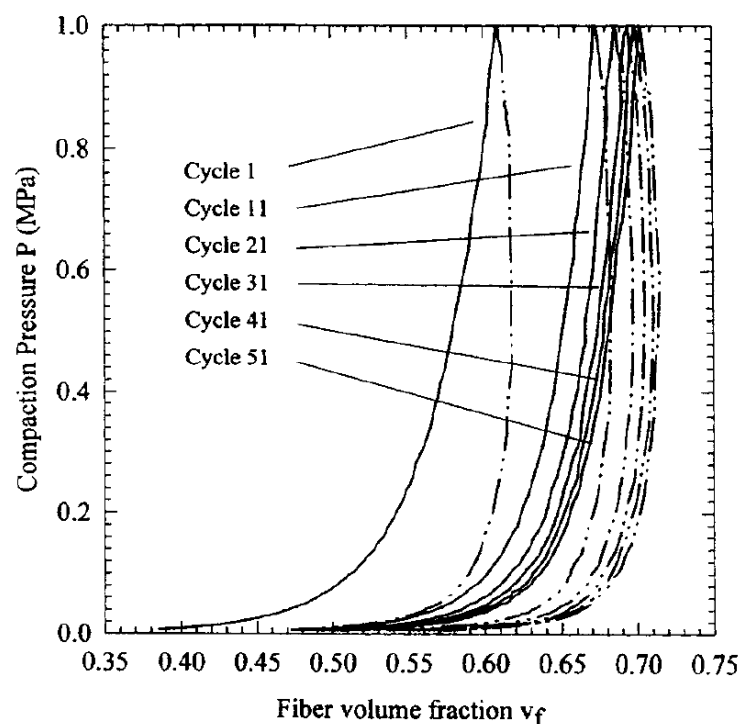


Figura 72 - Curvas da compactação cíclica obtida por Robitaille e Gauvin [65].

Como se verifica Figura 73, as curvas de compactação demonstraram ser muito idênticas às curvas apresentadas na Figura 72 apesar de a pressão máxima de compactação destas últimas estarem na gama dos 10 bar (que corresponde a 1 MPa). No entanto, em ambas as figuras se verificou um aumento significativo da fração volúmica de fibras nos primeiros dez ciclos de compactação, ainda que depois desse período se continuasse a observar um aumento pouco significativo da fração volúmica de fibras. A conclusão que se retira deste acontecimento é que a grande maioria da reorganização e dos deslocamentos das fibras, ocorreu durante os primeiros dez ciclos de compactação. Logo justifica-se a obtenção de maiores ganhos de fração volúmica de fibras e de espessura nos primeiros dez ciclos de compactação.

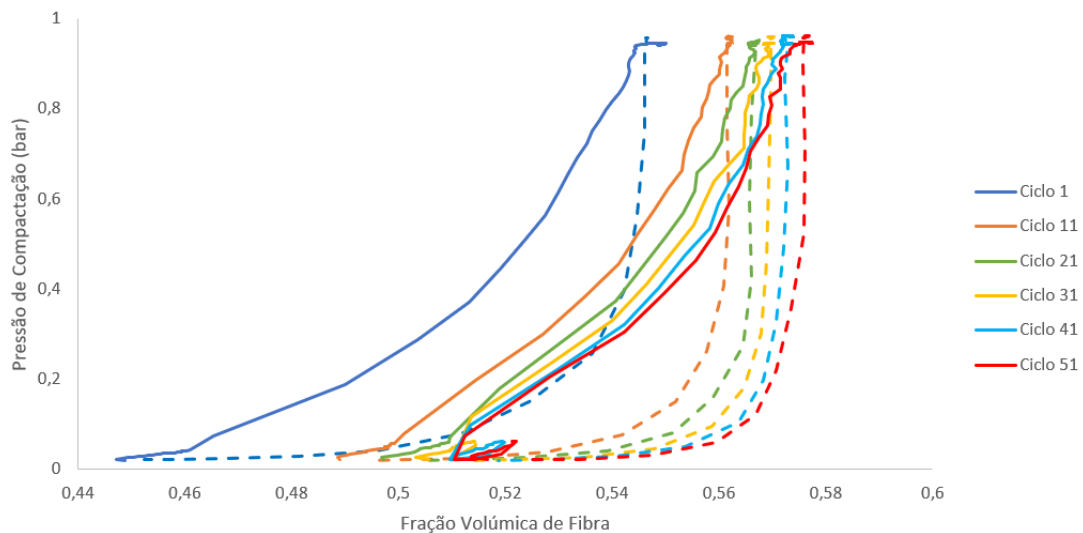


Figura 73 - Curva de compactação correspondente ao ensaio com a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos para um empilhamento de vinte camadas (nota: a linha a traço contínuo corresponde à fase de carregamento e a linha a tracejado corresponde à fase de descarregamento).

Posteriormente, apresentaram-se várias tabelas que relacionam os resultados dos ganhos da fração volúmica de fibras e da espessura obtidos para cada uma das funções utilizadas. Em todas as análises feitas observaram-se, indiscutivelmente, os melhores resultados para a função trapezoidal com um período de noventa segundos para todos os ciclos de compactação analisados. No entanto, os resultados apresentados para a função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos também se apresentaram bastante interessantes tendo em consideração que se consegue poupar tempo de produção e a diferença dos resultados para a função trapezoidal com um período de noventa segundos não se verificou muito acentuada.

Na generalidade, estes resultados apresentaram-se melhores do que os apresentados para a função sinusoidal com um período de noventa segundos. Este acontecimento poderá estar relacionado com o facto de nas funções trapezoidais se verificar uma taxa de deformação maior no início da fase da compactação (ou seja, o tempo em que a pressão transita do valor mínimo para o máximo é mais curto), tal como se verifica na Figura 74.

O patamar onde se manteve a pressão de compactação máxima constante, presente nas funções trapezoidais, é outro motivo que poderá estar na origem de melhores resultados para este tipo de função. A deformação por fluência é um fenómeno presente neste patamar, uma vez que se verifica que o reforço continua a deformar-se, ainda de que de uma forma lenta, enquanto está sujeito a uma pressão constante. Aparentemente, quanto maior for a duração deste patamar, isto é, quanto mais tempo o reforço estiver sob compactação máxima, melhores resultados serão alcançados.

Esta afirmação pode ser comprovada através dos melhores resultados obtidos para a função trapezoidal com um período de noventa segundos (em que a duração deste patamar foi 75 segundos) face à função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos (em que a duração deste patamar foi apenas 50 segundos).



Figura 74 - Demonstração da taxa de deformação inicial para a função trapezoidal.

Na função sinusoidal não existe este patamar, como se verifica na Figura 75, no entanto na fase da compactação a taxa de deformação é, evidentemente, mais lenta (demora mais tempo a atingir o pico de pressão máxima) relativamente à função trapezoidal. Isto significa que durante esta fase consegue-se atingir uma maior fração volúmica de fibras, uma vez que existe mais tempo para as fibras se moverem e realinharem providenciando assim um maior efeito do *nesting*. A razão que impede este tipo de função de obter melhores resultados face às outras duas funções encontra-se relacionada com diminuição da pressão depois de atingir o pico de pressão máxima, dando origem à relaxação das fibras.

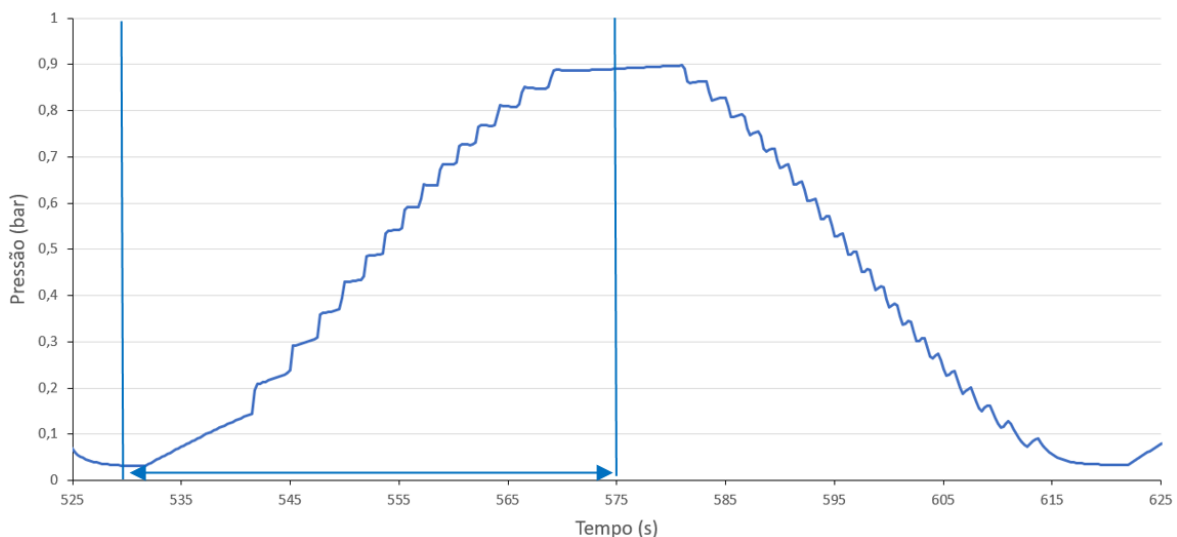


Figura 75 - Demonstração da taxa de deformação inicial para a função sinusoidal.

De um ponto de vista geral verificaram-se maiores ganhos de fração volúmica de fibras e de espessura para o empilhamento de oito camadas. A única exceção foi observada na função trapezoidal com um período de sessenta e oito segundos em que os melhores resultados

verificaram-se para o empilhamento de vinte camadas. Este acontecimento não foi de encontro com os resultados apresentados por Yang et al. [46], caso em que o aumento de número de camadas aumentou a fração volúmica de fibras, ainda que este aumento se apresente relativamente baixo (ganho de fração volúmica inferior a 2,5% de 10 para 100 camadas).

No subcapítulo 3.6.3 comparou-se os valores da fração volúmica de fibras de provetes retirados de laminados com um empilhamento de vinte camadas fabricados com e sem a aplicação dos ciclos de compactação antes da infusão da resina. A conclusão retirada desta análise foi que a aplicação dos ciclos de compactação antes da infusão foi, realmente, preponderante para o aumento da fração volúmica de fibras (aumento de 8,13% face à fração volúmica de fibras atingida sem os ciclos de compactação aplicados antes da infusão).

4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo encontra-se dividido em duas partes. O primeiro subcapítulo corresponde à exposição das conclusões finais obtidas acerca do trabalho desenvolvido. No segundo subcapítulo são sugeridos alguns temas a abordar numa perspetiva futura com o propósito de complementar o trabalho realizado.

4.1. Conclusões

O propósito desta dissertação foi aprofundar o conhecimento, existente na literatura, sobre compactação de reforços fibrosos, no contexto do processo de infusão por vácuo. Para tal, desenvolveu-se um procedimento detalhado desta etapa, no qual se apresentaram diferentes metodologias com a finalidade de promover o aumento da fração volúmica de fibras e das propriedades mecânicas em laminados antes da infusão da resina.

Todo o procedimento experimental revelou-se um desafio devido à inexistência de qualquer norma ou protocolo responsável por ensaios de compactação para caracterização de reforços em laminados. No entanto, Yang et al. [46], apresentou, ainda que de uma forma resumida, um procedimento experimental para caracterizar a compactação de reforços fibrosos. Nos ensaios de compactação cíclica realizados neste estudo apenas foi mencionado que são aplicados ciclos de compactação variando a pressão aplicada entre 0 e 0,1 MPa (0 e 1 bar). Em nenhum momento foi apresentado o gráfico da pressão de compactação em função do tempo. O procedimento experimental realizado por Yenilmez et al. [47] apresentou o gráfico da pressão de compactação em função do tempo, e foram realizados vários testes com a variação de parâmetros tais como a taxa de deformação (ou velocidade de compactação) e a aplicação ou não dos ciclos de compactação. A função da pressão de compactação em função do tempo apresentado foi idêntica a um dos apresentados nesta dissertação.

Dos resultados obtidos nos ensaios de compactação cíclica concluiu-se que, de facto, a aplicação de ciclos de compactação em reforços fibrosos diminui a espessura do empilhamento e, conseqüentemente, aumenta a fração volúmica de fibras. Em todos os ensaios atingiu-se o estado de equilíbrio ao fim de 50 ciclos de compactação, o que significa que depois deste período não são evidenciadas diferenças significativas nos resultados da fração volúmica de fibras.

Das três funções da pressão de compactação em função do tempo verificaram-se os melhores resultados de fração volúmica de fibras para a função trapezoidal com um período de noventa segundos. A principal diferença da função trapezoidal para a função sinusoidal é o patamar de pressão de compactação máxima constante. Durante este patamar observou-se a presença de deformação por fluência, uma vez que o reforço continuou a deformar-se, ainda de que de uma forma lenta, quando sujeito a uma pressão constante. Da comparação entre as duas funções trapezoidais analisadas concluiu-se também que, quanto maior for a duração deste patamar, melhores serão os resultados da fração volúmica de fibras. No entanto, é importante referir que, até ao momento, este fenómeno foi pouco explorado na literatura para ensaios de compactação em materiais compósitos.

Nestes ensaios foi possível identificar maiores ganhos de fração volúmica de fibras para o empilhamento de oito comparativamente com vinte camadas, o que permite concluir que o efeito

do fenómeno *nesting* é tão ou mais preponderante para espessuras mais reduzidas do empilhamento. Estes resultados de alguma forma contradizem Li et al. [44] e Yousaf et al. [45], cujos resultados indicaram que o aumento do número de camadas contribui para uma maior redução de espessura do empilhamento devido ao fenómeno *nesting*.

Por fim, a análise realizada no subcapítulo 3.6.3 permitiu concluir que a aplicação de ciclos de compactação antes da infusão da resina aumenta, efetivamente, a fração volúmica de fibras em laminados produzidos através do processo de infusão por vácuo. Esta análise acrescenta algum valor ao trabalho apresentado nesta dissertação, na medida em que na literatura não existe qualquer análise para diferentes tipos de função da pressão de compactação em função do tempo (ou formato da curva de compactação), nem comparação entre os valores da fração volúmica de fibras com e sem a aplicação dos ciclos de compactação antes da infusão da resina.

4.2. Trabalhos futuros

Nesta dissertação conseguiu-se obter algumas conclusões interessantes relativamente ao trabalho proposto. De maneira a dar continuidade e complementar o trabalho desenvolvido sugere-se a abordagem dos seguintes temas:

- Caracterização aprofundada da resposta viscoelástica dos tecidos NCF;
- Modelação do processo de compactação cíclica, tendo em conta os dados experimentais obtidos nesta dissertação;
- Extensão do estudo experimental e de modelação para outros tipos de reforço (*plain weave*, *3/1 twill*, *5H sateen*, entre outros);
- Extensão do estudo experimental para tecidos saturados com resina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. P. Ferreira Silva, “Estudo de processo de fabrico avançado para estruturas aeronáuticas compósitas,” Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2019.
- [2] D. B. Miracle and S. L. Donaldson, *ASM Handbook: Composites*, vol. 21. USA: ASM International. ISBN 0-87170-703-9, 2001.
- [3] M. F.S.F de Moura, A. B. de Moraes, and A. G. de Magalhães, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Porto: Publindústria. ISBN 978-972-8953-73-7, 2009.
- [4] Internacional Trade Administration, “2017 Top Markets Report Composites Sector Snapshot,” 2017.
- [5] M. J. Dores de Castro, A. G. Magalhães, and J. F. Silva, “Apontamentos de Tecnologias dos Materiais,” ISEP - Materiais não Metálicos, 2019.
- [6] M. Kumar Buragohain, *Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*. Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-138-74667-1, 2017.
- [7] M. de Castro and A. G. de Magalhães, “Apontamentos Materiais Não Metálicos - Materiais Compósitos,” ISEP - Materiais não Metálicos, 2019.
- [8] X. Huang, “Fabrication and properties of carbon fibers,” *Materials*, vol. 2, no. 4. pp. 2369–2403, 2009. doi: 10.3390/ma2042369.
- [9] P. Bhatt and A. Goe, “Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use,” *Material Science Research India*, vol. 14, no. 1, pp. 52–57, 2017, doi: 10.13005/msri/140109.
- [10] A. Mafalda, F. M. Ventura, and M. Ventura, “Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas,” *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 21, 2009.
- [11] M. de Castro, “Apontamentos Materiais Não Metálicos - Processamento de Compósitos,” ISEP - Materiais não Metálicos, 2019.
- [12] S. Rana and R. Figueiro, *Advanced composite materials for aerospace engineering: processing, properties and applications*. United Kingdom: Woodhead Publishing. ISBN 978-0-08-100939-0, 2016.
- [13] “About McLaren.” Accessed: Dec. 07, 2022. [Online]. Available: <https://www.mclaren.com/group/about/>
- [14] “Mine counter-measure vessels.” Accessed: Dec. 05, 2022. [Online]. Available: https://www.saab.com/globalassets/products/kockums/mine-counter-measure-vessels/saab_mcmv.pdf
- [15] M. Sudharshan Kumar and A. Mahaboob Basha, “Density testing of hybrid composite with neem and jute fibers,” *Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, vol. 3, pp. 1177–1182, 2021, [Online]. Available: <https://www.irjmets.com/>
- [16] N. Hashim, D. L. Majid, N. Uda, R. Zahari, and N. Yidris, “Vacuum infusion method for woven carbon/Kevlar reinforced hybrid composite,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, 2017. doi: 10.1088/1757-899X/270/1/012021.
- [17] Silvestre T. Pinho and Pedro P. Camanho, “Apontamentos sobre Ensaios mecânicos em materiais compósitos FEUP,” 2005.
- [18] D. Grund, M. Orlishausen, and I. Taha, “Determination of fiber volume fraction of carbon fiber-reinforced polymer using thermogravimetric methods,” *Polym Test*, vol. 75, pp. 358–366, 2019, doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.02.031.
- [19] W. G. McDonough, J. P. Dunkers, K. M. Flynn, and D. L. Hunston, “A Test Method to Determine the Fiber and Void Contents of Carbon/Glass Hybrid Composites,” *Journal of ASTM International*. vol. 1, no. 3, 2004. [Online]. Available: www.astm.org
- [20] “ISO 527-2:2012 Tensile Properties of Plastics - Instron.” Accessed: Dec. 07, 2022. [Online]. Available: <https://www.instron.com/en/testing-solutions/iso-standards/iso-527-2>

- [21] “Ensaio de flexão | ZwickRoell.” Accessed: Dec. 09, 2022. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/compositos/ensaios-de-flexao/#c919>
- [22] O. A. Ekuase, N. Anjum, V. O. Eze, and O. I. Okoli, “A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing,” *Journal of Composites Science*, vol. 6, no. 6. MDPI, 2022. doi: 10.3390/jcs6060172.
- [23] C. D. Rudd, *Liquid moulding technologies: Resin transfer moulding, structural reaction injection moulding, and related processing techniques*. England: Woodhead Publishing. ISBN 1-85573-242-4, 1997.
- [24] N. A. Curado Mateus Correia, “Analysis of the vacuum infusion moulding process,” Tese de Doutorado. Universidade de Nottingham, Nottingham, 2004.
- [25] J. A. Woods, A. E. Modin, R. D. Hawkins, and D. J. Hanks, “Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion Process,” World Intellectual Property Organization International Bureau. WO 03/101708 A1, Canada, 2003
- [26] A. Hindersmann, “Confusion about infusion: An overview of infusion processes,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 126. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2019. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105583.
- [27] H. Darcy, *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Paris, 1856. [Online]. Available: <http://books.google.com>
- [28] P. Boisse, *Composite Reinforcements for Optimum Performance*. United Kingdom: Woodhead Publishing. ISBN 978-1-84569-7624, 2011.
- [29] N. C. Correia, F. Robitaille, A. C. Long, C. D. Rudd, P. Šimáček, and S. G. Advani, “Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 36, no. 12, pp. 1645–1656, 2005, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.03.019.
- [30] “Vacuum Infusion Technique.” Accessed: Dec. 20, 2022. [Online]. Available: <https://kbs-delivery.gr/en/content/7-vacuum-infusion-technique>
- [31] A. Hammami, B. R. Gebart, and P. Nilsson, “Analysis of the compaction cycle in the vacuum infusion molding process,” in *Proceedings of ICCM-12: 12th International Conference on Composite Materials*, T. Massard and A. Vautrin, Eds., Paris: Woodhead Publishing, 1999.
- [32] “Vacuum Infusion Process – Benefits, Dry Spots, Pinholes and More – German Advanced Composites.” Accessed: Dec. 22, 2022. [Online]. Available: <https://german-advanced-composites.com/vacuum-infusion-process-explained>
- [33] R. Gaetzi, “Why vacuum infusion benefits your quality, budget and environment,” 2008. [Online]. Available: www.corematerials.alcancomposites.com
- [34] “Aircraft Components from Vacuum Infusion | Composites One.” Accessed: Dec. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.compositesone.com/composite-wings-are-easier-to-produce-with-vacuum-infusion/>
- [35] “The MC-21-300 wing panel, made of Russian composite materials, delivered to the Irkut Corporation plant -News -Пресс-центр.” Accessed: Dec. 12, 2022. [Online]. Available: <https://eng.irkut.com/press-centre/news/2627/>
- [36] “The technology of MC-21 composite wing manufacturing became the winner in two categories of the prestigious JEC Innovation Award-2018 -News -Пресс-центр.” Accessed: Dec. 28, 2022. [Online]. Available: <https://eng.irkut.com/press-centre/news/2250/>
- [37] P. J. Schubel, “Technical cost modelling for a generic 45-m wind turbine blade produced by vacuum infusion (VI),” *Renew Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 183–189, 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.02.030.
- [38] “Wind turbine blade production – new products keep pace as scale increases.” Accessed: Dec. 12, 2022. [Online]. Available: <https://www.reinforcedplastics.com/content/features/wind-turbine-blade-production-new-products-keep-pace-as-scale-increases-1>
- [39] “Infusion resin creates more effective wind turbine blades | Covestro AG.” Accessed: Jul. 28, 2023. [Online]. Available:

- <https://solutions.covestro.com/en/highlights/articles/stories/2019/pu-for-wind-tower-rotor-blades>
- [40] “Uso de Pressão com Bolsa Dupla - Manual de Construção de Barcos.” Accessed: Dec. 02, 2022. [Online]. Available: <https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/infusao-a-vacu-com-bolsa-dupla/>
- [41] M. Bodaghi, R. Costa, R. Gomes, J. Silva, N. Correia, and F. Silva, “Experimental comparative study of the variants of high-temperature vacuum-assisted resin transfer moulding,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 129, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105708.
- [42] C. Niggemann, S. S. Young, J. W. Gillespie, and D. Heider, “Experimental investigation of the controlled atmospheric pressure resin infusion (CAPRI) process,” *J Compos Mater*, vol. 42, no. 11, pp. 1049–1061, 2008, doi: 10.1177/0021998308090650.
- [43] 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.
- [44] L. Li, Y. Zhao, J. Yang, J. Zhang, and Y. Duan, “An experimental investigation of compaction behavior of carbon non-crimp fabrics for liquid composite molding,” *J Mater Sci*, vol. 50, no. 7, pp. 2960–2972, 2015, doi: 10.1007/s10853-015-8860-0.
- [45] Z. Yousaf, P. Potluri, and P. J. Withers, “Influence of Tow Architecture on Compaction and Nesting in Textile Preforms,” *Applied Composite Materials*, vol. 24, no. 2, pp. 337–350, 2017, doi: 10.1007/s10443-016-9554-8.
- [46] J. Yang, J. Xiao, J. Zeng, D. Jiang, and C. Peng, “Compaction behavior and part thickness variation in vacuum infusion molding process,” *Applied Composite Materials*, vol. 19, no. 3–4, pp. 443–458, 2012, doi: 10.1007/s10443-011-9217-8.
- [47] B. Yenilmez, B. Caglar, and E. M. Sozer, “Pressure-controlled compaction characterization of fiber preforms suitable for viscoelastic modeling in the vacuum infusion process,” *J Compos Mater*, vol. 51, no. 9, pp. 1209–1224, 2017, doi: 10.1177/0021998316685164.
- [48] B. Chen and T.-W. Chou, “Compaction of woven-fabric preforms in liquid composite molding processes: single-layer deformation,” *Compos Sci Technol*, vol. 59, no. 10, pp. 1519–1526, 1999, doi: 10.1016/S0266-3538(99)00002-0.
- [49] B. Chen and T.-W. Chou, “Compaction of woven-fabric preforms: nesting and multi-layer deformation,” *Compos Sci Technol*, vol. 60, no. 12–13, pp. 2223–2231, 2000, doi: 10.1016/S0266-3538(00)00017-8.
- [50] S. Lomov, *Non-Crimp Fabric Composites*. Oxford: Woodhead Publishing. ISBN 9780857092533, 2011.
- [51] R. A. Saunders, C. Lekakou, and M. G. Bader, “Compression in the processing of polymer composites 1. A mechanical and microstructural study for different glass fabrics and resins,” *Compos Sci Technol*, vol. 59, no. 7, pp. 983–993, 1999, doi: 10.1016/S0266-3538(98)00137-7.
- [52] C. M. Van Wyk, “A Study of the Compressibility of Wool,” Tese de Doutorado. Universidade de Stellenbosch, Stellenbosch, 1944.
- [53] Z.-R. Chen, L. Ye, and T. Kruckenberg, “A micromechanical compaction model for woven fabric preforms. Part I: Single layer,” *Compos Sci Technol*, vol. 66, no. 16, pp. 3254–3262, 2006, doi: 10.1016/j.compscitech.2005.07.028.
- [54] Y. R. Kim, S. P. McCarthy, and J. P. Fanucci, “Compressibility and relaxation of fiber reinforcements during composite processing,” *Polym Compos*, vol. 12, no. 1, pp. 13–19, 1991, doi: 10.1002/pc.750120104.
- [55] A. A. Somashekar, S. Bickerton, and D. Bhattacharyya, “An experimental investigation of non-elastic deformation of fibrous reinforcements in composites manufacturing,” in *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier Ltd, 2006, pp. 858–867. doi: 10.1016/j.compositesa.2005.06.012.

- [56] M. K. Kang and W. Il Lee, "Analysis of resin transfer/compression molding process," *Polym Compos*, vol. 20, no. 2, pp. 293–304, 1999, doi: 10.1002/pc.10356.
- [57] M. K. Kang, W. I. Lee, and H. T. Hahn, "Analysis of vacuum bag resin transfer molding process," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 32, no. 11, pp. 1553–1560, 2001, doi: 10.1016/S1359-835X(01)00012-4.
- [58] S. Bickerton, M. J. Buntain, and A. A. Somashekar, "The viscoelastic compression behavior of liquid composite molding preforms," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 34, no. 5, pp. 431–444, 2003, doi: 10.1016/S1359-835X(03)00088-5.
- [59] L. Dinis, "Mecânica não linear," *Viscoelasticidade*. Porto, 2005. [Online]. Available: <https://web.fe.up.pt/~stpinho/teaching/feup/y0506/viscoel-handouts.pdf>
- [60] P. A. Kelly, R. Umer, and S. Bickerton, "Viscoelastic response of dry and wet fibrous materials during infusion processes," in *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier Ltd, 2006, pp. 868–873. doi: 10.1016/j.compositesa.2005.02.008.
- [61] "Plastic Deformation - Meaning, Mechanisms and Examples." Accessed: Apr. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.vedantu.com/physics/plastic-deformation>
- [62] Academic Resource Center, "Creep Deformation in Materials." [Online]. Available: <https://web.iit.edu/sites/web/files/departments/academic-affairs/academic-resource-center/pdfs/MaterialsCreep.pdf>
- [63] D. Bublitz, D. Colin, and K. Drechsler, "Implementation of a viscoelastic material model to predict the compaction response of dry carbon fiber preforms," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 153, 2022, doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106718.
- [64] F. Robitaille and R. Gauvin, "Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. I: Review of experimental results," *Polym Compos*, vol. 19, no. 2, pp. 198–216, 1998, doi: 10.1002/pc.10091.
- [65] F. Robitaille and R. Gauvin, "Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. III: Reorganization of the fiber network," *Polym Compos*, vol. 20, no. 1, pp. 48–61, 1999, doi: 10.1002/pc.10334.
- [66] "INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial." Accessed: Dec. 02, 2022. [Online]. Available: <https://portal.produtech.org/company/inegi-instituto-de-ciencia-e-inovacao-em-engenharia-mecanica-e-engenharia-industrial>
- [67] "INEGI junta-se à Airbus e a consórcio português para inovar no fabrico de compósitos para o setor aeronáutico." Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.inegi.pt/pt/noticias/inegi-junta-se-a-airbus-e-a-consorcio-portugues-para-inovar-no-fabrico-de-compositos-para-o-setor-aeronautico/>
- [68] "Bem-vindo ao ISQ - Centro de Interface e Tecnologia." Accessed: Jul. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.isq.pt/>
- [69] "OPTIMAL STRUCTURAL SOLUTIONS | LinkedIn." Accessed: Jul. 12, 2023. [Online]. Available: <https://pt.linkedin.com/company/optimal-structural-solutions>
- [70] "Grupo português ISQ entra no 'Projeto Gavião' com a Airbus – ECO." Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: <https://eco.sapo.pt/2021/05/24/grupo-portugues-isq-entra-no-projeto-gaviao-com-a-airbus/>
- [71] "O Projeto PASSARO promove os conceitos de 'Design Thinking' e estudos de ergonomia para a nova geração de Cockpits - ISQ Portugal." Accessed: Mar. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.isq.pt/noticias/o-projeto-passaro-promove-os-conceitos-de-design-thinking-e-estudos-de-ergonomia-para-a-nova-geracao-de-cockpits/>
- [72] "NewsAvia | Grupo industrial português estuda e desenvolve novos materiais para a Airbus." Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: <https://newsavia.com/grupo-industrial-portugues-estuda-e-desenvolve-novos-materiais-para-a-airbus/>
- [73] "Aviões da Airbus podem ter nova fuselagem criada em Portugal. Conheça o Projecto Gavião | O Jornal Económico." Accessed: Mar. 10, 2023. [Online]. Available: <https://jornaleconomico.pt/noticias/avioes-da-airbus-podem-ter-nova-fuselagem-criada-em-portugal-conheca-o-projecto-gaviao-744806>

- [74] “Baumer oadm20 optical sensors, design and principle of work | ELTRA TRADE.” Accessed: Mar. 01, 2023. [Online]. Available: <https://eltra-trade.com/blog/baumer-oadm20-laser-distance-sensors>
- [75] “5900 Series - Premier Testing Solutions.” Accessed: Mar. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.instron.com/-/media/literature-library/products/2012/12/5900-series-general-brochure.pdf>
- [76] S. B. Stankovic, “Compression hysteresis of fibrous systems,” *Polym Eng Sci*, vol. 48, no. 4, pp. 676–682, 2008, doi: 10.1002/pen.20994.