



Estudo e otimização do processo de estampagem a quente de materiais compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibra contínua

RÚBEN FILIPE DIAS CARDOSO

novembro de 2021

ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM A QUENTE DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA REFORÇADOS COM FIBRA CONTÍNUA

Rúben Filipe Dias Cardoso

1161237

2020/2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM A QUENTE DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA REFORÇADOS COM FIBRA CONTÍNUA

Rúben Filipe Dias Cardoso

1161237

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica – Ramo de Construções Mecânicas, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Gomes Salgueiral Campilho e coorientação do Mestre João Pedro Ferreira da Silva e do Mestre Rúben Leandro Leitão Pereira.

2020/2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Manuel Jorge Dores de Castro

Professor Coordenador, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientadores

Mestre João Pedro Ferreira da Silva

Gestor de Projetos, INEGI

Mestre Rúben Leandro Leitão Pereira

Engenheiro de Desenvolvimento de Produtos e Processos, INEGI

Arguente

Doutor Hugo Queirós de Faria

Professor Adjunto Convidado, UA

PALAVRAS-CHAVE

Indústria automóvel, materiais compósitos, estampagem a quente, termoplásticos, CFRTP, método Taguchi, otimização de processo, ANOVA, DOE.

RESUMO

A redução do consumo de combustíveis fósseis nos automóveis surge, nos dias de hoje, como uma meta fundamental, definida pela União Europeia. Surge então, neste contexto, a utilização de materiais que ofereçam a diminuição do peso integral do automóvel. Os materiais compósitos colocam-se, portanto, na linha da frente com a capacidade de alcançar este objetivo, visto serem capazes de oferecer excelentes propriedades mecânicas e, ao mesmo tempo, serem materiais mais leves. Os materiais compósitos termoplásticos apresentam como vantagem a vertente ambiental de serem materiais recicláveis e, do ponto de vista industrial, possuem tempos de processamentos mais curtos. O processo de estampagem a quente revela-se um excelente processo de fabrico associado aos materiais compósitos de matriz termoplástica por apresentar tempos de ciclos curtos, peças com elevados rendimentos, poucos custos em mão de obra e preços finais atrativos. Este processo é muitas vezes utilizado na obtenção de peças para o setor automóvel.

O principal objetivo deste trabalho centra-se na otimização da janela de processamento quando aplicado à obtenção de componentes compósitos de matriz termoplástica, através da correlação dos seus parâmetros de processamento com foco na qualidade do componente e por recurso a diversos indicadores de qualidade. Este processo de otimização leva a cabo a análise de componentes fabricados segundo diferentes condições, que envolvem a realização de um desenho de experiências e posterior análise de variância ANOVA implementada no *software* Design Expert V13®.

Para este estudo demonstrou ser crucial a correta seleção e discretização das variáveis de processo de estampagem a quente. A análise realizada permitiu, não só, compreender de forma isolada o impacto de cada variável do processo na qualidade do produto final, mas também, por correlação, definir a respetiva janela ótima de processamento.

KEYWORDS

Automotive industry, composite materials, hot stamping, thermoplastics, CFRTP, Taguchi's method, process optimization, ANOVA, DOE.

ABSTRACT

In the present day, the reduction of consumption of fossil fuels in automobiles arises as a goal of the utmost importance, set by the European Union. Thus, in this context emerges the usage of materials that ensure the reduction of the automobile overall weight. Composite materials are the optimal choice to reach the established goal since they are capable of offering excellent mechanical properties in addition to having less weight. Thermoplastic composite materials have the environmental advantage of being recyclable and also, from the industrial standpoint, they are materials with short processing time. The hot stamping process reveals itself as an optimum manufacturing process associated to thermoplastic matrix composite materials mainly due to short cycle times, high performance, few labor costs and pleasing final prices. This process is widely used for obtaining parts for the automotive sector.

The main goal of this project focuses on the optimization of the processing window when applied to obtain thermoplastic matrix composite components by correlating its processing parameters with an emphasis on component quality and by using various quality indicators. This optimization executes the analysis of components manufactured under different conditions, which involve the realization of a design of experiments and subsequent ANOVA analysis of variance implemented in Design Expert V13[®] *software*.

The accurate selection and discretization of the hot stamping process variables was crucial for this study. The performed analysis allowed not only to understand, in an isolated way, the impact of each process variable on the quality of the final product, but also, by correlation, to define the respective optimal processing window.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AFP	<i>Automated Fiber Placement</i>
ANOVA	Análise de Variância
ATL	<i>Automated Tape Laying</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CIT	Centro de Interface Tecnológica
DEGI	Departamento de Engenharia e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
DEMec	Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
DOE	Desenho de Experiências
ESA	<i>European Space Agency</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HDT	<i>Heat Deflection Temperature</i>
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PA	Poliamida
PAN	Poliacrilonitrila
PC	Polycarbonato
PEEK	Poli-éter-éter-cetona
PEI	Polietilenoimina

PI	Poliimida
PP	Polipropileno
PPS	Sulfureto de polifenileno
PSU	Polisulfona
RTM	<i>Resin Transfer Moulding</i>
SMC	<i>Sheet Moulding Compound</i>
TIM	<i>Thermoplastic Injection Moulding</i>
UHMWPE	<i>Ultra-High Molecular Weight Polyethylene</i>

Lista de Unidades

%	Porcentagem
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
GPa	Giga Pascal
kN	Quilonewton
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetro
mm ²	Milímetros quadrados
MPa	Mega Pascal
N	Newton
N/mm	Newton por milímetro
°C	Graus Celsius
W/m.K	Watts por metro kelvin

Lista de Símbolos

m	Massa
T_g	Temperatura de transição vítrea
T_m	Temperatura de fusão
ρ	Massa volúmica

GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Blank</i>	Laminado obtido por consolidação em pratos quentes.
<i>Blank-holder</i>	Montagem responsável por manter o correto posicionamento do <i>blank</i> .
<i>Braided</i>	Fibra disposta num sistema de três ou mais filamentos entrelaçados.
<i>Dashboards</i>	Painel visual que apresenta, de maneira centralizada, um conjunto informações.
<i>E-glass</i>	Fibras de vidro com características para aplicações elétricas.
<i>Gripper</i>	Componente de fixação do <i>blank</i> no <i>blank-holder</i> .
<i>Gripping</i>	Fixação de um laminado que permite o correto posicionamento do mesmo.
<i>Input</i>	Variável introduzida no DOE do <i>software</i> DX13.
<i>Know-how</i>	Conjunto de conhecimentos práticos e teóricos adquiridos.
<i>Lay-up</i>	Empilhamento de material.
<i>Lead-time</i>	Tempo gasto pelo sistema de produção para que a matéria-prima seja transformada num produto acabado.
<i>Matched-die</i>	Processo em que, um molde e um contra-molde se encontram para formar o componente.
<i>Nylon</i>	Designação genérica para poliamida.
<i>Outlier</i>	Dados que se distanciam radicalmente de todos os outros
<i>Output</i>	Resposta obtida no DOE do <i>software</i> DX13.
<i>Peel ply</i>	Camada desmoldante, utilizada para remover excesso de resina e texturizar a superfície do compósito promovendo a adesão.
<i>Pipelines</i>	Estrutura responsável por fazer o transporte de fluídos, como petróleo e gás natural.

<i>P-value</i>	Probabilidade de obter resultados pelo menos tão extremos como os resultados observados
<i>Rovings</i>	Agrupamento de fibras longo e estreito.
<i>Setup</i>	Unificação funcional de um conjunto de equipamento.
<i>S-glass</i>	Versão mais resistente das fibras <i>E-glass</i> .
<i>Short Beam Shear ILSS</i>	Resistência ao corte interlaminar de fibras paralelas.
<i>Spreading</i>	Extensão de uma dimensão das fibras.
<i>Springback</i>	Deformação da peça final ao ser libertada da prensa.
<i>Tapes</i>	Bandas, tipicamente pré-impregnadas, usadas na produção de materiais compósitos.
<i>Tows</i>	Fibra agrupada em filamentos contínuos.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Arcos coreanos construídos a partir de materiais compósitos [1]	3
Figura 2 - Logótipo do INEGI	6
Figura 3 – Tendência de utilização de materiais compósitos e plásticos em componentes automóveis nas últimas décadas (<i>pounds/veículo</i>) [10]	9
Figura 4 - Classificação de matrizes e reforços para compósitos poliméricos [12]	10
Figura 5 – Diagrama módulo de elasticidade à tração/temperatura de termoplásticos - (a) estrutura amorfa e (b) estrutura semicristalina [16]	11
Figura 6 – Diagrama de módulo de elasticidade/temperatura de termoendurecíveis [16].....	13
Figura 7 – Estrutura de <i>Airbag</i> de <i>nylon</i> (esquerda) e estrutura de <i>dashboard</i> em PP reforçados com fibra de carbono (direita) [31, 32]	17
Figura 8 - Esquema da relação preço/desempenho na produção em massa de termoplásticos [37]	18
Figura 9 - Tipos de arquiteturas de reforços utilizados em compósitos termoplásticos [45]	21
Figura 10 - Processo de enrolamento filamentar [47].....	22
Figura 11 - Equipamento utilizado no processo ATL [52]	23
Figura 12 - Processo AFP [55]	24
Figura 13 - Estampagem a quente [57]	24
Figura 14 – Peça obtida por estampagem a quente [60]	25
Figura 15 - Procedimento do método Taguchi [68].....	28
Figura 16 - Ilustração simples do princípio de funcionamento da análise ANOVA [74]	30
Figura 17 - Exemplo de funcionalidade do software Design Expert V13®[76]	30
Figura 18 - Edifício do INEGI	33
Figura 19 - Recursos técnicos do INEGI para o processamento de materiais compósitos termoplásticos	35
Figura 20 - Exemplo de implementação de uma matriz ortogonal L9 no <i>software</i> DX13	37
Figura 21 - Exemplo de gráficos obtidos com a utilização do <i>software</i> DX13	37
Figura 22 - Exemplo da configuração das molas no <i>blank-holder</i>	39
Figura 23 – Matriz de ensaios L9 do método Taguchi [78].....	40
Figura 24 – Rolo de pré-impregnado unidirecional <i>TenCate Cetex</i> ® TC910 [79].....	41
Figura 25 - Exemplos de aplicações do <i>TenCate Cetex</i> ® TC910 [79].....	42
Figura 26 - Diferentes tipos de cortes de material: a) camada de 166×68 mm ² , b) camada de 166×166 mm ² e c) camada de 166×400 mm ²	44

Figura 27 - Exemplo de empilhamento	44
Figura 28 – a) Processo de soldadura manual das camadas de material e b) sonotrodo utilizado.....	45
Figura 29 - Colocação do material empilhado na prensa	46
Figura 30 - <i>Blank</i> pronto a ser retirado	46
Figura 31 – Corte dos <i>blanks</i>	47
Figura 32 – <i>Blank</i> pós-corte.....	47
Figura 33 - Disposição dos pontos utilizados para medição de espessura	48
Figura 34 - <i>Blank</i> devidamente marcado.....	48
Figura 35 - Utilização do micrómetro para medição da espessura do <i>blank</i>	49
Figura 36 - Posição dos pontos de furação no <i>blank</i>	50
Figura 37 - <i>Blank</i> com furações e preparado para estampagem.....	51
Figura 38 - Prensa utilizada para estampagem a quente no INEGI	52
Figura 39 – a) Meia-moldação inferior e b) meia-moldação superior projetadas no <i>software</i> Solidworks	52
Figura 40 - Moldes utilizados no processo de estampagem a quente com as mangueiras utilizadas para o controlo de temperatura	53
Figura 41 - Lâmpadas utilizadas no aquecimento do <i>blank</i>	53
Figura 42 - Carro de transporte dos <i>blanks</i>	54
Figura 43 - <i>Blank</i> posicionado no carro através do <i>blank-holder</i>	55
Figura 44 - Aquecimento do <i>blank</i> e deconsolidação.....	55
Figura 45 - Estampagem do <i>blank</i> com recurso à prensa.....	56
Figura 46 - Amostra estampada: a) vista lateral e b) vista frontal	56
Figura 47 - Zonas de medição das espessuras da amostra.....	57
Figura 48 - Corte das amostras.....	59
Figura 49 – Amostra cortada a meio	59
Figura 50 – Exemplo de medição de <i>springback</i> : <i>L</i> – Dimensão representada a verde, <i>A</i> – Dimensão representada a vermelho.....	61
Figura 51 - Exemplo de aspetos indicativos de baixa qualidade superficial	62
Figura 52 – Amostras para o ensaio de queima: a) amostras do raio e b) amostras das abas.....	64
Figura 53 - Cadinhos com fibra seca	64
Figura 54 – a) Medição da massa da amostra seca e b) da amostra submersa em água.....	64

Figura 55 - Mufla utilizada na queima das amostras.....	65
Figura 56 - Pesagem dos cadinhos	65
Figura 57 - Cadinhos na mufla para a queima das amostras.....	66
Figura 58 - Fibras resultantes do ensaio de queima.....	66
Figura 59 - <i>Inputs</i> aplicados ao <i>optimal (custom) design</i> do <i>software</i> DX13.....	68
Figura 60 - Matriz de ensaios inseridas no <i>software</i>	69
Figura 61 - Respostas introduzidas no DX13	70
Figura 62 - Gráficos que ilustram as interações dos <i>inputs</i> com o <i>output</i> (neste caso o conteúdo de fibras das abas).....	71
Figura 63 - Variação da fração volúmica de fibra nas abas (eixo vertical) em função da pressão de fecho (eixo horizontal).....	72
Figura 64 - Variação da fração volúmica de fibra no raio (eixo vertical) em função da pressão de fecho (eixo horizontal).....	73
Figura 65 - Variação da diferença média de espessura (eixo vertical) em função da pressão de fecho (eixo horizontal).....	74
Figura 66 - Variação do valor máximo de <i>springback</i> (eixo vertical) em função dos <i>inputs</i> (eixo horizontal).....	75
Figura 67 - Variação da qualidade superficial (eixo vertical) em função da temperatura do molde (eixo horizontal).....	76
Figura 68 - Critérios para os <i>inputs</i> : a) temperatura do <i>blank</i> , b) tensão do <i>blank-holder</i> , c) temperatura do molde e d) pressão de fecho.....	77
Figura 69 - Critérios para a fração volúmica de fibra: a) no raio e b) nas abas	78
Figura 70 - Critérios para a diferença média de espessura	78
Figura 71 - Critérios para o <i>springback</i> máximo.....	79
Figura 72 - Critérios para a qualidade superficial	79
Figura 73 - Valores ótimos dos <i>inputs</i> e correspondentes valores dos <i>outputs</i>	80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades típicas de matrizes termoendurecíveis [14]	12
Tabela 2 - Propriedades de algumas fibras utilizadas no fabrico de materiais compósitos de matriz polimérica [16, 26]	14
Tabela 3 - Processos de fabrico de componentes utilizando materiais compósitos de matriz polimérica e aplicações [16]	15
Tabela 4 - Propriedades típicas de matrizes termoplásticas [14]	19
Tabela 5 - Estado-da-arte de estampagem a quente de compósitos de matriz termoplástica de fibra contínua	26
Tabela 6 – Matriz de ensaios adotada para a experiência	40
Tabela 7 - Propriedades do material de matriz PA6 reforçado com fibra de carbono (<i>TenCate Cetex</i> [®] TC910) [79]	42
Tabela 8 - Estudos em que são utilizadas <i>tapes</i> de <i>TenCate Cetex</i> [®] TC910	43
Tabela 9 - Espessura dos <i>blanks</i>	49
Tabela 10 – Média da espessura em ambos as laterais das amostras	58
Tabela 11 - Espessuras da amostra no centro	59
Tabela 12 - <i>Springback</i> existente nas amostras	61
Tabela 13 - Qualidade superficial das amostras	63
Tabela 14 – Fração volúmica de fibra das abas e do raio	67

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	5
1.3	Estrutura do relatório.....	5
1.4	Apresentação da empresa acolhedora	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Materiais e processos de fabrico de materiais compósitos.....	9
2.1.1	Tipos de matrizes e reforços	10
2.1.1.1	Matriz.....	10
2.1.1.1.1	Matriz termoplástica.....	11
2.1.1.1.2	Matriz termoendurecível	12
2.1.1.2	Reforços	13
2.1.1.2.1	Fibra de vidro	13
2.1.1.2.2	Fibras de carbono.....	13
2.1.1.2.3	Fibras de aramida.....	14
2.1.2	Processos de fabrico comuns em materiais compósitos.....	14
2.2	Materiais compósitos de matriz termoplástica	16
2.2.1	Enquadramento e motivação para utilização.....	16
2.2.2	Materiais de matriz e reforço	17
2.2.2.1	Tipos de matrizes termoplásticas	17
2.2.2.2	Tipos de reforços utilizados em materiais compósitos termoplásticos	19
2.2.2.3	Tipos de arquiteturas dos reforços	20
2.2.3	Processos de fabrico para compósitos de fibra contínua e matriz termoplástica.....	21
2.2.3.1	Enrolamento Filamentar	21
2.2.3.2	Automated Tape Laying (ATL).....	22
2.2.3.3	Automated Fiber Placement (AFP)	23

2.2.4	Estampagem a quente para compósitos de fibra contínua.....	24
2.3	Técnicas de apoio ao desenvolvimento	28
2.3.1	Método Taguchi	28
2.3.2	Análise ANOVA e correlação	29
2.3.3	<i>Software</i> de implementação DOE (Design Expert V13®from StatEase)	30
3	DESENVOLVIMENTO	33
3.1	Caracterização da entidade acolhedora.....	33
3.2	Objetivos do trabalho.....	34
3.3	Requisitos e limitações do trabalho	34
3.4	<i>Know-how</i> existente.....	35
3.5	Planificação das experiências.....	36
3.5.1	Técnica utilizada	36
3.5.2	<i>Software</i> para análise de dados	36
3.5.3	Definição das variáveis e respetivos níveis.....	37
3.5.4	Definição da matriz de ensaios.....	40
3.6	Material utilizado	41
3.6.1	Escolha do material	41
3.6.2	Caracterização/propriedades mais relevantes	42
3.6.3	Processo de fabrico pré-estampagem.....	43
3.6.3.1	Empilhamento.....	43
3.6.3.2	Consolidação.....	45
3.6.3.3	Medições de espessura do blank.....	46
3.6.3.4	Preparação para estampagem	50
3.7	Processo de estampagem a quente	51
3.7.1	Equipamento utilizado	51
3.7.1.1	Prensa hidráulica	51
3.7.1.2	Molde.....	52
3.7.1.3	Setup de aquecimento.....	53

3.7.1.4	Blank-holder e setup de transporte	54
3.7.2	Descrição dos passos do processo	54
3.8	Medições e resultados experimentais	56
3.8.1	Espessura das abas	57
3.8.2	Springback	60
3.8.3	Qualidade superficial	62
3.8.4	Ensaio de queima	63
3.9	Análise ANOVA	68
3.9.1	Pré-processamento	68
3.9.2	Tratamento de dados	70
3.9.3	Análise dos resultados obtidos	71
3.9.3.1	Fração volúmica de fibra	72
3.9.3.2	Diferença média de espessura	73
3.9.3.3	Springback máximo	74
3.9.3.4	Qualidade superficial	76
3.9.4	Definição dos parâmetros ótimos do processo	77
3.9.4.1	Definição dos critérios para os inputs	77
3.9.4.2	Definição dos critérios para os outputs	77
3.9.4.3	Resultados finais	79
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	83
4.1	CONCLUSÕES	83
4.2	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	84
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	87
6	ANEXOS	95
6.1	ANEXO1	95

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Estrutura do relatório
- 1.4 Apresentação da empresa acolhedora

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os materiais compósitos remontam ao início de algumas antigas civilizações, em aplicações como paredes com reforço a partir de palha e também carroças construídas a partir da união de paus e ossos. Na Figura 1 podem ser observados arcos rudimentares coreanos feitos de materiais compósitos [1].

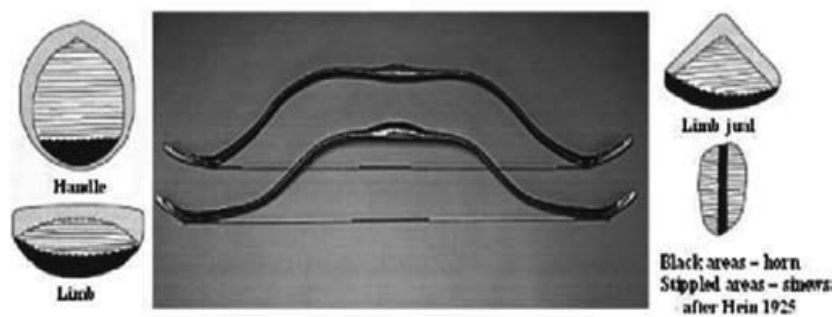


Figura 1 - Arcos coreanos construídos a partir de materiais compósitos [1]

A procura pelos materiais compósitos e a sua utilização ressurgiu principalmente na última metade do século XX, vista a necessidade de melhorar o desempenho dos veículos na área da aeronáutica, automobilística e ainda para fins militares [1]. Toda esta procura levou a um estudo mais intenso destes materiais e dos processos de fabrico a eles associados. Estes materiais surgem cada vez mais como alternativa aos materiais convencionais pelo facto de possuírem excelentes propriedades mecânicas específicas (relação propriedade-peso), como elevada resistência à fadiga e à corrosão, elevada rigidez, elevado módulo de elasticidade específico e por serem facilmente moldáveis [1].

Atualmente, um dos maiores desafios do setor automóvel surge da necessidade de reduzir o consumo de combustível, ao aumentar a eficiência do veículo. Assim, um dos métodos mais eficiente para atingir esse objetivo tem sido a procura de redução de peso dos componentes automóveis, assegurando a integridade estrutural e o correto desempenho do automóvel. A substituição dos convencionais componentes metálicos pelo seu equivalente em compósito permite reduções de 15-25% do peso para compósitos reforçados com fibra de vidro e de 25-40% para compósitos reforçados com fibra de carbono [2]. Devido às propriedades anteriormente enunciadas e pela capacidade de absorção de energia, associadas à possibilidade de fabrico de

componentes com geometrias complexas, estes materiais tornam-se materiais extremamente atrativos para aplicações automóveis.

A primeira aparição dos materiais compósitos no setor automóvel surge na década de 60 com a necessidade de obter veículos mais leves e com maior velocidade. Mas só mais tarde, na década de 80, com a introdução de técnicas avançadas de fabrico de materiais compósitos, é que os materiais compósitos aparecem como uma alternativa viável aos materiais convencionais principalmente utilizados nos chassis dos carros, tornando-os não só mais leves como também mais rígidos. Devido à constante implementação destes materiais ao longo das décadas, estes são muito frequentemente encontrados em estruturas automóveis, não só em chassis como noutros componentes como para-choques e eixo de transmissão [3].

Em termos ambientais, com o objetivo de combater as alterações climáticas, a União Europeia definiu uma estratégia com vista à neutralidade carbónica até 2050. Para tal, foi proposto pela Comissão Europeia, em setembro de 2020, reforçar como objetivo até 2030, a redução da emissão de gases estufa para 55%, quando comparadas com os níveis das emissões de 1990 [4]. Tendo em vista o cumprimento destas metas, a união europeia procura algumas alternativas, e uma delas pode passar por utilizar materiais compósitos em maior quantidade para o aumento da eficiência dos automóveis, que são parte preponderante no consumo de combustíveis fósseis. Uma redução de cerca de 10% no peso total do automóvel pode levar a também uma redução de até 8% do consumo de combustível, sendo que a substituição dos materiais tradicionais por compósitos pode levar até uma redução de 60% do peso do veículo [5].

A utilização de materiais compósitos termoplásticos tem vindo a revolucionar a indústria por apresentar vantagens como os tempos de processamento curtos e a capacidade de serem recicláveis, o que ecologicamente é visto como uma excelente alternativa. Os processos de fabrico normalmente associados a estes materiais são a estampagem a quente, o *thermoplastic injection moulding* (TIM), o *automated fiber placement* (AFP) e outros processos, muitas vezes processos de injeção. No entanto, estas soluções são ainda muito recentes e começam a ser aprimoradas de maneira a obter uma maior eficiência e custos mais reduzidos. Desta forma, são necessários estudos que acrescentem valor a estes processos. Aparece assim, nos dias de hoje, a necessidade de explorar estes processos de maneira a otimizar todos os mecanismos utilizados para o processamento de materiais compósitos de matriz termoplástica, tendo em vista a redução de custos e tempos do mesmo, assim como tentar perceber quais os materiais que melhor se adequam a cada tipo de processo e conseqüentemente uma diminuição do rácio custo/benefício.

O processo de estampagem a quente, demonstra ser uma boa alternativa no que diz respeito ao fabrico de materiais compósitos. Com tempos de ciclos curtos, elevados rendimentos, poucos custos em mão de obra e preço final atrativo, este processo prova

ser eficiente, viável a nível financeiro e promissor na indústria dos transportes por fornecer peças mais leves e com excelentes propriedades mecânicas [6].

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como temática a validação de metodologias produtivas (estampagem a quente) para componentes automóveis com recurso a tecnologias avançadas de fabrico de compósitos termoplásticos de fibra contínua. Procurar-se-á entender de que forma diferentes parâmetros de processamento, tais como temperatura, pressão, entre outros, influenciam as características e qualidade das peças obtidas através do processo de estampagem a quente, e de que forma estes podem ser conjugados para a otimização do processo. Este estudo será feito através da aplicação de metodologias DOE (Taguchi) e análise de variância ANOVA, cuja conjugação representa uma ferramenta corrente na otimização de processos.

Pretende-se, no desenvolvimento, descrever as várias fases para a obtenção dos materiais compósitos termoplásticos finais, desde o pré-processamento até à estampagem a quente, assim como toda a planificação associada, os equipamentos e o material utilizados e ainda as limitações existentes. Por fim, tenciona-se através da análise ANOVA, analisar os resultados obtidos das medições e ensaios efetuados e retirar as conclusões que levarão à definição dos valores ótimos do processo de estampagem a quente.

1.3 Estrutura do relatório

Esta dissertação possui quatro capítulos principais que se dividem em vários subcapítulos.

No primeiro capítulo procura-se fazer uma contextualização dos materiais compósitos, desde o surgimento destes materiais até à atualidade, e da necessidade da otimização destes materiais e dos processos associados. Ainda neste capítulo são apresentados os principais objetivos da dissertação, a organização da mesma e a apresentação da empresa acolhedora.

O segundo capítulo serve de revisão bibliográfica, abordando num caráter mais teórico, o tema em estudo, focando-se no estudo de materiais compósitos, tanto termoplásticos como termoendurecíveis, e processos de fabrico associados, assim como aplicações destes materiais a diferentes setores. Procurar-se-á, fazer uma abordagem mais aprofundada aos materiais compósitos de matriz termoplástica, processos de fabricos dos mesmos (principalmente da estampagem a quente) e aplicações dos materiais e processos. Será ainda apresentada neste capítulo, uma descrição do estado da arte do processo de estampagem a quente e de metodologias de desenvolvimento aplicadas ao projeto e do *software* usado para o DOE.

O terceiro capítulo procura apresentar as diversas etapas de desenvolvimento do projeto que conduzem à validação do mesmo, nomeadamente:

- Definição dos *inputs*, níveis e *outputs* a utilizar no *software* usado para o DOE;
- Definição da abordagem laboratorial;
- Produção de amostras;
- Recolha e tratamento de dados;
- Análise ANOVA e validação do processo.

O quarto capítulo serve essencialmente para serem feitas conclusões relativamente ao trabalho executado durante o decorrer do projeto e aos resultados finais, e para apresentação de possíveis trabalhos futuros.

1.4 Apresentação da empresa acolhedora

O INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial é um Centro de Interface Tecnológico (CIT), criado em 1986, vocacionado para a realização de atividades de investigação e de inovação de base tecnológica, transferência de tecnologia, consultoria e serviços tecnológicos, orientadas para o desenvolvimento da indústria e da economia em geral. O INEGI é uma instituição de utilidade pública, privada, sem fins lucrativos. Na Figura 2 encontra-se representado o logótipo do INEGI.



Figura 2 - Logótipo do INEGI

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Materiais e processos de fabrico de materiais compósitos
- 2.2 Materiais compósitos de matriz termoplástica
- 2.3 Técnicas de apoio ao desenvolvimento

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais e processos de fabrico de materiais compósitos

Os materiais compósitos consistem na combinação de dois ou mais materiais independentes numa unidade estruturalmente funcional [7]. Estes materiais têm sem dúvida garantido uma presença cada vez mais afirmada na indústria automóvel. Surge nos dias de hoje uma necessidade de aliar o desempenho dos automóveis à vertente ambiental, com a redução do consumo de combustível e o conseqüente aumento da eficiência, e ao mesmo tempo conciliar estas necessidades com interesses económicos [3, 8]. Do ponto de vista da engenharia, os materiais compósitos oferecem um amplo leque de propriedades mecânicas, físicas e térmicas, propriedades estas que não são encontradas nas ligas metálicas convencionais, cerâmicos ou polímeros, o que faz com que os compósitos sejam uma alternativa aos materiais utilizados atualmente no ramo automóvel [9]. Na Figura 3 encontra-se representada a tendência de utilização de materiais compósitos e plásticos em componentes automóveis nas últimas décadas.

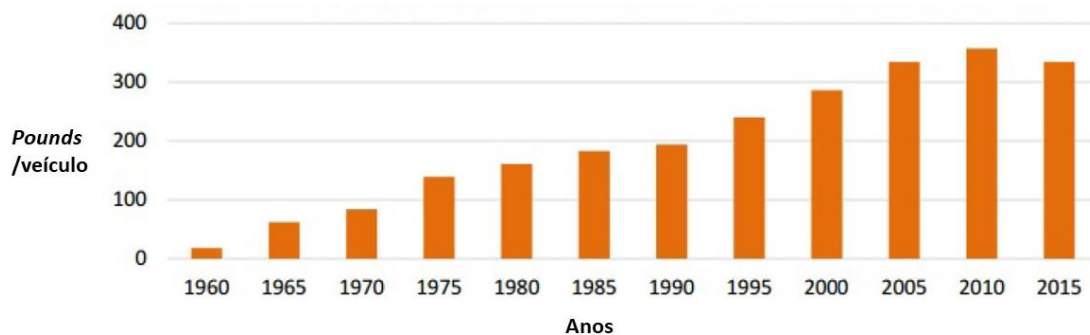


Figura 3 – Tendência de utilização de materiais compósitos e plásticos em componentes automóveis nas últimas décadas (pounds/veículo) [10]

Existe também uma procura de melhoria constante dos processos de fabrico de materiais compósitos. Um processo em que exista uma boa relação custo-eficiência e que seja confiável é uma peça chave na obtenção de um componente de qualidade e viável em termos económicos. Nos últimos anos, tem havido uma elevada procura de otimização de processos de fabrico no sentido de facilitar a produção em massa, principalmente na indústria automóvel, onde é essencial que haja esta capacidade de obtenção de grandes quantidades de componentes em prazos mais curtos [11].

Nos subcapítulos seguintes é apresentada uma revisão dos tipos de matrizes e reforços e também de processos existentes no fabrico de materiais compósitos, assim como as principais aplicações destes materiais.

2.1.1 Tipos de matrizes e reforços

A matriz é a responsável por manter os reforços e fibras juntos numa unidade estrutural. Esta protege ainda as fibras de danos exteriores, e transfere e transmite as cargas aplicadas entre elas. Em muitos casos, a matriz também contribui para a melhoria de propriedades como a dureza e ductilidade. A matriz e o reforço devem apresentar grande adesão entre eles de maneira a evitar problemas na sua interface, na maioria das vezes devido a altas temperaturas, mas também pela humidade ou por ataque químico à superfície [6, 7]. Na Figura 4 está presente a classificação das matrizes e reforços utilizados no fabrico de materiais compósitos.

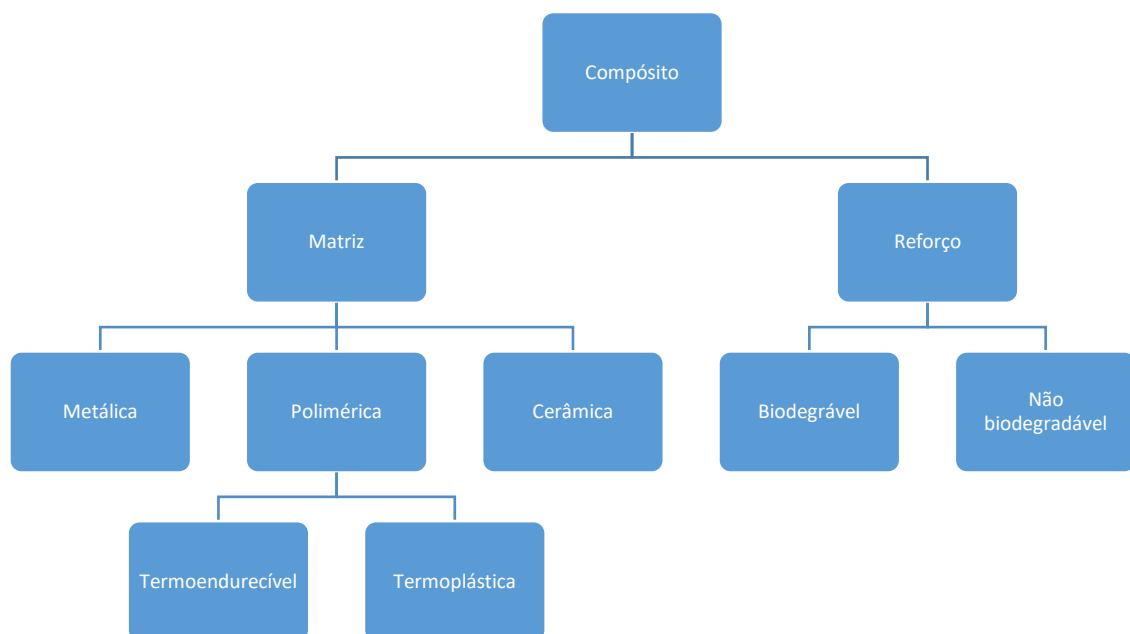


Figura 4 - Classificação de matrizes e reforços para compósitos poliméricos [12]

2.1.1.1 Matriz

A matriz pode ser de natureza polimérica, metálica ou cerâmica. No entanto, grande parte das matrizes usadas na indústria são de natureza polimérica. Estas últimas podem ser termoendurecíveis, as que apresentam maior utilização em compósitos, e ainda termoplásticas [13]. Será feita uma análise a estes dois tipos de matrizes poliméricas nos próximos subcapítulos.

2.1.1.1.1 Matriz termoplástica

Os termoplásticos baseiam-se numa cadeia polimérica em que a ligação não é reticulada, o que faz com que estes sejam mais macios e fundam a altas temperaturas, e voltem a ganhar dureza com o decréscimo de temperatura. Este tipo de matriz tem apresenta boa resistência a ataques químicos e boa estabilidade térmica. Os compósitos de matriz termoplástica podem ser divididos em três categorias:

- Compósitos de fibra curta, com fibras de comprimento inferior a 6,4 mm;
- Compósitos de fibra contínua;
- Compósitos de fibra longa, que apresentam propriedades mecânicas superiores relativamente aos de fibra curta [7, 14].

As principais vantagens da utilização de matrizes termoplásticas advêm do seu curto tempo de processamento, elevada resistência a danos, soldabilidade e reciclabilidade. Este tipo de matriz apresenta como desvantagens um pobre fluxo de fusão e a necessidade de serem processados a elevadas temperaturas [11, 15].

No caso particular dos termoplásticos, a estrutura pode ser amorfa, quando a estrutura cristalina do material se encontra dispersa, e semicristalina, quando as cadeias poliméricas se alinham de modo ordenado.

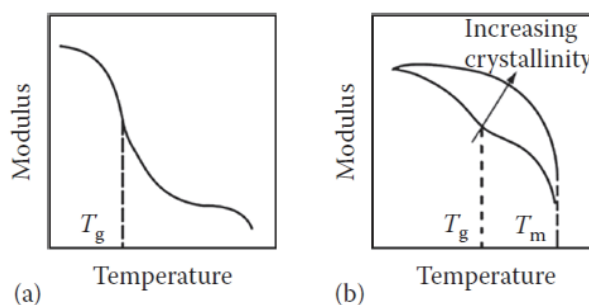


Figura 5 – Diagrama módulo de elasticidade à tração/temperatura de termoplásticos - (a) estrutura amorfa e (b) estrutura semicristalina [16]

Pode-se denotar na Figura 5 que nos termoplásticos de estrutura amorfa não é visível no diagrama uma temperatura de fusão (T_m), sendo apenas notável uma temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura a partir da qual o termoplástico passa de rígido a maleável. Esta temperatura nos termoplásticos de estrutura semicristalina aumenta com a cristalinidade do termoplástico. Por outro lado, o declive da curva entre a temperatura de transição vítrea e a temperatura de fusão é muito acentuado. O módulo de elasticidade a partir de T_g sofre uma descida também ela bastante acentuada.

Será feita então uma breve descrição das matrizes de natureza termoplástica mais utilizadas no subcapítulo 2.2.2.1.

2.1.1.1.2 Matriz termoendurecível

As matrizes termoendurecíveis são compostas por polímeros interligados por ligações reticuladas, onde as moléculas formam estruturas tridimensionais com bastante rigidez. Contrariamente às matrizes termoplásticas, estas não são reprocessáveis e decompõem-se a elevadas temperaturas devido à quebra das ligações covalentes existentes. Este tipo de matrizes, com a conjugação de fatores como aumento de pressão e de temperatura e por aplicação de agentes químicos apropriados, sofrem um endurecimento pelo processo de cura [14, 17]. Os termoendurecíveis são caracterizados também pela sua baixa viscosidade durante o processamento.

As matrizes termoendurecíveis oferecem vantagens quando utilizadas, como o facto de oferecerem maior resistência a altas temperaturas, maior resistência química e também maior dureza do que as matrizes termoplásticas. No entanto, estas apresentam desvantagens, como a necessidade de um maior tempo de processamento e maior dificuldade de controlo do processo [16, 18].

Na Tabela 1 é possível visualizar as propriedades das matrizes termoendurecíveis mais utilizadas.

Tabela 1 - Propriedades típicas de matrizes termoendurecíveis [14]

Resina	Poliéster ortoftálica	Poliéster isoftálica	Fenólica	Viniléster	Epóxida
HDT (°C)	66	93	250	102	110
Módulo de elasticidade à tração (GPa)	3,6	4,1	2,0	3,5	4,1
Tensão de rotura à tração (MPa)	55	65	32	82	125
Deformação na rotura à tração (%)	2,0	2,5	1,8	6,0	5,0

Nos termoendurecíveis, quanto maior for a densidade das ligações cruzadas existentes, menor será a diminuição do módulo de elasticidade à tração com o aumento da temperatura, o que é algo desejado na estrutura do compósito. Este comportamento pode ser observado na Figura 6.

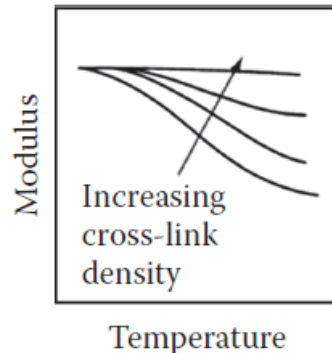


Figura 6 – Diagrama de módulo de elasticidade/temperatura de termoendurecíveis [16]

2.1.1.2 Reforços

Os reforços encontram-se frequentemente na forma de fibras que são dispersas na matriz e são o principal responsável por suportar as solicitações exercidas no compósito. Portanto, estas devem resistir a cargas elevadas e apresentar elevada rigidez, aliadas à capacidade de suportar elevadas temperaturas e a exposição ao ambiente [16, 19]. Na indústria, as fibras mais utilizadas como reforço são as fibras de vidro, carbono e as fibras aramídicas.

2.1.1.2.1 Fibra de vidro

As fibras de vidro são as utilizadas em maior escala no fabrico de materiais compósitos e apresentam vantagens como elevada resistência à tração, resistência química e boas propriedades isolantes, para além do baixo custo. Por outro lado, estas fibras pecam pelo módulo de elasticidade à tração relativamente baixo, elevada massa volúmica, sensibilidade à abrasão e baixa resistência à fadiga [11]. As fibras de vidro são sólidos amorfos compostos por sílica, apresentando-se maioritariamente na forma de dióxido de silício (SiO_2). Em compósitos estruturais são mais comumente usadas as fibras *E-glass* e as fibras *S-glass*. As fibras *E-glass* são as mais usadas, por apresentarem boas propriedades mecânicas e por ao mesmo tempo terem um preço mais baixo quando comparadas às *S-glass*. No entanto, as fibras *S-glass* têm melhores propriedades mecânicas e térmicas (cerca 40% mais resistência à tração e 20% maior módulo de elasticidade à tração), o que justifica o seu uso quando se pretende elevados desempenhos [7].

2.1.1.2.2 Fibras de carbono

As fibras de carbono têm elevada resistência e rigidez e são frequentemente utilizadas em aplicações estruturais e elétricas. Estas fibras apresentam um coeficiente de expansão térmica negativo e são geralmente definidas por apresentarem uma percentagem de carbono superior a 92% [20]. Tipicamente as fibras de carbono apresentam uma resistência à tração de aproximadamente 5000 MPa e uma rigidez em

torno dos 250 GPa, dependendo do precursor utilizado [21]. Os três precursores que dominam na indústria são o poliacrilonitrilo (PAN), o *rayon* e o *pitch* [22, 23].

2.1.1.2.3 Fibras de aramida

As fibras de aramida, tipicamente designadas por Kevlar, são fibras altamente cristalinas que têm no mercado a melhor relação resistência à tração/massa volúmica para fibras de reforço. São também fibras com boa resistência ao impacto e flexibilidade. Por isso, estas fibras são muito conhecidas no setor da balística e em usos militares, assim como na indústria aeroespacial, automóvel, entre outras. No entanto, são fibras quimicamente inertes nos compósitos, pelo que é necessário que se faça tratamento superficial para melhores desempenhos [11, 24, 25].

Na Tabela 2 são apresentadas as características típicas de algumas das fibras utilizadas no fabrico de materiais compósitos de matriz polimérica anteriormente referidas.

Tabela 2 - Propriedades de algumas fibras utilizadas no fabrico de materiais compósitos de matriz polimérica [16, 26]

Fibras	Massa volúmica (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade à tração (GPa)
<i>E-Glass</i>	2,54	3450	72,4
<i>S-Glass</i>	2,48	4300	86,9
Fibra de carbono (elevado módulo de elasticidade)	1,90	2100	390,0
Fibra de carbono (elevada resistência à tração)	1,90	2500	240,0
Fibra de aramida (Kevlar 49)	1,45	3620	131,0

2.1.2 Processos de fabrico comuns em materiais compósitos

Os processos de fabrico de um material compósito são também eles uma parte preponderante na obtenção de um compósito de qualidade e com as propriedades desejadas. A escolha de um processo de fabrico pode ser determinante no desempenho do componente, no sentido em que quanto melhor o processo escolhido, menores serão

os defeitos da peça final. Surgem, portanto, desafios na seleção do processo que melhor se adequa ao processamento dos compósitos, tanto nos compósitos de fibra curta como nos de fibra contínua. A procura da melhoria destes processos é importante para o desenvolvimento de novos materiais com custos cada vez mais baixos [27].

Na Tabela 3 estão apresentados alguns dos processos de fabrico de materiais compósitos de matriz polimérica mais comuns, assim como características dos mesmos, e ainda aplicações das peças obtidas por estes processos.

Tabela 3 - Processos de fabrico de componentes utilizando materiais compósitos de matriz polimérica e aplicações [16]

Processo	Matrizes mais comuns	Tipo de reforço utilizado	Equipamento ou ferramenta	Condições típicas do processo	Produtividade	Complexidade da peça	Exemplos de aplicações
Moldação manual + autoclave	Epóxida	Prepreg	Autoclave	120-175°C, 7 bar	Baixa	Painéis planos e curvos	Secções e painéis de asas de aeronaves
Enrolamento filamantar para termoendurecíveis	Epóxida	Tows de fibra seca, resina líquida	Enrolador filamantar	-	Média	Secções transversais ocas	Reservatórios de pressão, lâminas de helicóptero
Enrolamento filamantar para termoplásticos	PA	Tapes unidireccionais, termoplástico	Enrolador filamantar, tocha de aquecimento	-	Média	Secções transversais ocas	Reservatórios de pressão, Tubagens
Pultrusão	Poliéster	Rovings de fibra seca, resina líquida	Fieira, pultrusora	150°C	Alta	Secções transversais ocas e sólidas	Secções estruturais
Moldação por compressão	Poliéster	SMC	Prensa, molde	150°C, 60-150 bar	Alta	Formas complexas	Painéis de carroçaria automóvel
RTM	Poliéster, Epóxida	Pré-forma de fibra seca, resina líquida	Unidade de injeção, prensa de fixação, molde	25-40°C, 1-10 bar	Média	Formas complexas	Painéis de carroçaria automóvel, componentes para indústria aeronáutica

ATL/AFP	-	Tapes, tows de fibra seca	Rolo de consolidação, fonte de calor	-	Alta	Formas básicas ou complexas	Componentes para indústria aeronáutica e indústria automóvel
Estampagem a quente	PEEK	Pré- impregnado	Prensa, molde	380°C, 10 bar	Média	Painéis planos e curvos	Componentes para indústria aeroespacial e automóvel

Os processos podem, por norma, ser divididos em dois tipos: processos em molde aberto e processos em molde fechado. Os processos em molde aberto têm como desvantagem o facto de apenas ser possível fazer o controlo do acabamento de uma das superfícies. Este entrave é suprimido com a capacidade de este tipo de processos de conceber peças com geometrias complexas e de grandes dimensões. Os processos em molde fechado, ao contrário dos de molde aberto, conferem à peça excelente acabamento a ambas as superfícies, para além de garantirem ótima reprodutibilidade. Este tipo de processos define-se também por emitir menos produtos voláteis que são nocivos à saúde [14].

2.2 Materiais compósitos de matriz termoplástica

Como já foi referido no capítulo 2.1.1.1, os compósitos termoplásticos de matriz polimérica são fabricados a partir de termoplásticos de alto peso molecular. Após a fusão, os termoplásticos podem fluir através do reforço durante o processamento, sem que existam ligações reticuladas. A existência de ligações secundárias fracas permite que as cadeias moleculares se mantenham unidas [28]. Neste capítulo, será feita uma análise mais detalhada sobre os materiais compósitos de matriz termoplástica, os processos de fabrico destes materiais.

2.2.1 Enquadramento e motivação para utilização

No mercado atual, é necessário que os materiais respondam às necessidades impostas nos diferentes setores e que ao mesmo tempo exista um aumento da eficiência na produção dos mesmos. Esta eficiência pode depender de vários fatores e requisitos essenciais como a redução de custos de produção, a adaptabilidade dos materiais usados, a garantia de bom desempenho destes e os custos de operação no processo de fabrico [29]. Os materiais compósitos de matriz termoplástica conseguem atingir um equilíbrio em termos de eficiência de produção e qualidade do material, visto serem materiais em que o tempo de processamento é reduzido pela supressão da etapa de

polimerização, por serem recicláveis, por poderem ser facilmente moldáveis e também pela possibilidade de serem soldados, desde que o reforço utilizado não perturbe o bom funcionamento deste tipo de materiais. Estes materiais são ainda portadores de elevada resistência ao impacto, boa resistência química e tempo de conservação muito longo [6, 12].

Estas características têm levado à implementação dos compósitos termoplásticos em setores como o automóvel, principalmente em interiores automóveis, por oferecerem vantagens especialmente em consolidação de componentes, desenho modular e aplicações estéticas. No setor automóvel estes materiais podem ser encontrados, por exemplo, em *dashboards*, condutas de climatização, painéis interiores de portas, entre outros [30]. Na Figura 7 pode-se visualizar o exemplo de dois componentes automóveis feitos a partir de um material compósito de matriz termoplástica.



Figura 7 – Estrutura de *Airbag* de *nylon* (esquerda) e estrutura de *dashboard* em PP reforçados com fibra de carbono (direita) [31, 32]

2.2.2 Materiais de matriz e reforço

2.2.2.1 Tipos de matrizes termoplásticas

Neste subcapítulo, será feita uma breve análise aos diferentes tipos de matriz termoplásticas utilizadas no processamento de materiais compósitos.

Polipropileno (PP)

O propileno é um termoplástico com um ponto de fusão relativamente baixo, a rondar os 170°C, e é também um dos mais usados industrialmente. Este polímero define-se pela elevada estabilidade química, dureza, rigidez, resistência ao calor e tenacidade. O seu grande consumo fez com que fossem geradas quantidades exageradas de resíduos sólidos, nefastos para o meio ambiente por terem como base o PP, que apresenta elevado peso molecular e conseqüente dificuldade de degradação [33].

Poliamida (PA)

Estes polímeros são normalmente designados por *nylon* e podem ter diferentes designações (6,11,66) de acordo com a amida que lhes deu origem. Eles destacam-se pela elevada flexibilidade, tenacidade e resistência à tração, boa resiliência e baixo coeficiente de atrito [14, 34]. Este tipo de matriz pode ser aplicado no setor automóvel,

por exemplo, em painéis interiores de portas, encostos de bancos e em aventais de para-choques [6].

Policarbonato (PC)

Os policarbonatos têm uma estrutura cristalina, resultante da reação de compostos de dihidróxido aromático com ácido carbônico amorfo e destacam-se pelo bom isolamento elétrico, clareza ótica, dureza, tenacidade e resistência à corrosão. Este tipo de matriz termoplástica é comumente utilizado em estruturas que requerem boa estabilidade a raios ultravioleta, transparência e resistência ao calor. O policarbonato tem bastante utilização nos setores automóvel e aeroespacial [14, 35].

Poli-éter-éter-cetona (PEEK)

Este tipo de polímero apresenta uma excelente biocompatibilidade, resistência térmica e química e resistência à fadiga, e é por isso um polímero de alta qualidade. No entanto, também apresenta um elevado custo. O PEEK aplica-se a uma grande variedade de setores como o aeroespacial, elétrico e eletrônico, biomédico, entre outros [36]. Este polímero revela uma temperatura de fusão elevada, o que o torna mais difícil de manipular termicamente.

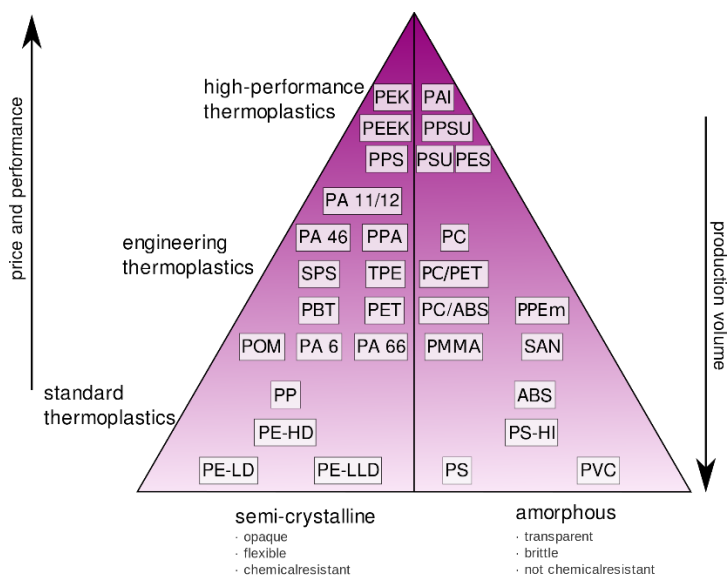


Figura 8 - Esquema da relação preço/desempenho na produção em massa de termoplásticos [37]

Na Figura 8 pode ser observada a relação existente entre o preço e desempenho de diferentes tipos de termoplásticos e a capacidade de produção em massa de cada um. Pode denotar-se, que quanto melhor for o desempenho do termoplástico maior será o preço do mesmo.

Na Tabela 4 estão apresentadas as propriedades típicas de algumas matrizes termoplásticas.

Tabela 4 - Propriedades típicas de matrizes termoplásticas [14]

Polímero	Tipo	T_g (°C)	T_m (°C)	HDT (°C)		Módulo de elasticidade à tração (GPa)		Tensão de rotura à tração (MPa)		Deformação na rotura à tração (%)	
				NR	R	NR	R	NR	R	NR	R
PC	A	150		132	149	2,4	9,0	65	131	125	2,5
PP	C	-10	165	53	151	1,4	5,9	24	83	400	2,3
PA66	C	50	265	90	252	2,9	9,0	83	172	200	4,0
PSU	A	190		175	185	2,5		70	120	3	1,5
PEI	A	220		204	210		9,0		200		
PI	A	280		270	275						
PPS	C	130	280	137	265	3,3	11,0	74	130	110	1
PEEK	C	150	310	148	286		9,0	98	190		

A – Amorfo; C - semicristalino; R reforçado com 30% de fibra curta de vidro; NR não reforçado

HDT – *Heat Deflection Temperature* (Temperatura de serviço)

2.2.2.2 Tipos de reforços utilizados em materiais compósitos termoplásticos

Neste subcapítulo, serão apresentados alguns tipos de fibras utilizadas como reforço. Irá ser feita uma abordagem às fibras *E-glass*, fibras de carbono, fibras de aramida do tipo Kevlar 49 e fibras *Ultra-High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE). Estes são alguns tipos de fibras tipicamente utilizadas no reforço de materiais compósitos termoplásticos [38].

Fibras *E-glass*

Este tipo de fibras é utilizado em materiais compósitos termoplásticos, quando se deseja alta dureza e resistência elétrica. As fibras *E-glass* podem conter pequenas percentagens de boro na sua composição. No entanto, é preferível que estas fibras não o contenham por não serem amigas do ambiente. Estas fibras podem ser utilizadas para a produção em massa de componentes como por exemplo para-choques de automóveis, condutas, capacetes de soldadura, entre outros tipos de componentes, demonstrando uma grande

versatilidade de aplicações. As fibras *E-glass* também surgem aliadas a matrizes de alto desempenho para aplicações na indústria aeronáutica [6].

Fibras de carbono

As fibras de carbono são fibras com um teor de carbono igual ou superior a 90%. Como já foi referido no subcapítulo 2.1.1.2.2, estas fibras destacam-se dos outros tipos de fibras, por apresentarem alta resistência à tração, elevada rigidez, baixa densidade e boa resistência química. Estas fibras são de grande atratividade na produção de compósitos de matriz termoplástica, principalmente quando aplicados ao setor automóvel, onde as características destes materiais são ideais a nível do desempenho. As fibras de carbono são muitas vezes utilizadas para a produção de materiais compósitos em forma de pré-impregnados [39].

Fibras Kevlar 49

As fibras Kevlar são fibras sintéticas aramídicas bastante resistentes, que podem ser utilizadas no fabrico de compósitos. As fibras Kevlar 49 são a versão de alto módulo de elasticidade das fibras Kevlar, e são tipicamente aplicadas a cabos e cordas. Estas fibras podem suportar elevados impactos e são caracterizadas por terem uma elevada resistência à tração tendo em conta a sua reduzida massa, características que fazem com que apresentem um preço relativamente elevado. Como tal estas fibras são bastante utilizadas em aplicações de alto/médio desempenho como para fins aeroespaciais [6, 40].

Fibras UHMWPE

Estas fibras de natureza polimérica são consideradas ideais para reforço em materiais compósitos termoplásticos por terem uma elevada resistência mecânica específica, boa tenacidade, resistência à água e humidade e pela elevada resistência química. Para um bom desempenho destas fibras, é necessário que haja uma boa aderência entre elas e a matriz. As fibras UHMWPE são muito utilizadas em setores como a indústria marinha, aeroespacial, automóvel e no caso particular da indústria militar onde são bastante aplicadas em armaduras tanto em armadura pessoal como em armaduras de veículos [41-43].

2.2.2.3 Tipos de arquiteturas dos reforços

Os reforços podem ser obtidos com diversas formas, desde fibras contínuas ou descontínuas, fibras alinhadas unidirecionalmente e ainda na forma de produtos têxteis dentro dos quais existem manta, tecido e *braided* [44].

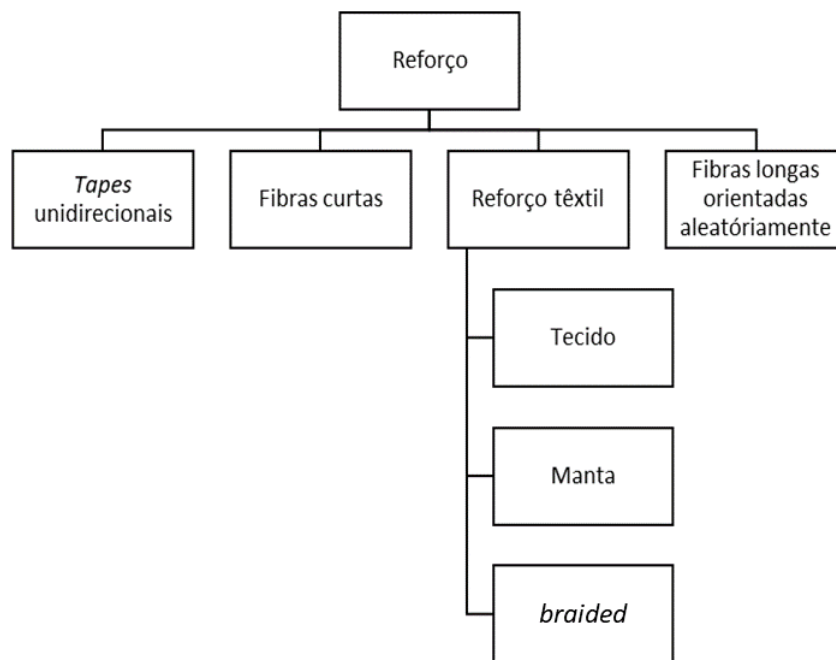


Figura 9 - Tipos de arquiteturas de reforços utilizados em compósitos termoplásticos [45]

Na Figura 9 constam alguns dos tipos de reforços mais utilizados no fabrico de materiais compósitos de matriz termoplásticas.

2.2.3 Processos de fabrico para compósitos de fibra contínua e matriz termoplástica

Neste capítulo serão abordados alguns processos de fabrico, com utilização comum na obtenção de materiais compósitos de matriz termoplástica, e que utilizam como reforço fibras contínuas.

2.2.3.1 Enrolamento Filamentar

O enrolamento filamentar é uma técnica utilizada com bastante frequência no fabrico de materiais compósitos termoplásticos. Com o passar do tempo e com a necessidade de evolução no processamento de compósitos, a maquinaria e os controlos eletrónicos utilizados também tiveram de se desenvolver para permitir mais graus de liberdade de modo a permitir formas e padrões mais complexos. Mesmo assim este processo de fabrico ainda não consegue apresentar tantos graus de liberdade como outros utilizados para a obtenção de compósitos de fibra contínua [46]. O processo utilizado para termoplásticos é demonstrado na Figura 10.

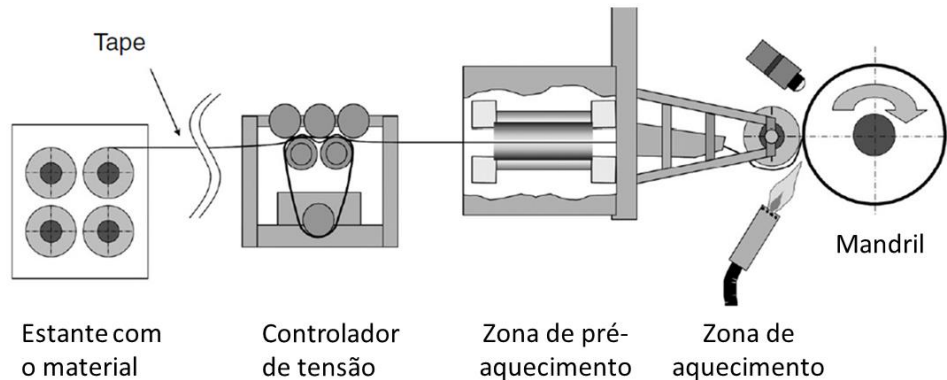


Figura 10 - Processo de enrolamento filamentar [47]

No enrolamento filamentar, o desenrolamento do reforço nas bobinas cria uma tensão, que pode ser intencional ou não intencional. O controlador de tensão pretende regularizar e homogeneizar a tensão aplicada de modo a obter condições de enrolamento constantes. Posteriormente o material passa por uma unidade de pré-aquecimento, principalmente quando existe uma elevada velocidade processo ou uma elevada temperatura de fusão do material ou então quando o equipamento de aquecimento principal tem um desempenho debilitado. O material é aquecido até uma temperatura próxima da temperatura de fusão, sofrendo um arrefecimento já na parte exterior da unidade de pré-aquecimento, sendo sujeito de seguida a uma pressão de consolidação e posterior aquecimento na zona de aquecimento antes de sofrer enrolamento no mandril [47]. É um processo muito utilizado em *pipelines* e tanques de armazenamento, geralmente caracterizados pela forma tubular [48].

2.2.3.2 Automated Tape Laying (ATL)

O processo ATL é um processo muito bem estabelecido na produção de materiais compósitos termoplásticos de fibra contínua. Neste processo, as *tapes* unidireccionais são dispostas sobre um molde com o recurso a um sistema de rolo carregado, com ângulos de articulação variáveis, de acordo com a complexidade da peça a ser obtida. O processo ATL consiste essencialmente nos mesmos princípios de moldação manual, mas apresenta vantagens como a produção de peças maiores a velocidades mais elevadas e com um maior controlo do processo comparativamente ao processo de *lay-up* manual. As técnicas atualmente utilizadas neste processo permitem um controlo mais preciso das etapas de posicionamento, corte e orientação das *tapes*, com o objetivo de poderem ser utilizados reforços com maior complexidade [49]. No ATL o material não é consolidado, apenas soldado por pontos, e necessita de um ciclo de consolidação em prensa de pratos quentes para que sejam obtidos *blanks* consolidados [50]. Por norma, no processo de ATL são utilizadas *tapes* largas para aumentar a produtividade do processo e *tapes* mais estreitas quando se pretende aumentar a complexidade da peça e ao mesmo tempo diminuir o desperdício de material [51].

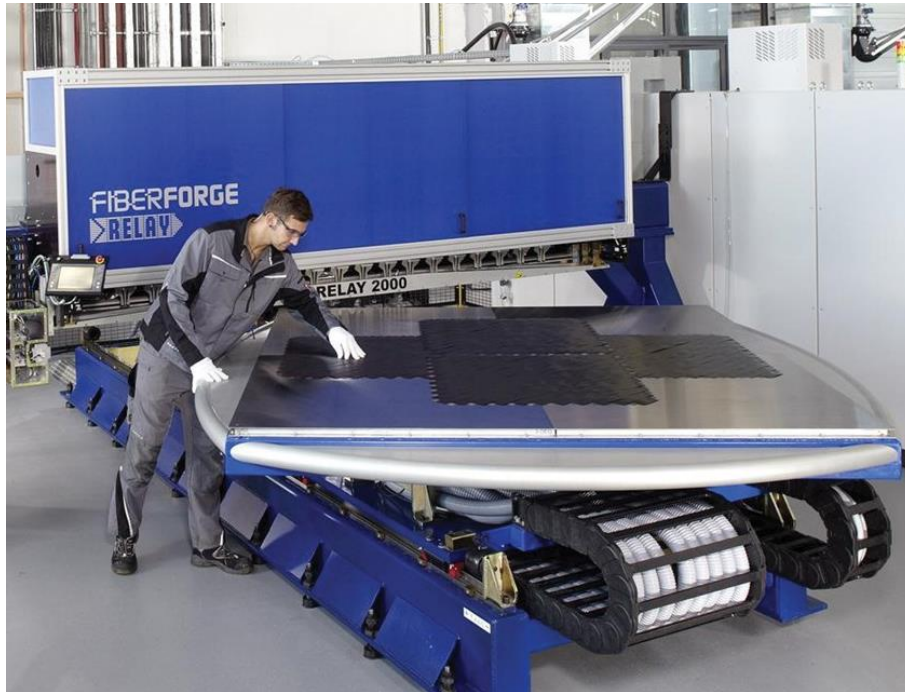


Figura 11 - Equipamento utilizado no processo ATL [52]

Na Figura 11 pode ser observado o equipamento utilizado no processo ATL e o posicionamento do mesmo durante o processo.

2.2.3.3 *Automated Fiber Placement (AFP)*

O processo AFP surgiu nos anos 80, como uma alternativa às limitações dos processos de enrolamento filamentar e *Automated Tape Laying (ATL)*. Este processo tem sido identificado como importante na produção de materiais compósitos, com a oferta de elevadas taxas de produção e boa qualidade final, embora apresente elevados custos de implementação. O processo divide-se em quatro etapas principais:

- Fornecimento do material e planeamento da trajetória de colocação do material;
- Aquecimento do material;
- Aplicação de pressão;
- Compactação do material na superfície do molde.

O processo AFP inclui a colocação de bandas ou fitas pré-impregnadas, o que permite uma produção altamente automatizada e de grande rapidez de fabrico de laminados de dupla curvatura. A posição exata de contorno pretendida do mandril é programada para a máquina do processo AFP, que apresenta movimentação em múltiplos eixos. A consolidação do material neste processo é feita *in-situ* [53, 54]. A Figura 12 apresenta o processamento feito numa máquina de AFP.

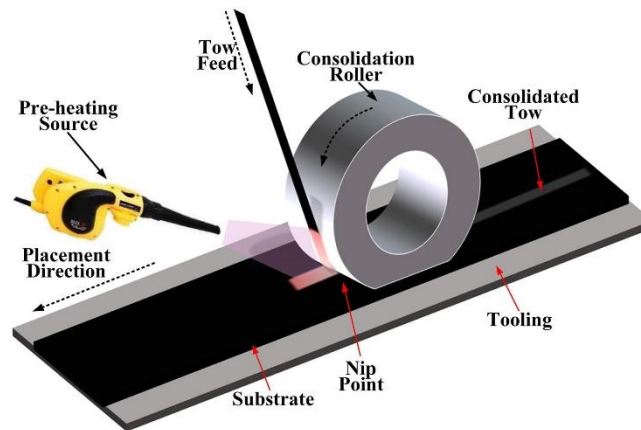


Figura 12 - Processo AFP [55]

Este processo permite processar uma vasta gama de compósitos termoplásticos, desde os mais básicos aos mais técnicos. Pode ser aplicado a uma vasta gama de setores e melhorar os níveis de desempenho, como por exemplo na indústria aeroespacial e também em casos mais específicos, como no setor eólico, onde este processo tem sido utilizado no fabrico de pás para turbinas eólicas [56].

2.2.4 Estampagem a quente para compósitos de fibra contínua

O processo de estampagem a quente encontra-se representado na Figura 13. Este processo, como variante da moldação por compressão, consiste em aquecer o material de matriz termoplástica até à sua temperatura de fusão, e de seguida transferir o material para o molde com o formato final da peça desejada, onde ocorre a termoformação do compósito através da pressão exercida pelo contra-molde.

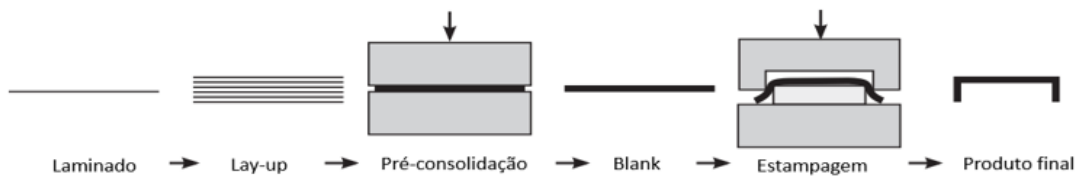


Figura 13 - Estampagem a quente [57]

O tempo de transferência do material após o aquecimento para o molde deve ser mantido curto para que seja evitado um arrefecimento excessivo do material e uma consequente redução da formabilidade do mesmo. Após o processamento, a peça é deixada a arrefecer e o molde é aberto, para que a peça seja retirada. Antes de todo este procedimento, é necessário efetuar o corte das *tapes* unidirecionais pré-impregnadas e empilhá-las em camadas, normalmente com o auxílio de processos como o processo de AFP e ATL, de acordo com as orientações pré-definidas, que vão determinar as propriedades mecânicas a obter. De seguida, as camadas anteriormente empilhadas são consolidadas, normalmente com recurso a uma prensa de pratos

quentes, dando origem ao laminado denominado *blank*. No final da estampagem a quente, é comum efetuar o procedimento complementar de sobre-injeção do componente obtido. Para proceder à injeção, é necessário remover os excessos da peça consequentes da estampagem. Após a remoção de excessos, a peça é colocada no molde de injeção para se proceder à injeção. Normalmente, este processo é feito para dar um melhor acabamento à peça e abre também a possibilidade de criar zonas de espessura superior à do *blank* e de incluir insertos metálicos na peça que servirão, em algumas situações, como pontos de encaixe/fixação [6]. O processo de estampagem + sobre-injeção pode ser feito de forma *one-shot*, aumentando contudo a complexidade do molde a utilizar [58]. A preferência pela utilização de pré-impregnados unidirecionais advém da inexistência de ondulações da fibra aquando da sua utilização [59].

O processo de estampagem a quente apresenta como vantagens [6]:

- Tempo de ciclos curto;
- Elevados rendimentos dos componentes fabricados, próximos dos obtidos com a utilização de metais;
- Baixa percentagem de rejeição de peças;
- Possibilidade de obter peças de elevadas dimensões;
- Poucos custos em mão de obra;
- Preços finais atrativos.

Na Figura 14 observa-se uma peça obtida através do processo de estampagem a quente.



Figura 14 – Peça obtida por estampagem a quente [60]

No fabrico de peças por estampagem a quente podem ser utilizadas algumas das matrizes termoplásticas enunciadas anteriormente como o PEEK, PP e PA6 [16]. Estas matrizes, são normalmente associadas a fibras de carbono e de vidro e apresentam elevada rigidez, elevada resistência à fratura e à compressão, boa resistência à fadiga e ao impacto e boa resistência química [61].

Este é um processo que se mostra muito promissor na indústria dos transportes, tanto pela preocupação ambiental em torno dos materiais tipicamente utilizados nos transportes, como pelo aumento do preço dos combustíveis, cujo efeito pode ser minimizado pelo uso de materiais compósitos resultantes deste processo [27].

A Tabela 5 apresenta o estado-da-arte do processo de estampagem para processamento de materiais compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibra contínua.

Tabela 5 - Estado-da-arte de estampagem a quente de compósitos de matriz termoplástica de fibra contínua

Artigo	Descrição
<p data-bbox="268 719 432 857">Slange et al. [62] (2019)</p>	<p data-bbox="486 394 1355 1182">Neste artigo foi proposta uma sequência de processo para fabrico de um componente compósito termoplástico solicitado por carga na qual a peça é obtida, primeiro por ATL e AFP, e logo depois por estampagem a quente. O estudo foca-se principalmente na execução de uma moldação rápida por <i>tapes</i> pré-impregnadas através de ATL e AFP e no processo de estampagem obter a qualidade final da peça compósita de PEEK reforçada com fibra de carbono. O estudo experimental explica ainda as diferenças entre o material pré e pós-consolidado. No final, foram tiradas as conclusões de que o pré impregnado utilizado tem um papel fundamental nas variações de espessura da peça final e no processo de consolidação final e que se pode obter uma qualidade final significativa com a sua utilização. O aumento da temperatura do <i>blank</i> e da pressão na estampagem a quente melhoraram a qualidade da consolidação final do <i>blank</i>. Este estudo também conclui que a utilização de ferramentas não-isotérmicas, como ferramentas de aquecimento de indução e arrefecimento a água, possibilitam taxas de aquecimento e arrefecimento elevadas e consequentemente tempos de ciclo curtos.</p>
<p data-bbox="256 1536 443 1675">Mattner et al. [63] (2020)</p>	<p data-bbox="486 1234 1355 1977">Este estudo procura justificar primeiramente o uso limitado de processos de estampagem para produções em massa, pelo facto de serem processos com elevados custos de maquinaria e ferramentas para processamento. Sugere-se então a utilização combinada de uma ferramenta simples para arrefecimento e de tempos de termoformação menores para reduzir custos de processamento. Também se propõe aumentar a capacidade de utilização de máquinas de estampagem para obtenção de materiais compósitos termoplásticos reforçados com fibra contínua. Com a utilização da ferramenta de arrefecimento e com o aumento da velocidade de formação para 3 m/s, foi possível observar um melhor acabamento superficial e um grau de consolidação maior sem nenhum dano detetado da fibra. Foi concluído que estas alterações ao processo permitiram um processo com menos custos e de boa fiabilidade. No entanto, é também de realçar que, para um bom controlo do processo, é necessário ter conhecimentos extensivos do comportamento de formação a diferentes velocidades e temperaturas.</p>

Jiang et al. [64]
(2020)

No artigo em questão é referida a grande importância que materiais híbridos começam a revelar nas aplicações de redução de peso. Estes materiais híbridos consistem em materiais compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibra contínua, aos quais é injetado um reforço de fibras descontínuas com recurso ao processo de estampagem a quente com sobre-injeção. O objetivo desta operação passa por obter uma boa força de ligação na interface do material. Para tal é necessário que seja feita uma análise à forma como os diferentes parâmetros influenciam as características interfaciais durante a formação de uma interface heterogénea. Durante a análise foi percebido que o processo de fusão e de injeção influenciam positivamente as propriedades da interface do material compósito híbrido. Também foi possível concluir que a energia relativa às interações não ligadas representa uma função determinante do processo de fratura da interface não heterogénea, e que o mecanismo de ligação interfacial de compósitos híbridos é causado pela difusão de moléculas na interface.

Suresh e Kuman
[65]
(2018)

Neste artigo é investigada a influência dos parâmetros da estampagem a quente na formabilidade dos compósitos termoplásticos. Esta análise é feita a partir do método Taguchi recorrendo à análise relacional *grey*. Para este estudo foram consideradas como respostas o rácio de formação do processo e a deformação logarítmica da espessura. A análise de variância permitiu concluir que a temperatura do molde era um dos fatores que mais influenciava a formabilidade do processo por reduzir a resistência ao fluxo entre o *blank* aquecido e o molde, mas com uma diminuição da flange nas peças. Como fatores secundários são considerados, a força exercida pelo molde superior, que ao ser aumentada reduz ligeiramente o rácio de formação, mas aumenta a qualidade do perfil obtido, e a temperatura do *blank*, a qual se concluiu ter um efeito insignificante nas características de desempenho. Com o recurso à análise relacional *grey* ainda concluído que os valores ótimos dos parâmetros seriam de:

- 170°C, para a temperatura do molde;
- 200°C, para a temperatura do *blank*;
- 2 kN, para a força aplicada no molde.

2.3 Técnicas de apoio ao desenvolvimento

Neste capítulo são apresentadas algumas metodologias capazes de auxiliar no processamento de materiais compósitos, tais como a utilização do *software* Design Expert V13® e do método Taguchi para otimização de eficiência de processos.

2.3.1 Método Taguchi

O método Taguchi, também por vezes denominado por método de *design* robusto, é uma poderosa técnica de otimização de processos/peças e tem como princípio fundamental aumentar a eficiência dos mesmos através da redução do número de testes necessários sem que seja necessário eliminar parâmetros [66]. A abordagem do método Taguchi passa por avaliar o comportamento do sistema em estudo o melhor possível, de acordo com a aproximação das propriedades e dimensões ideais da peça [67].

Mesmo sabendo que devem ser seguidas várias etapas com uma ordem específica, o método Taguchi não define uma estratégia fixa a ser utilizada na sua aplicação. Na Figura 15 encontra-se representado um exemplo do procedimento usado no método Taguchi.

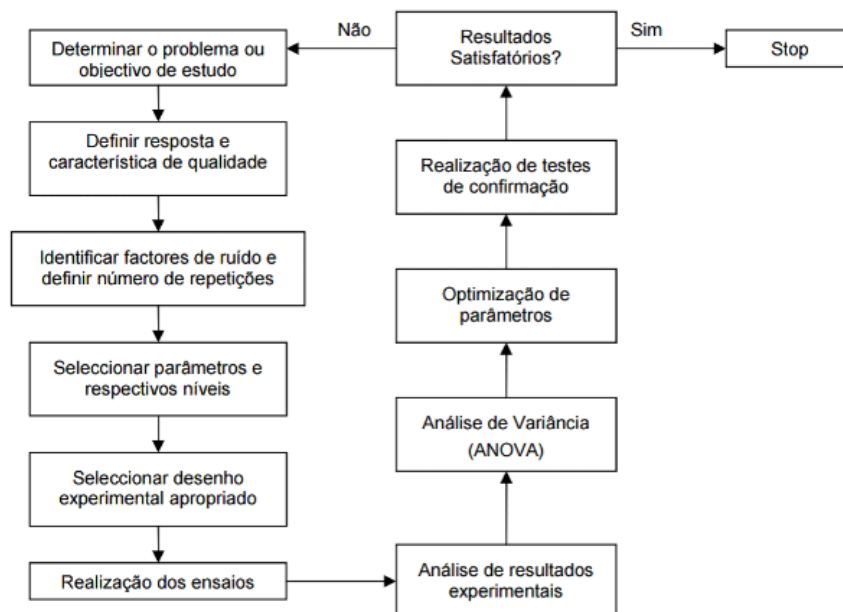


Figura 15 - Procedimento do método Taguchi [68]

O método de Taguchi é baseado no conceito de quantificar objetivamente o desempenho de um determinado sistema, e transforma as repostas na relação S/N com o objetivo de maximizar o desempenho. No método de Taguchi, a relação S/N é a medida do desvio do valor da resposta relativamente ao valor esperado, onde o sinal representa o valor médio, e o ruído representa o termo do desvio padrão. A relação S/N

do método Taguchi foi inicialmente usada para medir como a resposta se altera sob diferentes condições de ruído. Quanto maior for a relação S/N, menor é o efeito do fator de ruído e vice-versa [67, 69].

O desenho de experiências (DOE) é uma técnica estatística utilizada na análise de problemas de qualidade e de melhoria contínua no desempenho de um processo produtivo. Ao ser aplicado na fase de concepção, o DOE permite determinar quais os fatores de controlo, as interações e os fatores de *noise* responsáveis por afetar determinadas características do produto assim como os melhores níveis desses fatores [70]. Para tornar a prática do desenho de experiências, uma das partes fundamentais do método Taguchi, mais atrativa a nível industrial, Taguchi propôs uma abordagem que se define em alguns pontos [71]:

- Definição da qualidade – A peça/processo deve apresentar consistência no seu desempenho, ou seja, apresentar a menor variação possível em torno dos valores desejados. Para tal os níveis devem ser ajustados para que o desempenho seja o mais próximo possível do desejado;
- Desenho de experiências normalizado – Utilização dos arranjos ortogonais, que representam os fatoriais fracionários e são usadas na maioria dos DOE;
- Estratégia do *Design* Robusto – Procura a utilização de experiências de menor dimensão para um largo número de fatores de ruído, melhorando o desempenho por reduzir as variações em torno do objetivo final;
- Função de perda – Fórmula matemática que permite quantificar a melhoria em termos monetários. Pode ser aplicada ao DOE para exprimir as reduções de custos;
- Análise S/N – A utilização da relação S/N facilita a análise do DOE testes de amostras múltiplas. A análise da transformação logarítmica dos resultados em termos da relação S/N melhora a previsão de melhoria dos resultados.

2.3.2 Análise ANOVA e correlação

A análise ANOVA é uma ferramenta de tomada de decisão objetiva e baseada em estatística para detetar quaisquer diferenças no desempenho médio dos grupos de artigos testados. Este tipo de análise ajuda a testar formalmente o significado de todos os fatores principais e as suas interações [72]. Articulado com o método Taguchi, a análise ANOVA, é um método estabelecido para verificar a contribuição percentual de cada parâmetro do processo para o resultado desejado [73]. A análise de variância pode também ser uma forma de resumir um modelo de regressão linear através da decomposição da soma dos quadrados para cada variação no modelo e, recorrendo ao teste F, testar a hipótese de que qualquer fonte de variação no modelo é igual a zero (Figura 16).

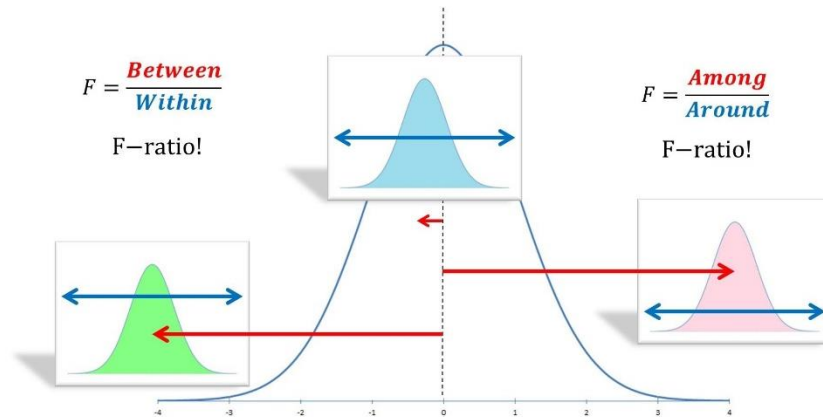


Figura 16 - Ilustração simples do princípio de funcionamento da análise ANOVA [74]

2.3.3 Software de implementação DOE (Design Expert V13®from StatEase)

O Design Expert é um *software* estatístico fornecido pela StatEase Inc., utilizado especificamente para realizar o DOE. Este software oferece testes comparativos, triagem, caracterização, otimização, *designs* de parâmetros robustos e misturas e ainda *designs* combinados e apresenta bons assistentes de *design* e *layouts* intuitivos [75].

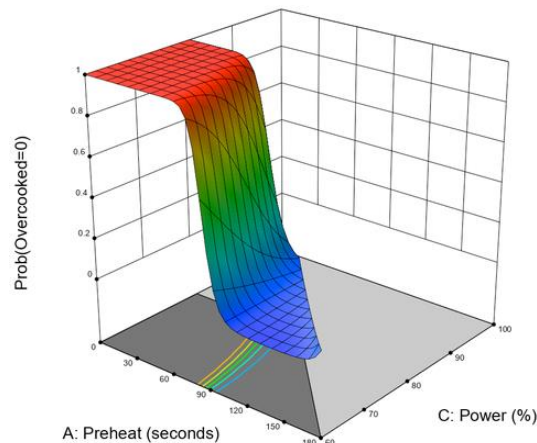


Figura 17 - Exemplo de funcionalidade do software Design Expert V13®[76]

O Design-Expert facilita a análise dos resultados ao exaltar dados estatisticamente significativos e ajuda também a perceber como pode a modelação ser feita de modo mais preciso. O *software* também apresenta uma vasta gama de modelos de gráficos, como por exemplo o gráfico apresentado na Figura 17, que ajudam a identificar os destaques existentes da análise resultante e a visualizar os resultados de forma mais clara [76]. A versão 13 do Design Expert contém algumas novidades em termos de funcionalidades. A regressão de *poisson* é uma nova adição às técnicas de análise existentes que permite uma análise mais precisa dos dados de contagem. Foram ainda acrescentadas novas ferramentas de traçado geral, características de importação de dados, entre outras [77].

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Caracterização da entidade acolhedora
- 3.2 Objetivos do trabalho
- 3.3 Requisitos e limitações do trabalho
- 3.4 *Know-how* existente
- 3.5 Planificação das experiências
- 3.6 Material utilizado
- 3.7 Processo de estampagem a quente
- 3.8 Medições e resultados experimentais
- 3.9 Análise ANOVA

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Caracterização da entidade acolhedora

O INEGI é um Instituto de novas tecnologias, situado na interface Universidade – Indústria e vocacionado para a realização de atividade de investigação e de inovação de base tecnológica, e transferência de tecnologia orientada para o tecido industrial. A Figura 18 apresenta as instalações do INEGI.



Figura 18 - Edifício do INEGI

O INEGI nasceu em 1986 no seio do que são hoje os Departamentos de Engenharia Mecânica (DEMec) e de Engenharia e Gestão Industrial (DEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Com a figura jurídica de Associação Privada sem Fins Lucrativos, o estatuto de «Utilidade Pública» e uma equipa própria de 200 colaboradores, assume-se como um agente ativo no desenvolvimento e consolidação de um modelo competitivo baseado no conhecimento, na densidade tecnológica dos produtos e processos, e na inovação de base tecnológica.

O INEGI desenvolve atividades de investigação, inovação e transferência de tecnologia, consultoria e serviços para um conjunto alargado de mercados e sectores de atividade, tendo já acumulados mais de 25 anos de experiência em projetos com empresas e em consórcios nacionais e internacionais.

O instituto tem uma tradição de prestígio nas áreas dos materiais e estruturas compósitas. Os trabalhos que tem desenvolvido nesta área, como os projetos da garrafa de gás Pluma, as colaborações com a ESA e a NASA, entre outros, demonstram o enorme *know-how* do INEGI nesta área. O INEGI apresenta soluções para o desenvolvimento de aplicações onde o fator leveza tem um peso decisivo. O Instituto domina técnicas que envolvem materiais laminados em compósito, betões poliméricos, fibras de vidro e carbono, e apresenta competências para o desenvolvimento de produtos, soluções estruturais avançadas, bem como implementação de novas tecnologias de fabrico de materiais. Dispõe de vários laboratórios para ensaios de materiais, tais como reação dos materiais ao fumo e fogo, termomecânicos, envelhecimento, deformabilidade, dureza, fadiga, entre outros.

3.2 Objetivos do trabalho

Com este trabalho é pretendido compreender a influência dos parâmetros do processo de estampagem a quente de compósitos termoplásticos de fibra de carbono contínua na qualidade no produto final. Este objetivo é conseguido através de uma análise correlacional de resultados recorrendo ao método Taguchi e à análise de variância levada a cabo no *software* Design Expert V13® (DX13). Pretende-se também identificar uma solução ótima para este processo e os respetivos valores dos *inputs* a implementar para que tal se concretize, com base nos valores das respostas obtidas após todo o processo. É também de elevada importância entender o pré-processamento, o processo de estampagem a quente em si, assim como todas as etapas que estes englobam, e como estes influenciam os resultados finais obtidos. Finalmente, ainda se pretende compreender o funcionamento do *software* DX13 e da aplicação do método Taguchi.

3.3 Requisitos e limitações do trabalho

Definiu-se que, para este trabalho, um dos requisitos principais seria apresentar um estudo aprofundado dos parâmetros do processo de estampagem a quente de compósitos de matriz termoplástica PA6 com reforço de fibra de carbono. Este estudo deverá culminar na apresentação de valores ótimos das variáveis em foco para o processo de estampagem a quente deste tipo de materiais, a serem implementados no *setup* de estampagem do INEGI, para posterior validação desta análise e obtenção de componentes com propriedades e características superiores.

A principal limitação deste trabalho foi a disponibilidade do equipamento para a processamento dos *blanks* a serem analisados, desde a prensa de pratos quentes até ao *setup* de estampagem a quente, por naturalmente haver projetos a decorrer ao mesmo tempo que o desenvolvimento da dissertação e que apresentam prioridade interna relativamente à mesma. Estas limitações levaram a que a conclusão do trabalho fosse remetida para datas mais distantes do que as expetáveis.

3.4 *Know-how* existente

O INEGI tem a capacidade de processar e caracterizar compósitos termoplásticos com reforço de fibra, desde o estado de *tapes* pré-impregnadas até ao produto final. A linha de equipamento instalada para o desenvolvimento de processos e técnicas de termoformação é o principal capacitador técnico de processamento e caracterização de compósitos termoplásticos e divide-se nas seguintes secções:

- *Setup* de *lay-up* automatizado (ATL);
- Prensa de pratos quentes;
- *Setup* de estampagem capaz de realizar as etapas de aquecimento, transporte e consolidação;
- *Setup* de consolidação *in-situ* à escala laboratorial.

Alguns dos recursos técnicos possuídos pelo INEGI para o processamento de materiais compósitos termoplásticos enunciados encontram-se representados na Figura 19.

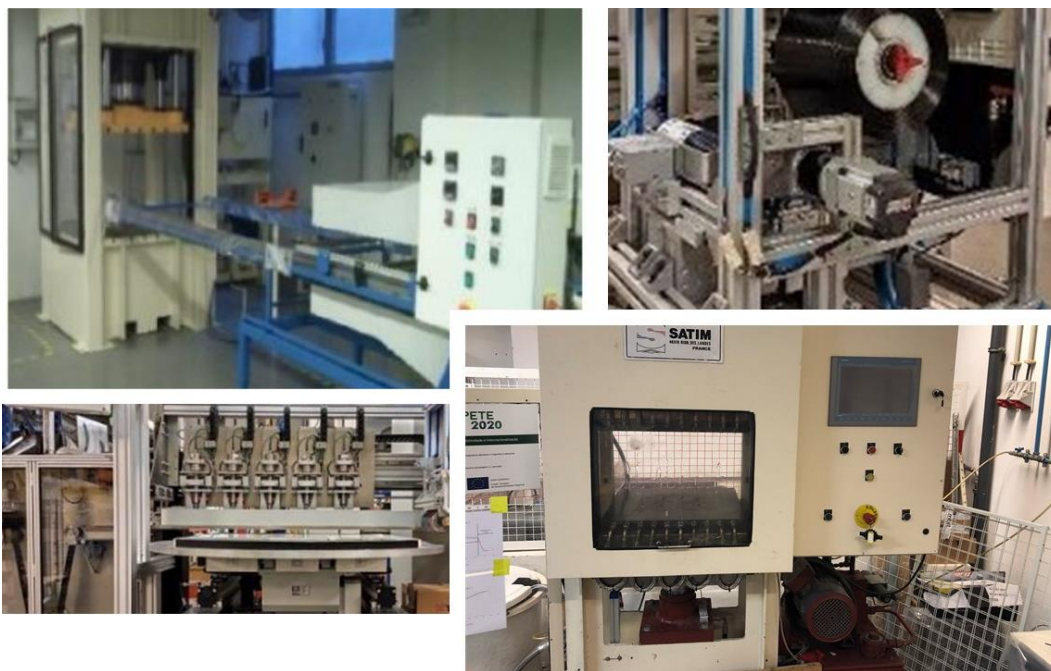


Figura 19 - Recursos técnicos do INEGI para o processamento de materiais compósitos termoplásticos

Estes *setups* compreendem toda uma linha de produção de compósitos termoplásticos à escala laboratorial. Esta linha de produção permite produzir peças compósitas segundo condições de processamento totalmente passíveis de serem definidas, controladas e monitorizadas pelo utilizador.

3.5 Planificação das experiências

Tendo em atenção as características do material como o ponto de fusão, a temperatura de transição vítrea e as temperaturas padrão de processamento, a capacidade da prensa e a constante elástica das molas responsáveis por criar a tensão do *blank-holder*, determinaram-se os *inputs* a serem implementados assim como os respetivos níveis.

3.5.1 Técnica utilizada

A definição do desenho de experiências tomou por base o método de Taguchi e a ortogonalidade das matrizes por este propostas. De entre as diferentes matrizes ortogonais tipicamente utilizadas e considerando o processo em questão, as suas variáveis e ainda o intervalo temporal admissível para a realização desta dissertação, foi adotada a matriz ortogonal L9. Esta matriz é caracterizada pela inclusão de 4 variáveis de análise, com 3 níveis cada, o que perfaz um total de nove espécimes. Desta forma, para cada nível de qualquer parâmetro, todos os 3 níveis dos restantes parâmetros são testados. Este tipo de análise revelou-se mais desejável do que a tradicional análise fatorial completa por reduzir o tempo de análise e os custos associados aos ensaios, visto que o número de ensaios a realizar é consideravelmente menor, sem que seja comprometida a confiabilidade dos seus resultados e consequentes conclusões. Ao utilizar-se a análise fatorial completa, o número de ensaios necessários aumentaria para 81.

$$N = L^P = 3^4 = 81 \quad (1)$$

L = Número de níveis; P = Número de parâmetros; N = Número de ensaios

Para que fosse atingido o desejado rigor estatístico associado a uma generosa quantidade de dados a serem analisados, foi definido que cada um dos nove espécimes deveria idealmente apresentar duas réplicas processadas segundo as mesmas condições, ou seja, deveriam existir três espécimes de similar processamento, conduzindo a um total de 27 espécimes. No entanto, devido a complicações existentes na fase de consolidação, apenas foram aproveitados 18 espécimes.

3.5.2 Software para análise de dados

Para o tratamento dos dados utilizou-se o *software* Design Expert V13®. Este *software* oferece melhorias significativas associadas a produtos ou processos pela triagem dos fatores considerados essenciais, por caracterizar as interações entre variáveis de entrada (*inputs*) e respostas (*outputs*), permitindo assim definir a solução ótima. Na Figura 20, pode observar-se um exemplo de como é efetuada a implementação de dados no *software* DX13.

Run	Factor 1 A:A	Factor 2 B:B	Factor 3 C:C	Factor 4 D:D	Response 1 R1	Response 2 R2	Response 3 R3
1	Level 1 of A	Level 1 of B	Level 1 of C	Level 1 of D			
2	Level 1 of A	Level 2 of B	Level 2 of C	Level 2 of D			
3	Level 3 of A	Level 2 of B	Level 1 of C	Level 3 of D			
4	Level 2 of A	Level 2 of B	Level 3 of C	Level 1 of D			
5	Level 3 of A	Level 3 of B	Level 2 of C	Level 1 of D			
6	Level 1 of A	Level 3 of B	Level 3 of C	Level 3 of D			
7	Level 2 of A	Level 1 of B	Level 2 of C	Level 3 of D			
8	Level 3 of A	Level 1 of B	Level 3 of C	Level 2 of D			
9	Level 2 of A	Level 3 of B	Level 1 of C	Level 2 of D			

Figura 20 - Exemplo de implementação de uma matriz ortogonal L9 no *software* DX13

O *software* oferece uma interpretação visual intuitiva através de gráficos. Também permite, para cada resposta, atribuir um valor de importância relativa. Através do cruzamento de todas as respostas e atendendo a estas mesmas importâncias relativas, é possível definir os valores ótimos das variáveis analisadas. Na Figura 21 estão exemplificados alguns desses gráficos.

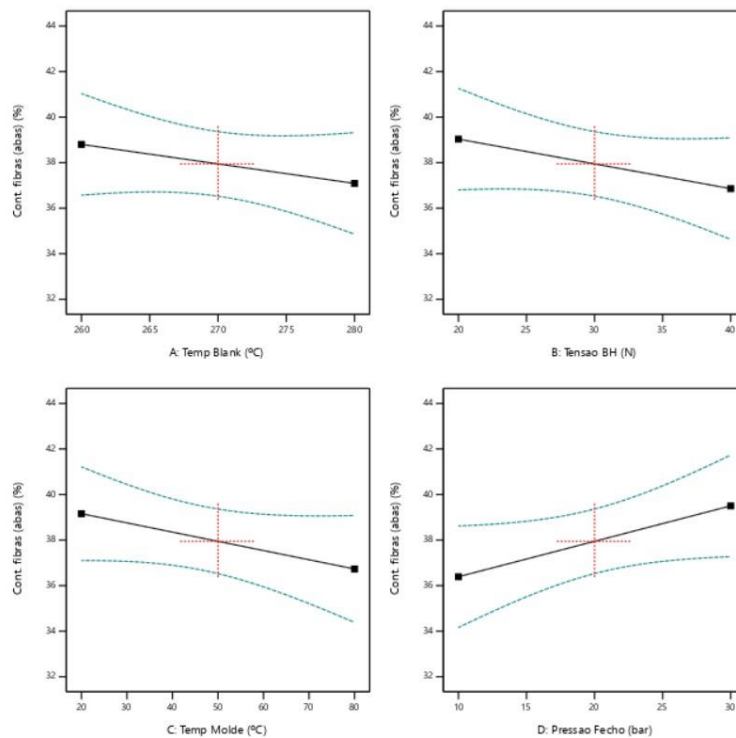


Figura 21 - Exemplo de gráficos obtidos com a utilização do *software* DX13

3.5.3 Definição das variáveis e respetivos níveis

Para o estudo e otimização do processo de estampagem a quente de materiais compósitos de matriz termoplástica com reforço de fibra de carbono, definiram-se como parâmetros de análise a temperatura do *blank*, a tensão no *blank-holder*, a temperatura do molde e a pressão de fecho. Estes são os parâmetros que previsivelmente têm maior

influência na qualidade do produto final produzido pelo processo de estampagem a quente de compósitos termoplásticos.

Os parâmetros e os respectivos níveis definidos foram os seguintes:

a. Temperatura do *blank*

1. 260°C;
2. 270°C;
3. 280°C.

Os valores deste parâmetro foram definidos de acordo com a temperatura de fusão do material e a temperatura de processamento do mesmo indicada pelo fabricante (249-271°C). Como resultado da experiência dos orientadores do INEGI, que acompanham o processo e o *setup* de estampagem, foi decidido que temperaturas superiores às definidas não seriam exploradas. Esta escolha prende-se com a elevada probabilidade de deterioração do material o que inviabiliza a sua análise e conduziria ao fabrico de componentes de qualidade inferior.

b. Tensão do *blank-holder*

1. 20 N;
2. 30 N;
3. 40 N.

Para a tensão do *blank-holder* os fatores mais importantes são a constante elástica da mola e o alongamento inicial da mesma. Com base na constante elástica de 0,0671 N/mm (obtida experimentalmente pela equipa do INEGI para as molas utilizadas) e tendo em conta o seu alongamento inicial, definiu-se que a pré-tensão máxima a ser aplicada no *blank* era de 40 N, obtida com a utilização de duas molas em paralelo. Sendo assim, para a tensão de 20 N utilizou-se apenas uma mola. Para a tensão de 30 N, fixaram-se os parafusos em pontos mais afastados da extremidade do carro com duas molas em paralelo. A montagem em paralelo das molas faz com que a constante de rigidez das molas aumente para o dobro, visto que as molas apresentam a mesma constante de rigidez. Isto leva a que a tensão aplicada, quando se utilizam as duas molas em paralelo, seja o dobro da aplicada apenas com uma mola. Como existem 4 pontos de fixação em cada *blank*, a tensão final resulta da soma das tensões instaladas em cada ponto. Na Figura 22 encontra-se representada a exemplificação da instalação das molas no *blank-holder*.

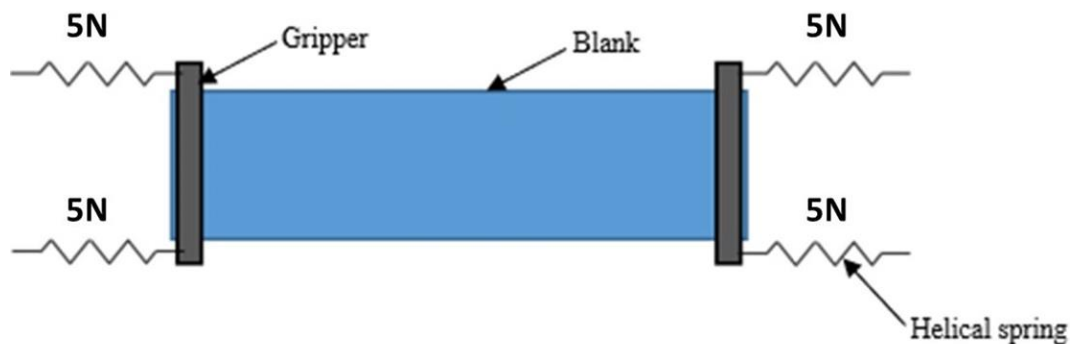


Figura 22 - Exemplo da configuração das molas no *blank-holder*

c. Temperatura do molde

1. 20°C;
2. 40°C;
3. 80°C.

Como variável de análise e para o presente estudo foram considerados dois casos que englobam os três níveis:

- Molde não aquecido (utilizado à temperatura ambiente que foi adquirida como sendo cerca de 20°C);
- Molde aquecido, primeiramente a 40°C e posteriormente a 80°C, visto que se pretendia analisar o comportamento do material a temperaturas próximas da sua temperatura de transição vítrea (60°C).

d. Pressão de fecho

1. 10 bar;
2. 20 bar;
3. 30 bar.

Decidiu-se utilizar os valores apresentados de pressão de fecho, com base na experiência e *know-how* do INEGI adquirida em estampagens anteriores de geometrias igualmente simples e considerando *blanks* da mesma espessura. O conjunto *setup*-molde utilizado não permite a monitorização da pressão ao nível do material, sendo os valores previamente apresentados alusivos à pressão hidráulica exercida pelo mecanismo. Portanto, foi definido que seriam utilizados valores com um intervalo constante entre si, o que representa um fator relevante para o estudo na análise DOE.

3.5.4 Definição da matriz de ensaios

Como referido no capítulo 3.5.1, o planeamento dos ensaios executados definiu-se de acordo com as matrizes ortogonais de Taguchi para o caso da existência de 4 parâmetros e 3 níveis, resultando assim numa matriz L9. Na Figura 20 encontra-se presente uma matriz ortogonal L9 de 4 parâmetros e 3 níveis segundo as matrizes ortogonais do método Taguchi [78].

Taguchi, $P = 4, L = 3$					
Run #	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>X</i>
1	1	1	1	1	X_1
2	1	2	2	2	X_2
3	1	3	3	3	X_3
4	2	1	2	3	X_4
5	2	2	3	1	X_5
6	2	3	1	2	X_6
7	3	1	3	2	X_7
8	3	2	1	3	X_8
9	3	3	2	1	X_9

Figura 23 – Matriz de ensaios L9 do método Taguchi [78]

De seguida, por substituição numérica dos valores dos níveis e parâmetros anteriormente apresentados na matriz ortogonal L9, idealizou-se a matriz de ensaios a serem realizados, que se encontra representada na Tabela 6, com 2 blocos de repetição, cada um com 9 ensaios.

Tabela 6 – Matriz de ensaios adotada para a experiência

Ensaio	Temperatura do <i>blank</i> (°C)	Tensão do <i>blank-holder</i> (N)	Temperatura do molde (°C)	Pressão de fecho (bar)
A1	260	20	20	10
B1	260	30	40	20
C1	260	40	80	30
D1	270	20	40	30
E1	270	30	80	10
F1	270	40	20	20
G1	280	20	80	20
H1	280	30	20	30
I1	280	40	40	10

A2	260	20	20	10
B2	260	30	40	20
C2	260	40	80	30
D2	270	20	40	30
E2	270	30	80	10
F2	270	40	20	20
G2	280	20	80	20
H2	280	30	20	30
I2	280	40	40	10

Como se pode notar na Tabela 6, os ensaios 1-9 apresentam os mesmos valores de parâmetros dos ensaios de 10-18, uma vez que os ensaios devem repetir-se uma vez para uma maior fiabilidade dos dados fornecidos pela análise de variância. Pode verificar-se também a característica citada no capítulo 3.5.1 relativa às matrizes ortogonais do método Taguchi, na medida em que, para cada nível do parâmetro da temperatura do *blank*, todos os 3 níveis dos restantes parâmetros são testados.

A nomenclatura apresentada consiste no formato x1 e x2, onde os termos 1 e 2 se referem ao primeiro e segundo grupo de amostras, respetivamente, e o termo “x” se refere à amostra que corresponde a cada conjunto de variáveis definidas.

3.6 Material utilizado

3.6.1 Escolha do material

O material escolhido para a realização deste trabalho foi um pré-impregnado unidirecional de matriz termoplástica PA6 com reforço de fibra de carbono, fornecido em forma de rolo pela *Toray (TenCate Cetex® TC910)*. Neste trabalho foi utilizado um rolo como o representado na Figura 24, com uma largura de 166 mm e 0,16 mm de espessura por camada.



Figura 24 – Rolo de pré-impregnado unidirecional *TenCate Cetex® TC910* [79]

3.6.2 Caracterização/propriedades mais relevantes

O material selecionado oferece excelentes propriedades mecânicas, apresenta uma elevada resistência ao desgaste, ao impacto e a solventes e tem bom desempenho a temperaturas elevadas. As principais propriedades do material encontram-se representadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades do material de matriz PA6 reforçado com fibra de carbono (*TenCate Cetex*® TC910) [79]

Propriedades	
Fração mássica de matriz termoplástica PA6 (%)	40
Massa volúmica (g/cm ³)	1,45
T_g (°C)	60
T_m (°C)	233
Temperatura de processamento (°C)	249-271
Resistência à tração a 0° (MPa) (1)	1900
Módulo de elasticidade a 0° (GPa) (1)	100
Resistência à compressão a 0° (MPa) (1)	375
<i>Short Beam Shear</i> (MPa)	43

(1) 0° refere-se à direção das fibras, e constitui a direção de maior resistência mecânica

Em função das características enunciadas, este material pode ser aplicado ao setor automóvel, dos transportes e industrial. Na Figura 25 encontram-se exemplos de aplicações do *TenCate Cetex*® TC910.



Figura 25 - Exemplos de aplicações do *TenCate Cetex*® TC910 [79]

Na bibliografia, é possível encontrar outros estudos onde o *TenCate Cetex*® TC910 foi utilizado, nos quais é feita uma análise à utilização deste material e retiradas conclusões

finais sobre a qualidade do mesmo para os resultados desejados. Na Tabela 8 encontram-se dois estudos em que o *TenCate Cetex*[®] TC910 é utilizado.

Tabela 8 - Estudos em que são utilizadas *tapes* de *TenCate Cetex*[®] TC910

Harrison et al. [80] Neste trabalho, é explorada a viabilidade do aquecimento, formação e consolidação de laminados em geometrias complexas com a utilização de *tapes* unidirecionais de PA6 com fibra de carbono (*TenCate Cetex*[®] TC910). Foi concluído, neste trabalho, que o uso de aquecimento por indução acoplado com intercamadas de estanho consiste no método mais rápido e eficaz de aquecer o laminado a partir do interior. Foi também sugerido neste estudo que é possível atenuar os defeitos de enrugamento em peças complexas com múltiplas cavidades através das intercamadas de estanho fundido, devido ao seu efeito lubrificante.

Matsuo et al. [81] No trabalho em questão, foi estudada a influência das condições de *gripping* e do tipo de matriz nas propriedades de tração em compósitos termoplásticos reforçados com fibra de carbono unidirecional. Para este estudo, foram efetuados ensaios de tração com e sem a utilização de abas para o *gripping* dos laminados. Utilizaram-se dois tipos de *tapes* com diferentes matrizes: *TenCate Cetex*[®] TC910, de matriz PA6, e *TenCate Cetex*[®] TC960, de matriz PP. Concluiu-se que, nas *tapes* de *TenCate Cetex*[®] TC910, a não utilização de aba, causou variações nas tensões de rotura do laminado. Concluiu-se também que para este tipo de laminados o *gripping* deve ser feito sem abas pois facilita a preparação do espécime.

3.6.3 Processo de fabrico pré-estampagem

Foi necessária, antes do processo de estampagem, a preparação de todo o material para obtenção dos *blanks*. Esta preparação envolveu as fases de corte de material, empilhamento, consolidação, corte dos *blanks* e furação dos mesmos.

3.6.3.1 Empilhamento

A primeira etapa do procedimento consistiu na preparação do material necessário para prosseguir com o empilhamento. Efetuou-se por isso o corte do material com as

dimensões necessárias para atingir as dimensões do empilhamento desejadas para consolidação (166×400 mm²). Podem ser observadas as *tapes* pós-corte na Figura 26.

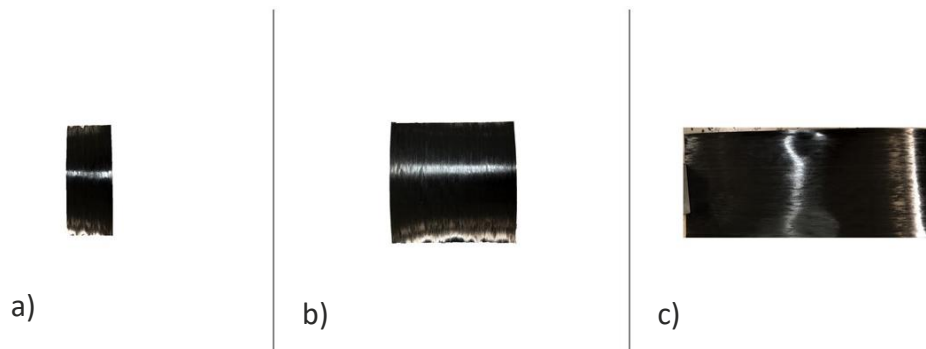


Figura 26 - Diferentes tipos de cortes de material: a) camada de 166×68 mm², b) camada de 166×166 mm² e c) camada de 166×400 mm²

A etapa seguinte do procedimento prático consistiu no empilhamento das camadas de material que dão origem ao *blank*. Considerando o gap do molde de 4,3 mm, definiu-se que o empilhamento deveria ter uma espessura final de 4,8 mm para que, após o processo de consolidação, esta fosse similar ao gap do molde, podendo o *blank* ser posteriormente utilizado no molde da prensa de estampagem. Como tal, sabendo que o material apresenta uma espessura de 0,16 mm, os empilhamentos devem ser constituídos por 30 camadas, para assim atingir os 4,8 mm. Foi definido que a sequência de empilhamento seria:

$$[0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}]_s$$

Adotou-se esta sequência de empilhamento por apresentar apenas camadas a 0° e a 90°, o que facilitou o corte das camadas e conferiu boas propriedades mecânicas em ambas as direções do *blank*. Pode ser observado na Figura 27, um exemplo de empilhamento final.



Figura 27 - Exemplo de empilhamento

Tendo já a sequência de empilhamento definida e o material cortado com as devidas dimensões, foi necessário fixar as camadas umas às outras para que no momento de efetuar a consolidação do material, as camadas fossem consolidadas com a orientação correta. Para tal utilizou-se um sonotrodo para soldar as camadas em pontos dispostos em diferentes zonas do material. Na Figura 28 estão representados o processo de soldadura manual das camadas de material (a) e o sonotrodo de ultrassons (b).



Figura 28 – a) Processo de soldadura manual das camadas de material e b) sonotrodo utilizado

3.6.3.2 Consolidação

A próxima etapa do procedimento prático consistiu em consolidar os empilhamentos de modo a obter *blanks* de 4,3 mm de espessura (valor equivalente ao gap do molde), necessários para a etapa subsequente de estampagem a quente. Para a consolidação do material, utilizou-se a prensa de pratos quentes do INEGI. O processo de consolidação dividiu-se nas seguintes etapas:

- Aquecimento dos pratos até 275°C através do controlo de temperatura da prensa;
- Preparação do material para efetuar a consolidação (colocação de uma camada de teflon diretamente no prato inferior da prensa, posicionamento das barreiras responsáveis por condicionar a espessura do *blank* juntamente com o empilhado e, por último, colocação de outra camada de *teflon* no topo), como pode ser observado na Figura 29;



Figura 29 - Colocação do material empilhado na prensa

- Fecho da prensa com uma pressão de controlo de 28 bar que corresponde a uma pressão de 5 bar no material (esta diferença de valores de pressão deve-se à relação entre a área do atuador da prensa e a área do laminado);
- Consolidação segundo um estágio de 1 minuto a 275°C e 5 bar;
- Arrefecimento lento a ar comprimido até 150°C;
- Arrefecimento rápido a água até aproximadamente 50°C;
- Abertura da prensa e remoção do *blank* (Figura 30).

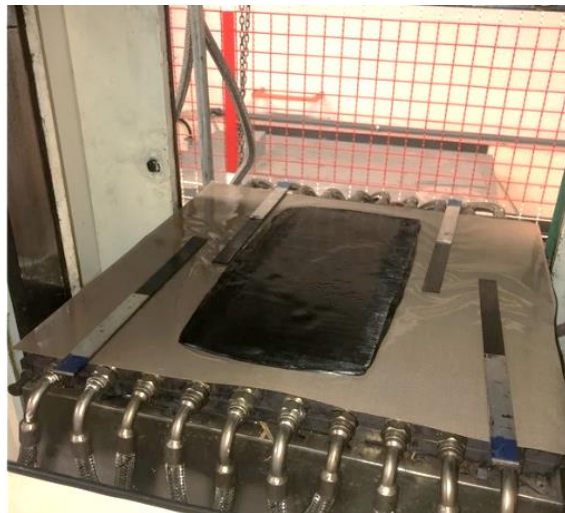


Figura 30 - *Blank* pronto a ser retirado

3.6.3.3 *Medições de espessura do blank*

Retirado o *blank*, foi necessário iniciar a preparação para a estampagem a quente. Como tal, a etapa seguinte foi a de corte de material excessivo dos *blanks* através da serra de corte. Para auxiliar o corte dos *blanks* efetuou-se a devida marcação dos

mesmos tendo em atenção o correto alinhamento das fibras em função da geometria pretendida. O corte do *blank* está representado na Figura 31 e o *blank* depois do corte na Figura 32.



Figura 31 – Corte dos *blanks*

Uma vez efetuado o corte dos *blanks* passou-se à recolha das espessuras das laterais dos mesmos, de maneira a verificar que não existem desvios que tornem inviável a sua utilização.



Figura 32 – *Blank* pós-corte

Por outro lado, também se pretendia que estas medidas pudessem ser utilizadas como termo de comparação para as medidas de espessura dos *blanks* depois de estampados. Utilizou-se assim o micrómetro para efetuar as medições de espessura. Para auxiliar nas medições foram efetuadas marcações de 8 pontos no lado esquerdo e 8 no lado direito em cada *blank* com disposição concordante com a observada na Figura 33.

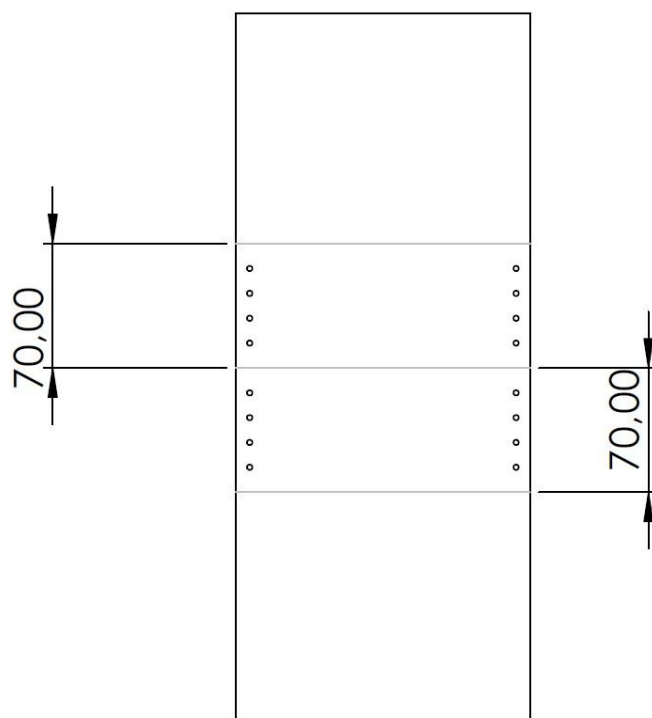


Figura 33 - Disposição dos pontos utilizados para medição de espessura

Estas marcações podem ser observadas na Figura 34.

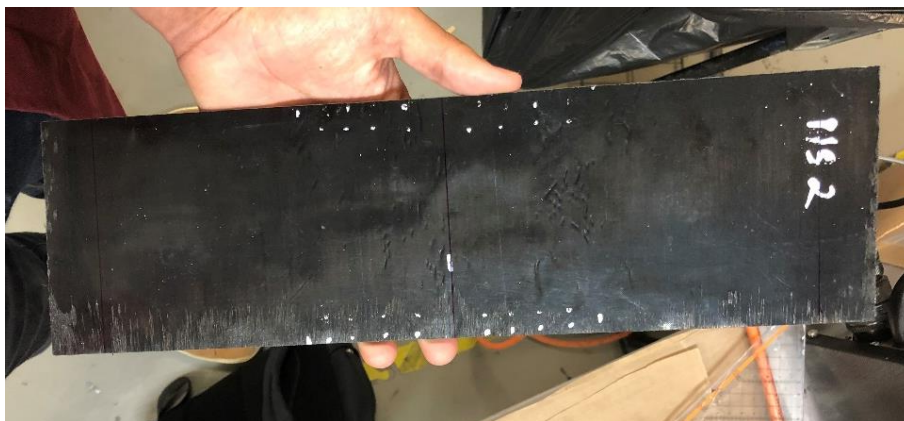


Figura 34 - *Blank* devidamente marcado

De seguida, procedeu-se à medição da espessura do *blank* nos pontos assinalados, como se observa na Figura 35. Foi utilizado para este efeito um micrómetro digital Mitutoyo com erro de $\pm 0,001$ mm.



Figura 35 - Utilização do micrómetro para medição da espessura do *blank*

Depois da espessura de todos os *blanks* ser medida procedeu-se à análise dos dados. Na totalidade foram fabricados 26 *blanks*, sendo que para o estudo em questão apenas 18 deles foram estampados e analisados. A análise das espessuras permitiu observar que alguns dos *blanks* não cumpriam os requisitos necessários para avançar para a fase de estampagem. Excluíram-se por isso os *blanks* que apresentavam menores espessuras, sendo que todos os *blanks* excluídos apresentavam espessuras de pelo menos um dos lados abaixo de 4 mm. Estes *blanks* iriam ter influência negativa na precisão de resultados devido à disparidade de espessuras que apresentam. Os valores das espessuras dos *blanks* e respetivas amostras correspondentes encontram-se representados na Tabela 9.

Tabela 9 - Espessura dos *blanks*

<i>Blank</i>	Amostra correspondente	Espessura média do lado esquerdo (mm)	Espessura média do lado direito (mm)
1	Não admitido	3,990	3,866
2	F2	3,744	4,289
3	Não admitido	3,891	3,509
4	G2	3,941	4,272
5	I1	4,058	4,213
6	D2	4,239	4,121
7	E1	4,033	4,070
8	A1	4,249	4,286
9	Não admitido	3,974	3,850

10	B2	4,074	4,046
11	F1	4,254	4,072
12	Não admitido	3,909	4,094
13	Não admitido	3,810	3,929
14	Não admitido	3,844	3,817
15	C1	4,183	4,010
16	Não admitido	3,999	3,766
17	I2	4,066	4,281
18	E2	4,275	3,792
19	Não admitido	3,947	3,873
20	G1	4,332	3,872
21	H1	4,239	4,330
22	C2	4,100	4,250
23	D1	4,265	4,271
24	A2	3,993	4,333
25	H2	4,193	4,020
26	B1	4,196	3,902

3.6.3.4 Preparação para estampagem

Após realizadas todas as medições de espessura necessárias, procedeu-se à preparação dos *blanks* de modo a serem colocadas no *setup* de estampagem. Para tal, efetuaram-se marcações de acordo com o representado na Figura 36.

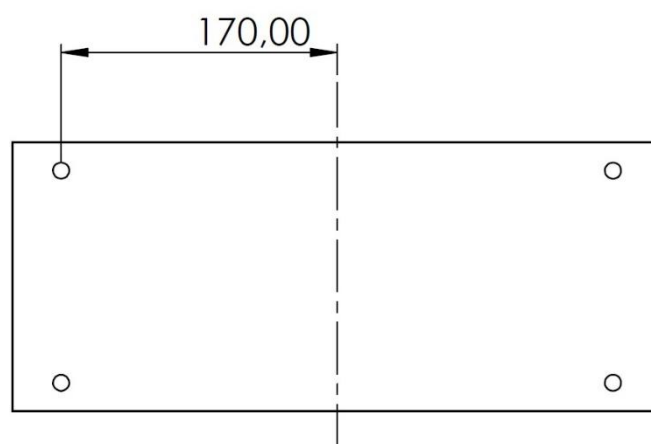


Figura 36 - Posição dos pontos de furação no *blank*

A definição destes pontos refere à sua furação posterior que servirá como ponto de *gripping* e considerou as dimensões do molde para que, aquando da estampagem, os *grippers* não se encontrassem dentro do molde e o processo de estampagem a quente não fosse comprometido. Após as marcações prosseguiu-se com a furação do *blank* nos pontos indicados na Figura 36. Estas furações, que estão representadas na Figura 37, efetuaram-se nos pontos onde posteriormente se colocaram as chapas que no seu conjunto correspondem ao *blank-holder*, que é o responsável por manter o *blank* na posição correta no momento de estampagem.



Figura 37 - *Blank* com furações e preparado para estampagem

Cada *blank* foi posteriormente colocado no *blank-holder*.

3.7 Processo de estampagem a quente

O processo de estampagem a quente efetuado no *setup* do INEGI revelou-se bastante rápido e automatizado, com ciclos bastante curtos e facilmente controlados através dos diferentes sistemas de monitorização e controlo implementados.

3.7.1 Equipamento utilizado

Neste subcapítulo é feita uma descrição dos equipamentos utilizados no processo de estampagem a quente, prensa hidráulica, molde, forno de aquecimento e *blank-holder* e *setup* de estampagem, todos eles pertencentes ao INEGI.

3.7.1.1 Prensa hidráulica

A prensa utilizada para efetuar a consolidação do *blank* na estampagem a quente apresenta pratos de dimensões $1 \times 1 \text{ m}^2$ e é capaz de aplicar forças de fecho até 200 toneladas. O controlo da força/pressão a exercer pela prensa é bastante automatizado, e é efetuado através de um painel de controlo onde é possível inserir o valor desejado de pressão. A prensa utilizada está representada na Figura 38.



Figura 38 - Prensa utilizada para estampagem a quente no INEGI

3.7.1.2 Molde

O molde utilizado apresenta uma geometria em forma de cantoneira, formando um ângulo de 90° entre as duas faces. Na estampagem a quente, existem duas meias-moldações, a superior e a inferior. A meia-moldação superior encontra-se acoplada ao prato superior da prensa, enquanto a inferior está fixa à mesa de trabalho da prensa. Estas meias-moldações têm como dimensões úteis para o processo de estampagem 450 mm de comprimento, 200 mm de largura e 100 mm de altura. Os modelos CAD de ambas meias-moldações encontram-se representados na Figura 39.

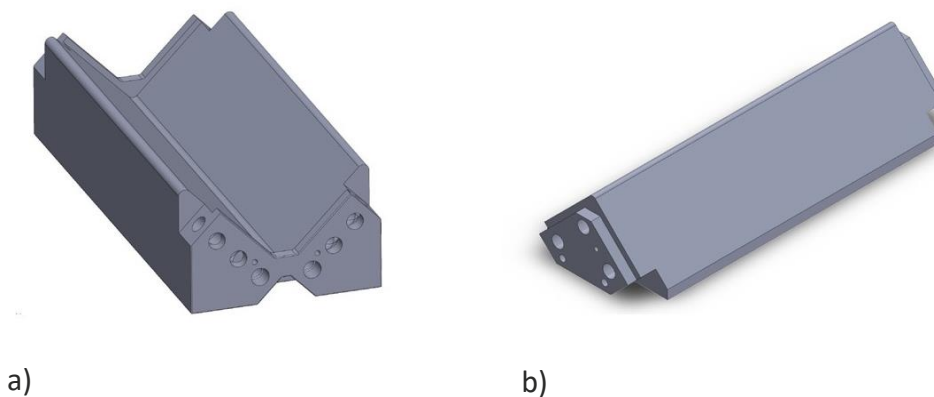


Figura 39 – a) Meia-moldação inferior e b) meia-moldação superior projetadas no *software* Solidworks

O controlo de temperatura do molde é efetuado por circulação de água, utilizando manguейras ligadas a um termorregulador. No molde, as manguейras são ligadas nas extremidades, como se pode observar na Figura 40.



Figura 40 - Moldes utilizados no processo de estampagem a quente com as manguейras utilizadas para o controlo de temperatura

3.7.1.3 Setup de aquecimento

O aquecimento dos *blanks* é feito através de lâmpadas de infravermelhos, observáveis na Figura 41, capazes de atingir temperaturas até ao valor de 400°C.



Figura 41 - Lâmpadas utilizadas no aquecimento do *blank*

Estas lâmpadas são controladas através de um painel de controlo no qual é possível inserir o valor desejado de temperatura. A sua monitorização é realizada através de diferentes sondas pirométricas colocadas em diferentes zonas. Desta forma, é possível compreender os gradientes de temperatura ao longo do *blank*.

3.7.1.4 *Blank-holder e setup de transporte*

O transporte dos *blanks* é efetuado através de um carro de transporte onde estes são fixados por recurso a um *blank-holder*. O carro de transporte está representado na Figura 42.

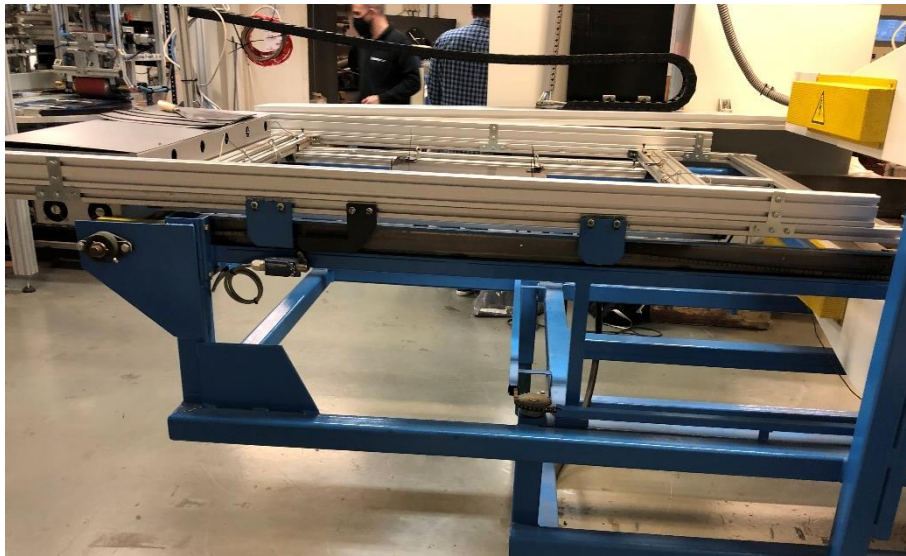


Figura 42 - Carro de transporte dos *blanks*

O carro é controlado segundo o seu posicionamento e velocidade de avanço, podendo esta atingir um valor máximo de 1 m/s. O momento de avanço do *blank* desde o forno de aquecimento até ao conjunto prensa/molde é definido pela leitura ótica, por parte das sondas pirométricas, da temperatura definida no painel de controlo enunciado no capítulo 3.7.1.3.

3.7.2 *Descrição dos passos do processo*

Apesar de o processo de estampagem a quente ser bastante automatizado e intuitivo, existiu a necessidade de efetuar alguns ajustes para que este se realizasse.

O processo iniciou-se com a preparação das molas responsáveis por aplicar a tensão ao *blank* que consequentemente mantiveram o *blank* na posição correta para este ser estampado. Estas molas foram associadas aos quatro furos do *blank* por meio de parafusos e chapas de suporte. As molas foram colocadas nas laterais do carro responsável pelo transporte do *blank* ao longo de todo o *setup* de estampagem. Para conferir a tensão desejada ao *blank*, foi necessário fixar as molas nas laterais do carro. O alongamento inicial das molas definiu-se de acordo com a sua constante elástica. Este procedimento efetuou-se todas as vezes que se pretendeu alterar a tensão aplicada ao *blank*. Na Figura 43 pode ser visto o *blank* já posicionado no carro e pronto a ser estampado.

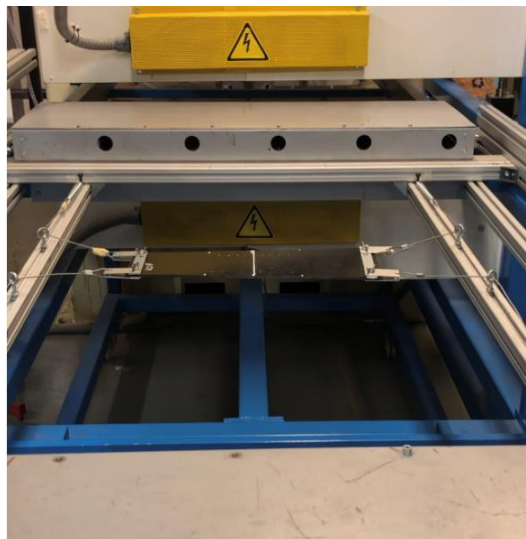


Figura 43 - *Blank* posicionado no carro através do *blank-holder*

Depois de o *blank* estar corretamente posicionado e com a tensão pretendida, o carro avançou a uma velocidade controlada pelo operador do sistema até à zona de aquecimento onde foi aquecido até uma das temperaturas definidas pela matriz de ensaios, em função do ensaio a realizar. O aquecimento foi efetuado através de lâmpadas de infravermelhos capazes de atingir as elevadas temperaturas necessárias à fusão do material utilizado. Quando se encontrava perto da temperatura de fusão, o material começou a deconsolidar. De notar que, para todas as temperaturas do *blank* definidas na matriz de ensaios, ocorreu o fenómeno de deconsolidação, observável na Figura 44, uma vez que as temperaturas de ensaio são imperativamente superiores à temperatura de fusão do material.



Figura 44 - Aquecimento do *blank* e deconsolidação

Ao atingir a temperatura do *blank* pretendida, o carro avançou automaticamente até à zona da prensa, deixando o *blank* em posição para ser estampado. Com o *blank* em posição, foi necessário que o operador da prensa descesse a meia-moldação superior o mais prontamente possível de forma a evitar a rápida descida de temperatura do material por exposição à temperatura ambiente. O molde pode encontrar-se à

temperatura ambiente ou ser aquecido por um termorregulador ligado ao molde por mangueiras que circulam a água aquecida entre os dois. A estampagem do *blank* pode ser observada na Figura 45.



Figura 45 - Estampagem do *blank* com recurso à prensa

Depois de estampada, deixou-se a amostra a arrefecer durante cerca de um minuto antes de ser retirada, para evitar eventuais danos no material. No fim retirou-se a amostra obtida que se encontra representada na Figura 46, prosseguindo com as restantes estampagens e posteriormente com as várias medições necessárias de acordo com os *outputs* definidos para a análise dos resultados.

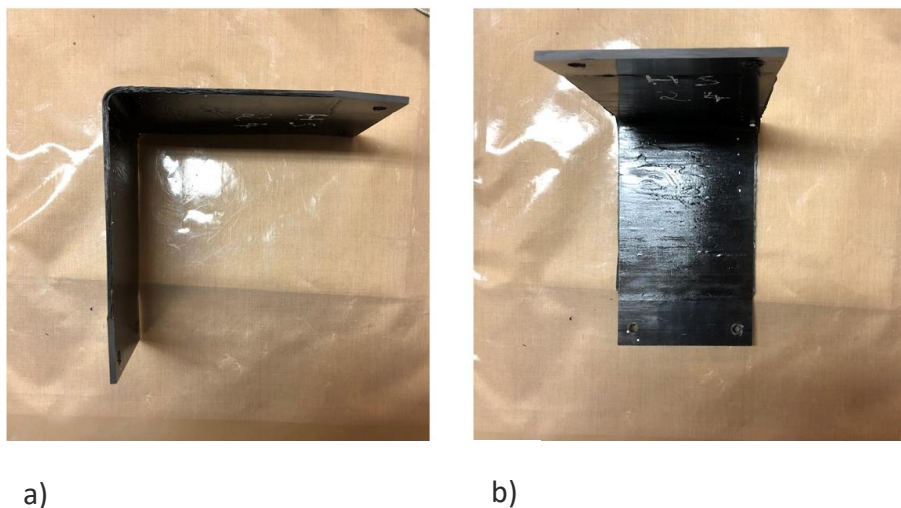


Figura 46 - Amostra estampada: a) vista lateral e b) vista frontal

3.8 Medições e resultados experimentais

Após estampagem das amostras, foi necessário efetuar as medições que permitiram a análise das respostas definidas e a compreensão da influência que cada variável teve em

cada uma das respostas, para assim perceber quais os valores das variáveis que melhor se adequam aos objetivos pretendidos no final.

As medições efetuadas foram, a medição das espessuras das laterais das abas, do *springback*, das espessuras das abas no centro, a medição da qualidade superficial e da fração volúmica de fibra.

3.8.1 Espessura das abas

Após a estampagem, o primeiro passo foi proceder à medição da espessura em diferentes pontos nas laterais e no centro das abas. Os pontos selecionados para as medições laterais correspondem aos 16 pontos anteriormente marcados nos *blanks* no pré-processamento, de forma a compreender a diferença de espessura pré e pós-estampagem. Os 16 pontos utilizados para a medição de espessura no centro foram marcados depois do corte da amostra a meio. Na Figura 47 encontra-se uma representação da zona de medição das espessuras das amostras, representadas a vermelho para as laterais e a azul para o centro. Para estas medições utilizou-se o micrómetro da Mitutoyo referido anteriormente.

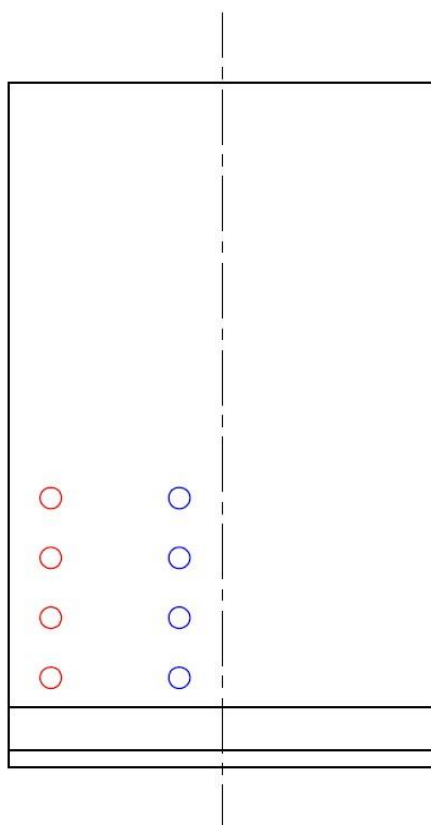


Figura 47 - Zonas de medição das espessuras da amostra

Denotou-se em todas as amostras, tal como seria expectável, uma redução da espessura, uma vez que foram aplicadas pressões elevadas na prensa de estampagem

que promoveram a diminuição da espessura através da migração do material para as extremidades. A média das espessuras de ambas as laterais das amostras, constam na Tabela 10.

Tabela 10 – Média da espessura em ambos as laterais das amostras

Amostra	Espessura média do lado esquerdo (mm)	Espessura média do lado direito (mm)
A1	4,020	4,012
B1	3,606	3,607
C1	3,670	3,677
D1	3,698	3,703
E1	3,644	3,602
F1	3,679	3,671
G1	3,613	3,604
H1	3,649	3,646
I1	3,706	3,676
A2	3,660	3,661
B2	3,865	3,852
C2	3,664	3,651
D2	3,538	3,566
E2	3,674	3,678
F2	3,670	3,650
G2	3,686	3,694
H2	3,688	3,667
I2	3,839	3,829

Nota: As espessuras médias resultam da média das espessuras medidas nos 8 pontos localizados em cada uma das laterais da amostra.

As medições da espessura no centro da amostra efetuaram-se da mesma forma que nas laterais. Porém, para possibilitar a realização destas medições foi necessário primeiramente cortar as amostras a meio (Figura 48), obtendo-se assim duas meias-amostras (Figura 49) que foram medidas na zona correspondente à zona central da amostra original.



Figura 48 - Corte das amostras



Figura 49 – Amostra cortada a meio

Por fim, efetuou-se o cálculo da média das espessuras obtidas em cada lado, que constam na Tabela 11.

Tabela 11 - Espessuras da amostra no centro

Amostra	Espessura no centro na metade esquerda (mm)	Espessura no centro na metade direita (mm)	Média de espessuras no centro (mm)
A1	4,024	4,019	4,021
B1	3,617	3,628	3,622
C1	3,686	3,690	3,688
D1	3,707	3,705	3,706
E1	3,608	3,607	3,608
F1	3,674	3,682	3,678
G1	3,608	3,610	3,609
H1	3,638	3,641	3,639
I1	3,692	3,676	3,684

A2	3,640	3,646	3,643
B2	3,829	3,833	3,831
C2	3,677	3,676	3,677
D2	3,551	3,554	3,553
E2	3,634	3,647	3,640
F2	3,690	3,699	3,694
G2	3,702	3,700	3,701
H2	3,686	3,689	3,687
I2	3,818	3,828	3,823

3.8.2 Springback

O *springback* consiste na distorção angular da amostra relativamente ao ângulo de 90° característico do molde. Esta distorção surge na fase de arrefecimento pós-estampagem por conta do gradiente de temperatura.

Para as amostras em questão, o *springback* pode ser representado pelo ângulo verificado entre a ilustração da geometria obtida e a geometria teórica constituída por duas abas completamente perpendiculares. De forma a simplificar a medição, foi inicialmente traçada em papel a geometria de cada amostra, posteriormente, fazendo coincidir uma das abas, foi traçada a geometria teórica. Desta forma, o empeno da amostra fica apenas representado pelo desvio geométrico de uma das abas, que é mensurável e permite determinar o ângulo pretendido pela equação (2). Este processo foi repetido para ambos os lados das amostras.

$$\theta = \arctan(L/A) \quad (2)$$

onde:

θ – *Springback* (°);

L – Dimensão da linha de interceção das duas arestas verticais (m);

A – Dimensão da aresta vertical do L com 90° (m).

Na Figura 50, está representado o processo de medição do *springback* de uma amostra de ambos os lados.

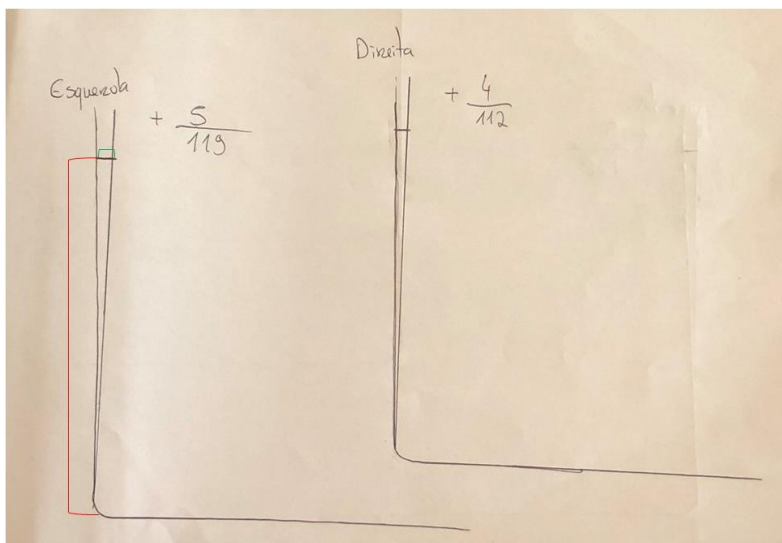


Figura 50 – Exemplo de medição de *springback*: L – Dimensão representada a verde, A – Dimensão representada a vermelho

Na Tabela 12 encontram-se representadas as medições de *springback* de cada amostra tanto do lado esquerdo como do lado direito, assim como o desvio entre os dois. É de denotar que quando o valor do *springback* é positivo o ângulo formado pelas abas do *blank* é superior a 90° e quando é negativo o ângulo é inferior a 90°. É ainda apresentado o valor de *springback* máximo em módulo

Tabela 12 - *Springback* existente nas amostras

Amostra	<i>Springback</i> no lado esquerdo (°)	<i>Springback</i> no lado direito (°)	<i>Springback</i> máximo em módulo (°)
A1	-1,70	-0,90	1,70
B1	-1,78	-1,15	1,78
C1	0,74	3,56	3,56
D1	-0,82	2,22	2,22
E1	0,00	-2,59	2,59
F1	2,41	2,05	2,41
G1	-1,51	0,00	1,51
H1	1,09	2,45	2,45
I1	1,94	-1,02	1,94
A2	-1,63	-0,51	1,63
B2	-0,82	0,41	0,82
C2	3,58	0,91	3,58
D2	1,53	2,98	2,98

E2	0,98	-1,77	1,77
F2	2,39	0,00	2,39
G2	1,78	-0,98	1,78
H2	4,10	1,81	4,10
I2	-1,97	0,00	1,97

Nota: optou-se por utilizar o *springback* máximo em modulo, pois pretende-se obter o valor máximo de *springback*, sendo que a existência do mesmo é indesejável em ambos os sentidos.

Da análise da Tabela 12, conferiu-se que o pior caso de *springback* era a amostra H2, que apresenta o valor máximo de 4,10°, e que a amostra com o menor *springback* foi a amostra B2, na qual o valor máximo é 0,82°. No geral constatou-se que os valores de *springback* máximo encontravam-se próximos nas amostras em que as condições de processamento eram as mesmas.

3.8.3 Qualidade superficial

Este indicador de qualidade é um pouco mais subjetivo do que os anteriores, pois a sua métrica depende do operador que realiza análise. Para esta resposta, foi previamente estabelecida uma escala de qualidade crescente de 1 a 5, em que 1 representa reduzida qualidade superficial e 5 elevada qualidade superficial. Na definição desta escala, foi efetuada uma análise preliminar à qualidade, de forma a atribuir o valor 1 à amostra de pior qualidade e o valor 5 à amostra de qualidade superior. Posteriormente procedeu-se à categorização de cada uma das amostras relativamente aos limites do intervalo. Esta análise leva em consideração aspetos da superfície da amostra, como a presença de rugas, bolhas e o relevo geral da mesma. Trata-se de uma análise pouco refinada, que, no entanto, permite tirar conclusões úteis relativamente à qualidade da amostra e à influência das variáveis de estampagem a quente. Estes defeitos das amostras encontram-se exemplificados na Figura 51.



Figura 51 - Exemplo de aspetos indicativos de baixa qualidade superficial

Apenas duas amostras foram classificadas como 5. A atribuição das classificações de qualidade superficial encontra-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Qualidade superficial das amostras

Amostra	Qualidade superficial	Amostra	Qualidade superficial
A1	1	A2	1
B1	3	B2	3
C1	4	C2	4
D1	4	D2	2
E1	3	E2	5
F1	1	F2	4
G1	2	G2	5
H1	3	H2	1
I1	2	I2	2

Conclui-se que as amostras que apresentaram maior qualidade foram a E2 e a G2 e que as amostras com pior qualidade superficial foram a A1, F1, A2 e H2. Denotou-se, no entanto, que em algumas das amostras em que os valores de variáveis utilizados foram iguais, existia uma diferença de qualidade superficial considerável, como no caso das amostras F e G.

3.8.4 Ensaio de queima

Neste capítulo é feito o planeamento e a descrição do ensaio de queima das amostras obtidas no processo de estampagem a quente. Serão também apresentados os resultados obtidos neste ensaio e posteriormente será realizada a discussão dos mesmos.

Para o ensaio de queima, definiu-se que seriam utilizadas para o estudo, três amostras das abas e três amostras do raio de cada peça, de forma a melhor compreender a influência do escorregamento entre camadas no volume de fibra. Foi definido um número mínimo de três amostras por zona o que diminui o erro associado à medição, permite a análise estatística dos dados e a identificação de possíveis *outliers* existentes. Sendo assim, perfaz-se um total de 108 amostras, uma vez que se consideram 18 componentes e 6 amostras de queima respetivas a cada um.

Procedeu-se assim ao corte das amostras a serem utilizadas na queima e obtiveram-se as amostras observáveis na Figura 52.



Figura 52 – Amostras para o ensaio de queima: a) amostras do raio e b) amostras das abas

Definiu-se, que se utilizaria uma temperatura de 595°C durante 95 minutos, condições estas necessárias para o consumo completo da matriz. Ao todo, foram realizados 12 ciclos de queima, colocando 9 cadinhos com as amostras de cada vez. Na Figura 53 podem ser vistos os cadinhos com a fibra resultante depois da queima.



Figura 53 - Cadinhos com fibra seca

O ensaio de queima efetuou-se com o objetivo de determinar os teores de fibra e de matriz das amostras analisadas segundo a norma ASTM D3171 [82]. Este ensaio implica, numa primeira fase, a medição das massas volúmicas de todas as amostras através do princípio de Arquimedes, que consiste na pesagem da amostra seca e na pesagem da amostra submersa em água destilada, como pode ser observado na Figura 54.

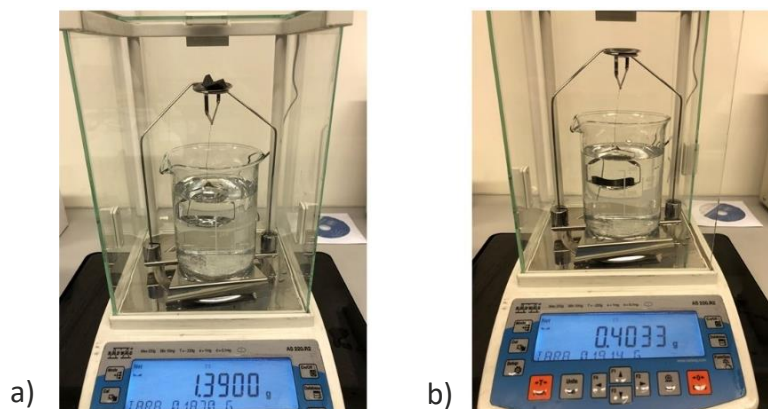


Figura 54 – a) Medição da massa da amostra seca e b) da amostra submersa em água

A massa volúmica do compósito foi determinada através da seguinte fórmula:

$$\rho_c = \frac{m_{ar}}{m_{ar} - m_{líquido}} \times \rho_0; \quad (3)$$

onde:

ρ_c - Massa volúmica do compósito (g/cm³);

m_{ar} - Massa de amostra ao ar (g);

$m_{líquido}$ - Massa da amostra em líquido (g);

ρ_0 - massa volúmica do líquido à temperatura a que se encontra (g/cm³).

Calculadas as massas volúmicas de todas as amostras, procedeu-se com a queima das mesmas. Para a queima, utilizou-se a mufla, que está representada na Figura 55.



Figura 55 - Mufla utilizada na queima das amostras

Primeiramente, antes de serem efetuadas as queimas, foi necessário pesar todos os cadinhos a serem utilizados (Figura 56) e fazer a correspondência dos mesmos à amostra a ser queimada.

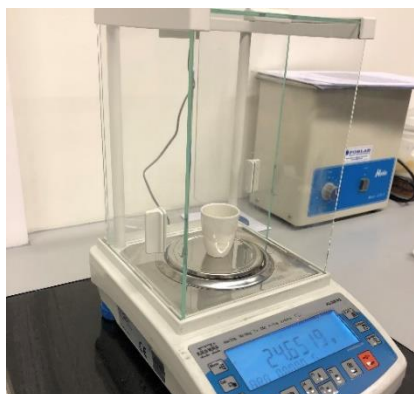


Figura 56 - Pesagem dos cadinhos

De seguida, as amostras foram colocadas no cadinho respetivo e colocadas dentro da mufla para ser efetuada a queima das mesmas, como pode ser observado na Figura 57.



Figura 57 - Cadinhos na mufla para a queima das amostras

Decorrido o tempo de queima, os cadinhos foram retirados da mufla e deixados a arrefecer. Na Figura 58 podem ser observadas as fibras secas resultantes da queima da matriz. O princípio subjacente a este ensaio é a evaporação da matriz termoplástica.



Figura 58 - Fibras resultantes do ensaio de queima

No final, as fibras, ainda no cadinho, foram pesadas para determinar a massa de fibra resultante. Através deste valor determina-se a fração mássica de fibra presente em cada amostra, visto serem conhecidas as massas das amostras correspondentes. A fração mássica de fibra (em percentagem) foi determinada de acordo com a seguinte fórmula:

$$\omega_{fibra} = \frac{m_{fibra}}{m_{amostra}} \times 100; \quad (4)$$

onde:

ω_{fibra} - Fração mássica de fibra (%);

m_{fibra} - Massa de fibra obtida após queima (g);

$m_{amostra}$ - Massa da amostra correspondente antes da queima da matriz (g).

Determinado o valor da fração mássica e sabendo os valores da massa volúmica do compósito e a massa volúmica da fibra ($\rho_{fibra}=1,78 \text{ g/cm}^3$), a fração volúmica pode ser determinada através da seguinte fórmula:

$$v_{fibra} = \omega_{fibra} \times \frac{\rho_c}{\rho_{fibra}}; \quad (5)$$

onde:

v_{fibra} - Fração volúmica de fibra (%);

ρ_{fibra} – Massa volúmica da fibra (g/cm^3).

Depois de efetuadas as queimas e retirados os dados necessários, neste caso a fração volúmica das abas e do raio de cada amostra, reuniram-se os mesmos na Tabela 14.

Tabela 14 – Fração volúmica de fibra das abas e do raio

Amostra	Fração volúmica de fibra das abas (%)	Fração volúmica de fibra do raio (%)
A1	47,37	43,29
B1	49,06	48,69
C1	46,13	46,32
D1	49,67	48,21
E1	46,26	44,69
F1	43,68	46,36
G1	44,04	47,54
H1	49,44	44,78
I1	44,85	42,52
A2	50,00	48,51
B2	43,24	44,90
C2	48,66	44,43
D2	47,44	43,27
E2	45,02	46,07
F2	45,96	42,11
G2	44,75	43,31
H2	49,90	48,99
I2	43,00	46,41

Após uma análise dos resultados dos valores de fração volúmica de fibra obtidos, que constam na Tabela 14, conferiu-se que os valores se aproximam do esperado e se encontram em condições de serem inseridos no *software*. Conclui-se ainda que existem amostras em que existe uma maior variação da fração volúmica de fibra das abas em relação à fração volúmica de fibra no raio do que noutras, como no caso da amostra C1 em que a variação da fração volúmica de fibra foi de 0,19%, que é uma pequena diferença quando comparada com a variação da fração volúmica de fibra na amostra H1 de 4,66%. As diferenças de fração volúmica de fibra em algumas das amostras com as mesmas condições de processamento provavelmente estão associadas ao facto da espessura dos *blanks* utilizados para o processamento serem diferentes.

Todas as medições efetuadas e que constam no capítulo 3.8, serão posteriormente inseridas no *software* DX13, para serem analisadas e correlacionadas de forma a obter os valores ótimos das variáveis do processo de estampagem a quente.

3.9 Análise ANOVA

Neste capítulo, é feita a análise ANOVA das variáveis do processo de estampagem a quente, no *setup* do INEGI, de compósitos de matriz termoplástica (PA6) reforçados com fibra de carbono unidirecional. Para o auxílio desta análise foi utilizado o *software* Design Expert V13. Este *software* permite que, com a introdução de valores das variáveis do estudo e as consequentes respostas, e com o estabelecimento de relações entre variáveis e a definição de valores de respostas pretendidos, se obtivessem os valores ótimos do processo de estampagem a quente para o tipo de geometria e material em estudo. Nos próximos subcapítulos serão apresentadas as etapas da análise efetuada, assim como os resultados da mesma.

3.9.1 Pré-processamento

Para a análise ANOVA, decidiu-se optar por utilizar, no *software*, um *optimal (custom) design*, observável na Figura 59. Este tipo de desenho de experiências acomoda modelos personalizados, fatores categóricos e regiões irregulares. Em suma, os ensaios são determinados pelo critério de escolha na construção do DOE.

Name	Units	Type	Levels	L[1]	L[2]	L[3]
Temp Blank	°C	Nominal	3	260	270	280
Tensao BH	N	Nominal	3	20	30	40
Temp Molde	°C	Nominal	3	20	40	80
Pressao Fech	bar	Nominal	3	10	20	30

Figura 59 - Inputs aplicados ao *optimal (custom) design* do *software* DX13

Decidiu-se utilizar este tipo de análise por permitir ao mesmo tempo aplicar a matriz de ensaios definida no capítulo 3.5.4, ao aplicar uma matriz de 9 ensaios e poder repetir a mesma por blocos, perfazendo assim os 18 ensaios definidos na matriz de ensaios deste estudo.

Procedeu-se então com a introdução dos dados relativos aos *inputs* no *software* que constam na Tabela 6 e que estão representados na Figura 60.

Block	Run	Factor 1 A:Temp Blank °C	Factor 2 B:Tensao BH N	Factor 3 C:Temp Molde °C	Factor 4 D:Pressao Fecho bar
Block 1	1	260	20	20	10,0
Block 1	2	260	30	40	20,0
Block 1	3	260	40	80	30,0
Block 1	4	270	20	40	30,0
Block 1	5	270	30	80	10,0
Block 1	6	270	40	20	20,0
Block 1	7	280	20	80	20,0
Block 1	8	280	30	20	30,0
Block 1	9	280	40	40	10,0
Block 2	10	260	20	20	10,0
Block 2	11	260	30	40	20,0
Block 2	12	260	40	80	30,0
Block 2	13	270	20	40	30,0
Block 2	14	270	30	80	10,0
Block 2	15	270	40	20	20,0
Block 2	16	280	20	80	20,0
Block 2	17	280	30	20	30,0
Block 2	18	280	40	40	10,0

Figura 60 - Matriz de ensaios inseridas no *software*

De seguida, procedeu-se à introdução dos dados das respostas correspondentes a cada ensaio, como pode ser observado na Figura 61. As respostas introduzidas no *software* foram:

- A fração volúmica de fibra nas abas e no raio;
- A diferença média de espessura percentual entre o *blank* e a amostra pós-estampagem;
- O *springback* máximo;
- A qualidade superficial das amostras, resultante da análise visual e qualitativa das mesmas.

Response 1 Fração vol. fibras (abas) %	Response 2 Fração vol. fibras (raio) %	Response 3 Dif. espessuras (média) %	Response 4 Springback Máximo °	Response 5 Qualidade Superficial #
47,37	43,29	5,89	1,70	1
49,06	48,69	10,94	1,78	3
46,13	46,32	10,33	3,56	4
49,67	48,21	13,29	2,22	4
46,26	44,69	10,57	2,59	3
43,68	46,36	11,72	2,41	1
44,04	47,54	12,03	1,51	2
49,44	44,78	14,86	2,45	3
44,85	42,52	10,75	1,94	2
50,00	48,51	12,07	1,63	1
43,24	44,90	4,96	0,82	3
48,66	44,43	12,40	3,58	4
47,44	43,27	15,02	2,98	2
45,02	46,07	8,86	1,77	5
45,96	42,11	8,88	2,39	4
44,75	43,31	10,15	1,78	5
49,90	48,99	10,46	4,10	1
43,00	46,41	8,13	1,97	2

Figura 61 - Respostas introduzidas no DX13

3.9.2 Tratamento de dados

Após a introdução de todos os dados relativos ao *inputs* e *outputs* deste trabalho, procedeu-se à análise dos *outputs* e de como estes se relacionam com os *inputs* através do *software* DX13.

Os *outputs* foram analisados individualmente no *software*, sendo que para cada *output* existia um modelo de análise mais indicado. Para todos os *outputs* optou-se por não aplicar nenhum tipo de transformação aos dados referentes às respostas sob análise. O *software* apresenta também a análise ANOVA relativamente ao *output* analisado com informação bastante intuitiva, esclarecendo quais os valores de *inputs* mais indicados e qual a influência deles para a análise. Esta informação mostra-se bastante útil para utilizadores que apresentem um menor conhecimento relativamente à análise ANOVA.

Para auxiliar na análise ANOVA, o *software* forneceu gráficos modelo que mostram como o valor do *output* varia com a alteração dos valores dos *inputs*, o que por sua vez permite compreender a sua interação. Na Figura 62 pode ser observado um exemplo da interação de valores dos *inputs* e *outputs* através de gráficos.

Com a análise de todos os *outputs* a serem considerados para a otimização do processo, prossegue-se então com a análise de resultados no próximo capítulo.

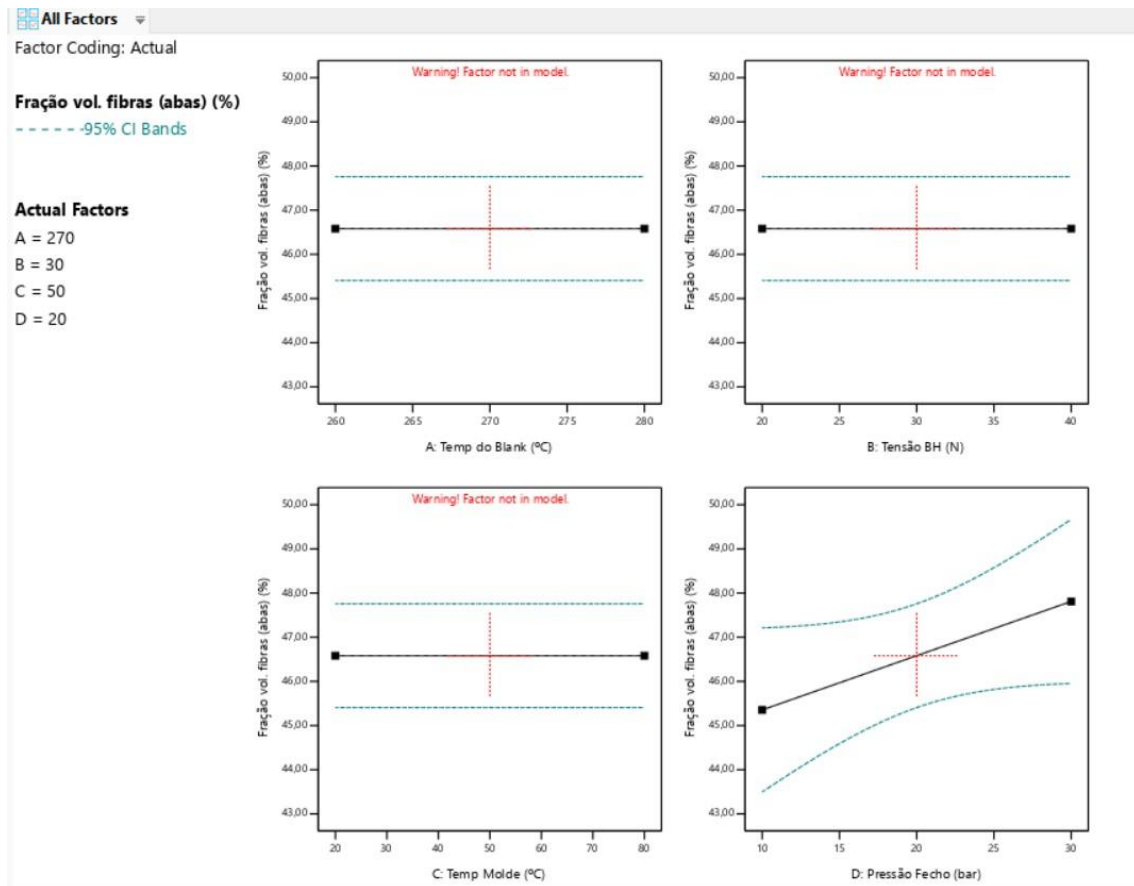


Figura 62 - Gráficos que ilustram as interações dos *inputs* com o *output* (neste caso o conteúdo de fibras das abas)

3.9.3 Análise dos resultados obtidos

Neste capítulo, são analisados os *outputs* individualmente de forma a perceber como estes são influenciados pelos *inputs*, o que permite posteriormente, por correlação, avançar com a definição dos parâmetros ótimos do processo de estampagem a quente. Esta análise consiste na avaliação dos gráficos apresentados no *software* DX13. Os *outputs* a analisar neste estudo são os anteriormente enunciados no capítulo 3.9.1.

Nos próximos subcapítulos, é também detalhada para cada *output* uma equação que permite fazer previsões dos seus valores para os diferentes níveis de cada variável do processo. Por definição, o nível superior de cada parâmetro (*input*) é normalizado no valor de *codec* +1 e o nível inferior no valor de *codec* -1. Esta equação é útil na identificação do impacto relativo dos *inputs* no *output*, por comparação direta dos seus coeficientes.

É importante referir que os resultados seguidamente apresentados estão diretamente associados aos intervalos definidos para os *inputs* deste estudo, e que a validade da análise e comentários aos *outputs* tem apenas validade dentro destes mesmos intervalos.

Os gráficos fornecidos apresentam os intervalos de valores expectáveis para cada *output* delimitados por bandas de intervalo de confiança de 95% representadas a traço interrompido de cor azul, visto que as regressões não refletem todos os valores experimentais.

3.9.3.1 Fração volúmica de fibra

Conclui-se, através do modelo aconselhado pelo *software*, que a pressão de fecho é o *input* com maior influência na fração volúmica de fibra, tanto no raio como nas abas. O aumento da pressão de fecho leva ao aumento do valor da fração volúmica de fibra. Os gráficos da Figura 63 e da Figura 64 representam a variação da fração volúmica de fibra em função da pressão de fecho segundo uma tendência de variação linear.

É possível perceber com a comparação da Figura 63 e da Figura 64, que existe uma maior variação do conteúdo de fibras nas abas do que no raio. Este fenómeno leva a querer que no processo de estampagem a quente, o raio representa uma zona mais estável no que toca à fração volúmica de fibra.

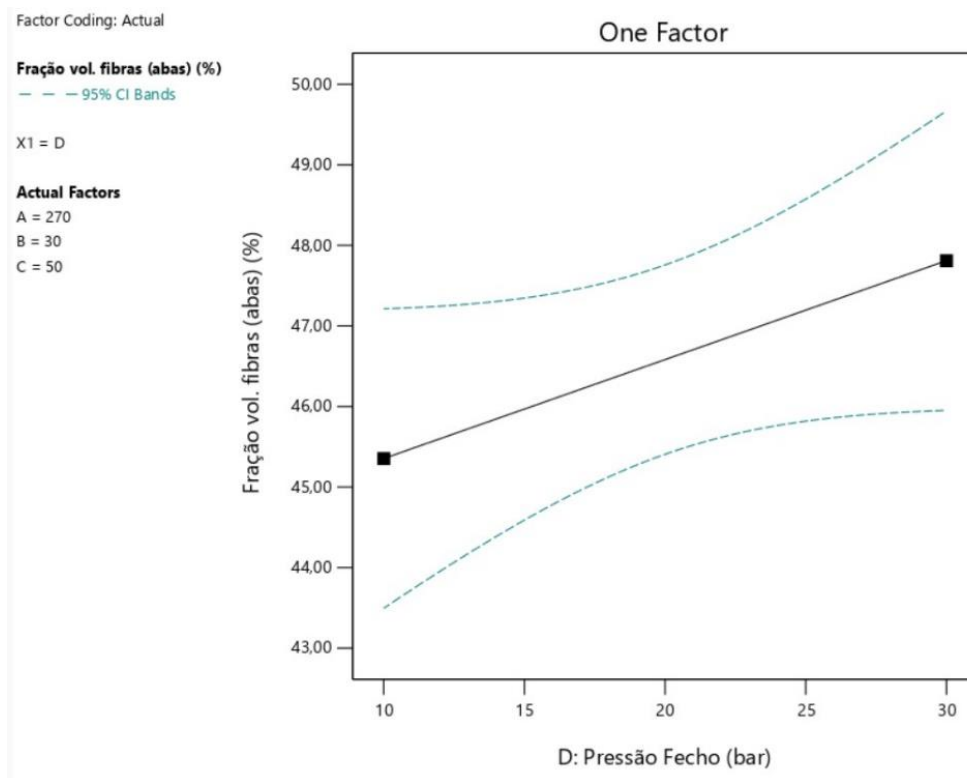


Figura 63 - Variação da fração volúmica de fibra nas abas (eixo vertical) em função da pressão de fecho (eixo horizontal)

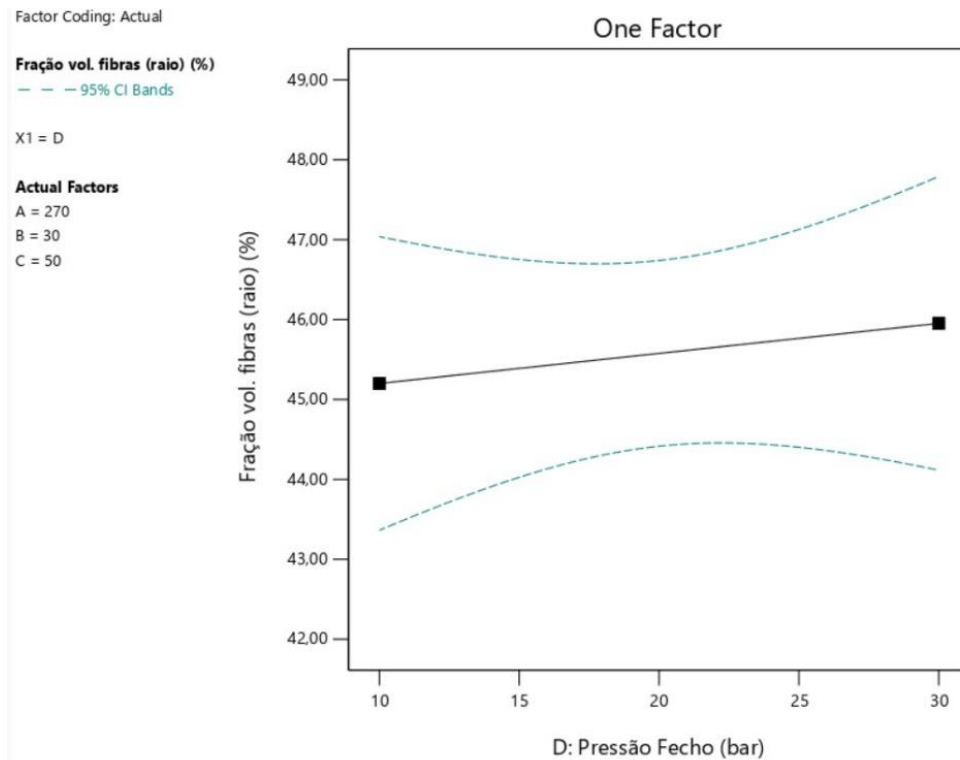


Figura 64 - Variação da fração volúmica de fibra no raio (eixo vertical) em função da pressão de fecho (eixo horizontal)

Os valores experimentais da fração volúmica de fibra nas abas, variam entre 43,00% e 50,00% no conjunto de todas as amostras e os valores de fração volúmica de fibra no raio variam entre 42,52% e 48,99%. Os valores observados na Figura 63 relativamente à fração volúmica nas abas variam entre 45,35% e 47,81%, enquanto os valores para a fração volúmica no raio variam entre 45,20% e 45,96%, como se observa na Figura 64.

De seguida, são apresentadas as equações que representam o valor do *output* de fração volúmica de fibra das abas e do raio.

$$\text{Fração volúmica fibra}_{\text{abas}} (\%) = 46,58 + 1,23 \times D \quad (6)$$

$$\text{Fração volúmica fibra}_{\text{raio}} (\%) = 45,58 + 0,3759 \times D \quad (7)$$

onde:

- D=-1 representa Pressão_{Fecho} = 10bar e D=+1 representa Pressão_{Fecho} = 30bar.

3.9.3.2 Diferença média de espessura

No que diz respeito à diferença média de espessura, concluiu-se que, tal como para a fração volúmica de fibra, a pressão de fecho é o *input* mais influente, sendo que o aumento da pressão de fecho leva ao aumento da diferença média de espessura. Este fenómeno era expectável, uma vez que maiores pressões levam a uma maior diminuição

de espessura por migração de maior quantidade de material para os bordos da amostra. O gráfico da Figura 65 demonstra a tendência referida anteriormente.

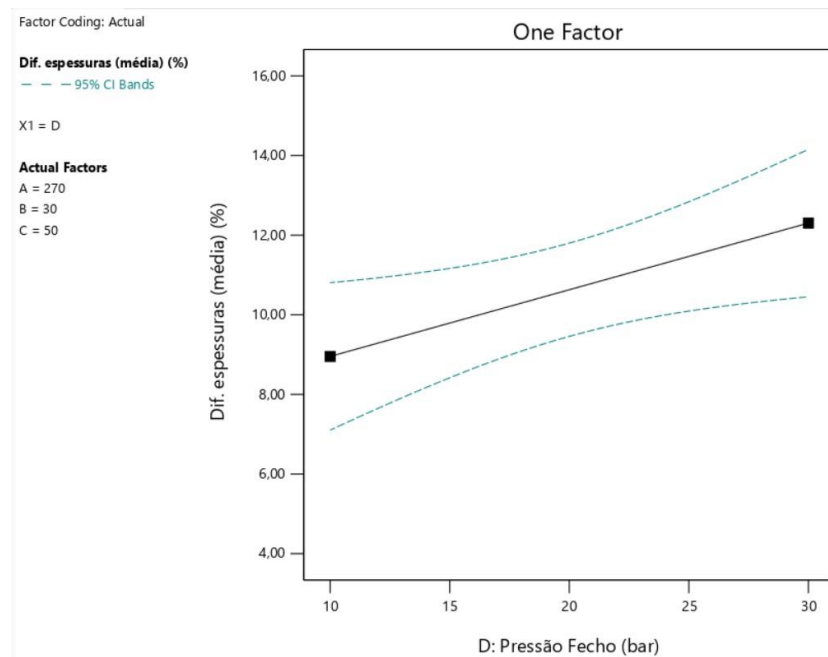


Figura 65 - Variação da diferença média de espessura (eixo vertical) em função da pressão de fecho (eixo horizontal)

Os valores da diferença média de espessura, obtidos experimentalmente, variam entre 4,96% e 15,02%. Pelo modelo de regressão linear, apresentado na Figura 65, observa-se que os valores, variam entre 8,96% e 12,30%. Destacar ainda que, neste caso, as bandas de confiança a 95% são mais próximas, fruto da coerência dos dados e de um bom *fitting* do modelo face aos mesmos.

A equação seguinte permite determinar o valor da diferença média de espessura em função da pressão de fecho.

$$\text{Diferença de espessura}_{\text{média}} (\%) = 10,63 + 1,67 \times D \quad (8)$$

Onde:

- D=-1 representa Pressão_{Fecho} = 10bar e D=+1 representa Pressão_{Fecho} = 30bar.

3.9.3.3 Springback máximo

De modo a otimizar o produto final no que respeita ao *springback*, foi tomado em consideração o valor máximo de cada amostra, por este representar o pior caso em termos de qualidade.

Observou-se que, no *springback* máximo, ao aumentar o valor da tensão do *blank-holder* o valor deste *output* aumentava, o que permite concluir que maiores tensões levam a maiores empenos das amostras. Esta afirmação é apenas válida para o intervalo de

valores de tensão em estudo. Por outras palavras, esta tendência crescente do *springback* pode não ser refletida quando aplicadas ao *blank* tensões inferiores a 20 N ou superiores a 40 N. Notou-se também, pela observação dos gráficos da Figura 66 relativos à temperatura do molde e à pressão de fecho, obtidos por regressão polinomial de segunda ordem, que os valores de *springback* são máximos para os extremos do intervalo de temperaturas de molde, respetivamente 20°C e 80°C. Para a temperatura de 50°C, o valor de *springback* máximo foi minimizado. Relativamente à pressão de fecho, observa-se que o valor máximo de *springback* é obtido com o valor de pressão de 30 bar, e o valor mínimo para cerca de 17 bar. A temperatura do *blank* surge como um fator de pouca influência no modelo.

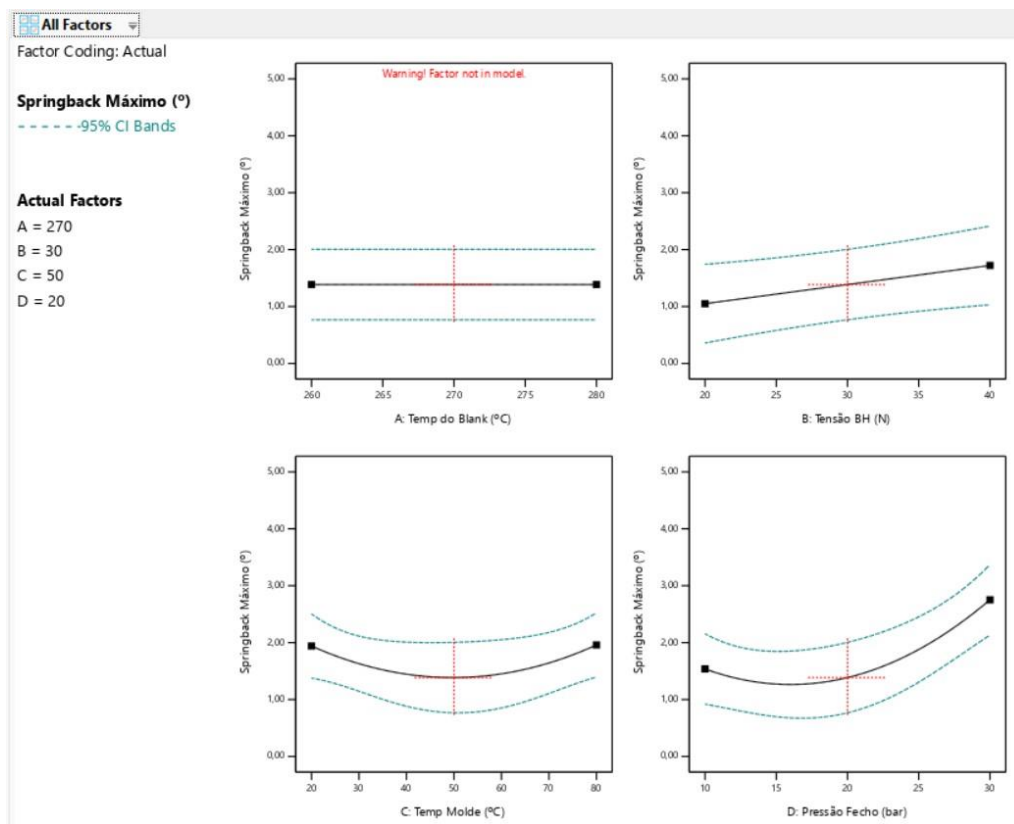


Figura 66 - Variação do valor máximo de *springback* (eixo vertical) em função dos *inputs* (eixo horizontal)

O intervalo de valores experimentais de *springback* máximo encontra-se entre 0,82° e 4,10°. Pela equação 9, substituindo as variáveis incógnitas B e C pelos valores -1 e 0, respetivamente, para o menor valor de *springback* máximo, e substituindo B e C por +1 para o maior valor de *springback* máximo, o intervalo de valores obtido varia entre 0,93° e 3,66°.

Seguidamente, é apresentada a equação que representa o valor máximo do *output springback*, em função da tensão do *blank-holder*, da temperatura do molde e da pressão de fecho.

$$Springback_{m\acute{a}x} (^\circ) = 1,39 + 0,3358 \times B + 0,0092 \times C + 0,6075 \times D + 0,5638 \times C^2 + 0,7592 \times D^2 \quad (9)$$

onde:

- B=-1 representa $Tens\tilde{a}o_{Blank-holder}=20N$ e B=+1 representa $Tens\tilde{a}o_{Blank-holder}=40N$;
- C=-1 representa $Temp.Molde=20^\circ C$ e C=+1 representa $Temp.Molde=80^\circ C$;
- D=-1 representa $Press\tilde{a}o_{Fecho} = 10bar$ e D=+1 representa $Press\tilde{a}o_{Fecho} = 30bar$.

3.9.3.4 Qualidade superficial

No que diz respeito à qualidade superficial das amostras, conclui-se que o aumento do valor da temperatura do molde é o principal incrementador de qualidade superficial da amostra, pelo que apresenta uma influência bastante significativa. Os restantes *inputs* não apresentam uma tendência expressiva para a análise deste *output*. A Figura 67 permite visualizar a influência da temperatura do molde na qualidade superficial.

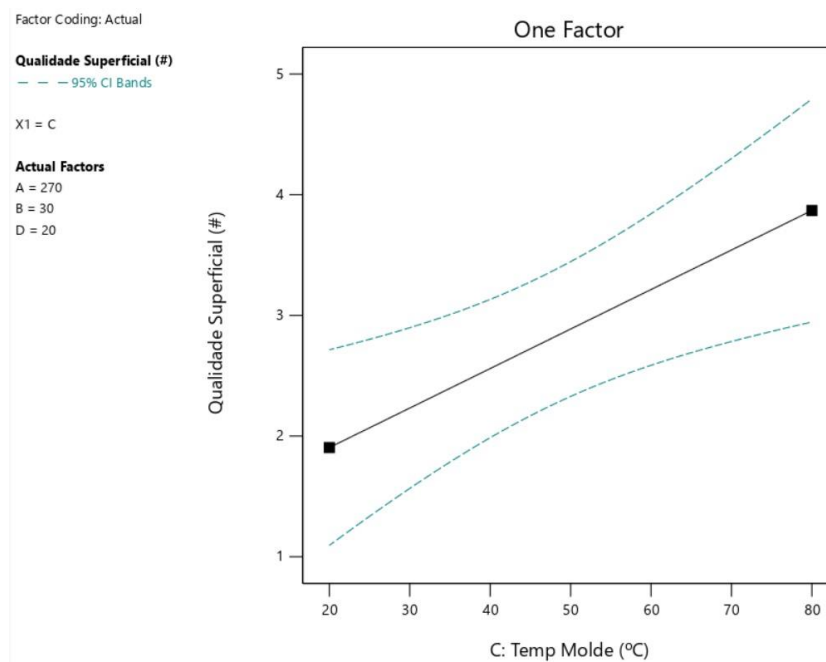


Figura 67 - Variação da qualidade superficial (eixo vertical) em função da temperatura do molde (eixo horizontal)

Por análise do gráfico da Figura 67, conclui-se que, quanto maior a temperatura do molde melhor a qualidade superficial. Os valores observáveis no gráfico da Figura 67 variam entre 2 e 4, segundo a escala definida para este *output*.

A seguinte equação permite determinar o valor de qualidade superficial.

$$Qualidade\ superficial = 2,89 + 0,9821 \times C \quad (10)$$

C=-1 representa $Temp.Molde=20^\circ C$ e C=+1 representa $Temp.Molde=80^\circ C$.

3.9.4 Definição dos parâmetros ótimos do processo

Após a análise dos resultados é possível, através do cruzamento de dados retirados nesta análise, proceder à definição dos parâmetros ótimos do processo de estampagem a quente. O *software* DX13 será o responsável por correlacionar os *inputs* e dos *outputs* e tomando por base os critérios definidos pelo utilizador para obter os valores ótimos dos *inputs*. Nos próximos subcapítulos serão expostos os intervalos de valores desejados e os objetivos para cada *input* e *output*.

3.9.4.1 Definição dos critérios para os *inputs*

Neste subcapítulo serão definidos os critérios e valores desejáveis para os *inputs* do processo. Como pode ser observado na Figura 68, definiu-se que a temperatura do *blank*, ao não influenciar os valores dos *outputs* de forma relevante, seria fixada no valor máximo de temperatura de processamento presente no *datasheet* do material (271°C). Para os restantes *inputs* não se estabeleceu nenhum critério para o intervalo de valores, optando-se por estabelecer o critério *in range* para cada um desses *inputs*.

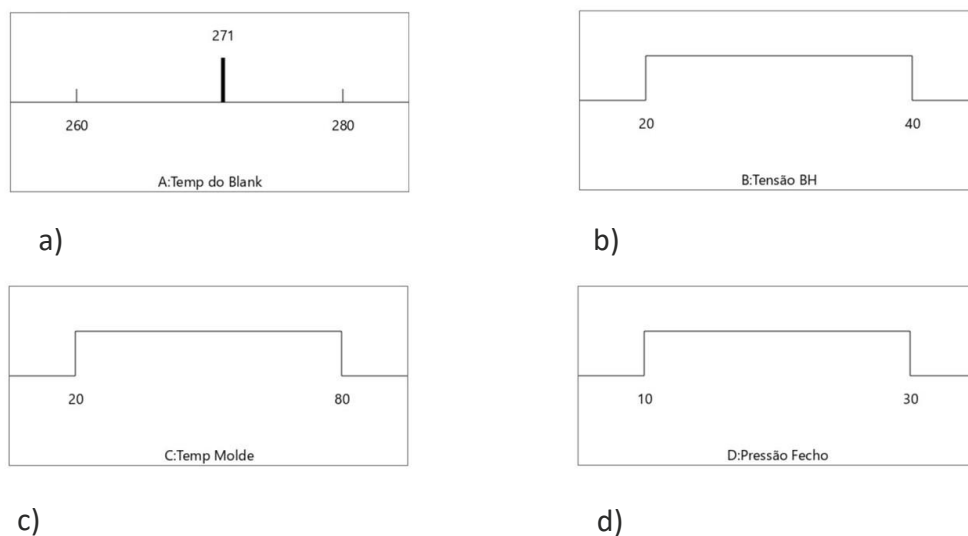


Figura 68 - Critérios para os *inputs*: a) temperatura do *blank*, b) tensão do *blank-holder*, c) temperatura do molde e d) pressão de fecho

3.9.4.2 Definição dos critérios para os *outputs*

Neste subcapítulo serão definidos os critérios e valores desejáveis para os *outputs* do processo.

Um dos objetivos é o de maximizar a fração volúmica de fibra, afastando assim os valores do mínimo admissível para este tipo de material. Definiu-se que o intervalo de valores a impor para a fração volúmica de fibra do raio deveria estar compreendido entre o valor teórico para o material utilizado (45,00%) e o valor máximo deste *output*

de acordo com os resultados do ensaio de queima (48,99%). O intervalo de valores para a fração volúmica de fibra das abas segue o mesmo critério sendo que o valor máximo neste caso é de 50,00%. Pode observar-se a introdução destes critérios na Figura 69.

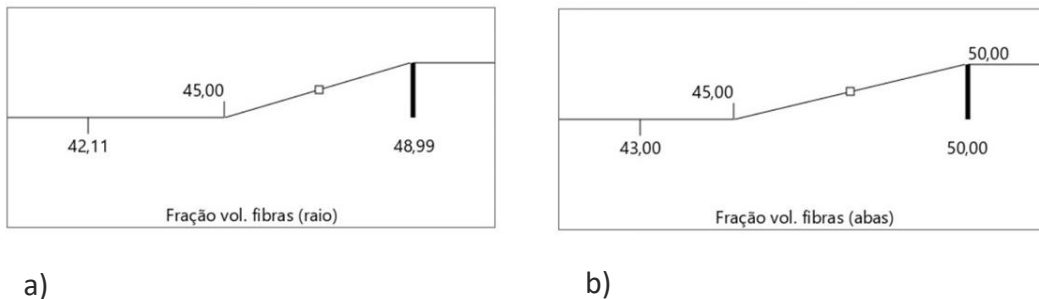


Figura 69 - Critérios para a fração volúmica de fibra: a) no raio e b) nas abas

Foi atribuída baixa importância a este *output*, uma vez que, por análise do estado da arte e tendo em conta a experiência do INEGI, o estágio de estampagem tem pouca influência na fração volúmica do produto, sendo o estágio de consolidação dos *blanks* o maior influenciador. Também o facto de ser definido o valor mínimo admissível de 45% para a fração volúmica de fibra conduziu à atribuição de uma baixa importância para este *output* no DX13.

Relativamente à diferença média de espessura, pretende-se minimizar o valor obtido para este *output* de modo a prevenir uma elevada migração de material para os bordos de amostra. Será também vantajoso, do ponto de vista do processo, se a espessura do produto final se mantiver igual à do *blank* independentemente do molde/geometria em questão. Atribuiu-se assim o intervalo de valores entre a diferença média de espessura mínima observada nos resultados de 4,96% e o valor máximo observado no gráfico da Figura 65 de 12%. Este *output* foi categorizado como sendo de baixa importância por se tratar de um *output* dependente da espessura do *blank* que dá origem à amostra final após estampagem. Os critérios impostos estão identificados na Figura 70.

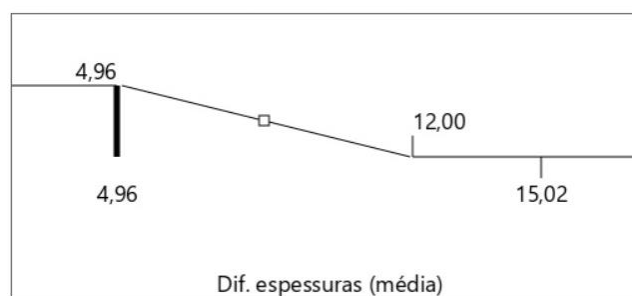


Figura 70 - Critérios para a diferença média de espessura

Para o *springback*, o objetivo é o de minimizar este fenómeno e obter amostras o mais fiéis possível à geometria do molde, ainda que não tenham sido obtidas amostras sem *springback*. Definiu-se 2º com o valor máximo a admitir para o *springback* máximo e

0,82° como valor mínimo. Definiu-se a importância deste *output* como sendo máxima visto pretender-se reduzir o empeno dos componentes estampados. Estes critérios são possíveis de observar na Figura 71.

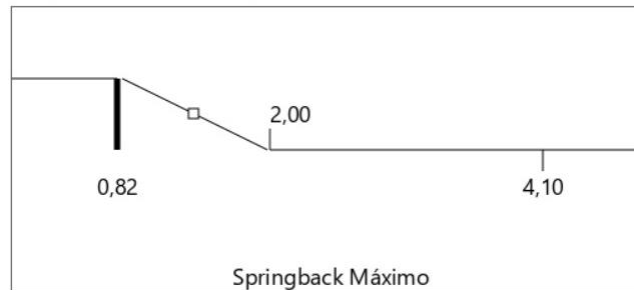


Figura 71 - Critérios para o *springback* máximo

Para o caso da qualidade superficial, o limite mínimo imposto foi 3, pois uma amostra abaixo da média apresenta defeitos significativos que comprometem a qualidade do produto final. O máximo imposto foi 5, o maior valor da escala, que corresponde a uma amostra de elevada qualidade superficial. A importância de uma amostra com qualidade superficial elevada é essencial, daí que se tenha definido como objetivo maximizar a qualidade superficial, atribuindo uma importância máxima a este *output*.

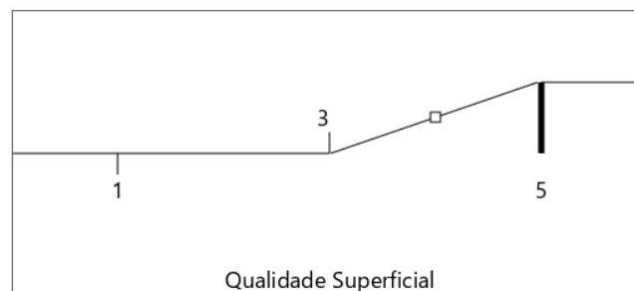


Figura 72 - Critérios para a qualidade superficial

3.9.4.3 Resultados finais

Definidos todos os critérios relativos aos *inputs* e *outputs*, com o auxílio do DX13, obtiveram-se 15 soluções finais que respeitam estes critérios balanceando os objetivos, as importâncias atribuídas e os intervalos definidos. Das 15 soluções, foi selecionada a solução mais desejável do ponto de vista do utilizador. Chegou-se assim aos valores ótimos das variáveis a implementar no processo de estampagem a quente de compósitos de matriz termoplástica PA6 reforçados com fibra de carbono no *setup* de estampagem a quente do INEGI. Esta solução apresenta os seguintes valores dos *inputs*:

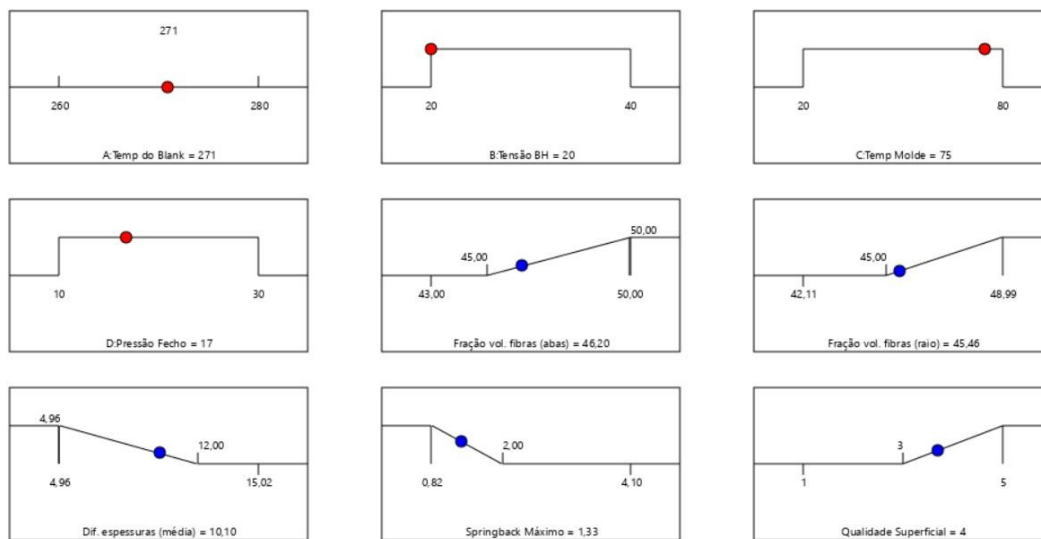
- Temperatura do *blank* = 271°C;
- Tensão do *blank-holder* = 20 N;
- Temperatura do molde = 75°C;

- Pressão de fecho = 17 bar.

Os valores dos *outputs* gerados para os valores de *inputs* acima enunciados são os seguintes:

- Fração volúmica de fibra das abas = 46,20%
- Fração volúmica de fibra do raio = 45,46%
- Diferença média de espessura = 10,10%;
- *Springback* máximo = 1,33°;
- Qualidade superficial \approx 4.

Estes valores de *inputs* e *outputs* encontram-se representados na Figura 73.



Desirability = 0,369
Solution 1 out of 15

Figura 73 - Valores ótimos dos *inputs* e correspondentes valores dos *outputs*

Estes valores de *outputs* apresentam uma desejabilidade de 0,369, como se pode observar na Figura 73. A desejabilidade é uma função objetivo que varia entre o valor mínimo zero e o valor máximo de um. Uma análise feita com valores mais restringidos em torno dos valores ótimos obtidos conduz a uma maior desejabilidade. No entanto, para este estudo, o objetivo não era o de obter uma elevada desejabilidade, mas sim os valores ótimos relativos aos intervalos impostos para cada *output*. A desejabilidade poderá também ser melhorada por recurso a trabalhos posteriores de otimização, cuja janela de parâmetros de processo a considerar seja fixada em torno da solução ótima apresentada neste mesmo trabalho. Uma outra forma de melhorar a desejabilidade e, conseqüentemente, a confiança na análise, é a confirmação empírica da solução ótima e posterior inserção dos seus resultados no *software*.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

4.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

No desenvolver deste trabalho, surgiram algumas limitações em termos de disponibilidade de equipamentos pertencentes ao INEGI, sem os quais não seria possível realizar o procedimento prático associado a esta dissertação. Estas limitações levaram a que, com o tempo disponível para realização do trabalho reduzido, não fosse possível realizar uma análise mais aprofundada do que a realizada, que permitiria uma confiabilidade de resultados superior. Foram, no entanto, alcançados os objetivos iniciais definidos:

- Processamento de *blanks* posteriormente estampados a quente em forma de cantoneira;
- Realização da análise correlacional dos resultados pelo método Taguchi e à análise de variância e com auxílio do *software* Design Expert V13® (DX13);
- Obtenção da solução ótima dentro dos intervalos de valores de variáveis definidos.

Uma vez realizada toda a análise dos resultados, auxiliada pelo *software* DX13, concluiu-se, relativamente ao processo de estampagem a quente, que:

- A pressão de fecho tem uma elevada influência no processo de estampagem a quente para a geometria utilizada;
- A temperatura de *blank* não tem influência dentro do intervalo admitido, contudo, o intervalo definido teve desde início em consideração a experiência na obtenção de componentes em PA6 de qualidade superior;
- A temperatura do molde é o principal responsável pela conservação da boa qualidade superficial pós-consolidação.
- A minimização do empeno das amostras estampadas a quente, aqui mensurado através do *springback*, revelou-se dificultada pelo facto deste *output* estar dependente de diversos *inputs* do processo;
- Maiores tensões do *blank-holder* promovem a existência de *springback*;
- Dentro dos intervalos admitidos, valores intermédios da pressão de fecho e da temperatura do molde aparentam minimizar o empeno das amostras;
- Apesar de, durante o aquecimento pré-estampagem dos *blanks*, ter sido verificado o fenómeno de deconsolidação, o mesmo não afetou o componente

final. Este ponto é justificado pelo facto de as espessuras das amostras estampadas serem inferiores às espessuras dos *blanks* que lhes deram origem;

- A pressão de fecho é o parâmetro de processamento com maior impacto no que toca ao controlo da espessura da amostra estampada;
- A fração volúmica de fibra das amostras estampadas é diretamente influenciada pela pressão de fecho, sendo que, para a geometria em questão, a zona do raio da amostra revelou maior estabilidade do que a zona das abas;
- O tempo de arrefecimento pós-estampagem utilizado (1 min.) mostrou ser suficiente para que o processo de desmoldagem ocorresse sem dificuldade, uma vez que este tempo não está associado a qualquer perda de qualidade das amostras produzidas;
- A etapa de consolidação dos *blanks* tem maior influência na qualidade final do produto estampado do que a fase de estampagem
- Em trabalhos posteriores, a utilização de tensões de *blank-holder* inferiores a 20N é aconselhável uma vez que o conjunto de soluções ótimas está centrado no valor mínimo deste *input*;

Por fim, chegou-se aos valores ótimos das variáveis do processo de estampagem a quente, que são os seguintes:

- Temperatura do *blank* = 271°C;
- Tensão do *blank-holder* = 20 N;
- Temperatura do molde = 75°C;
- Pressão de fecho = 17 bar.

4.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A realização da presente dissertação deixa em aberto a oportunidade de realização de diferentes trabalhos futuros, focados nos seguintes pontos:

- Comprovação dos resultados obtidos com ensaios de cariz mecânico;
- Aumento das dimensões da matriz para a obtenção de maior confiabilidade dos resultados;
- Estudo de geometrias mais complexas aplicadas a componentes de estampagem a quente;
- Otimização da janela de processamento de outros processos de cariz industrial que tenham por base a utilização de materiais compósitos de matriz termoplástica reforçados por fibra contínua (ex. enrolamento filamentar);
- Confirmação empírica dos resultados obtidos e posterior otimização-fina da janela de processamento através de um desenho de experiências em torno da solução ótima obtida neste estudo;
- Compreensão do comportamento inter-camadas dos laminados compósitos durante e após o processo de estampagem a quente.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Ventura, A.M.F.J.C. and T.d. Materiais, *Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas*. 2009. **21**(3-4): p. 10-19.
2. Patel, M., et al., *Lightweight composite materials for automotive-a review*. 2018. **1**(2500): p. 151.
3. Burande, S.W. and D.V. Bhope, *Review on material selection, tailoring of material properties and ageing of composites with special reference to applicability in automotive suspension*. Materials Today: Proceedings, 2020.
4. Amanatidis, G. and S. Randic, *The European Parliament's carbon footprint*.
5. Gryparis, E., et al., *Electricity demand and carbon emission in power generation under high penetration of electric vehicles. A European Union perspective*. Energy Reports, 2020. **6**: p. 475-486.
6. Biron, M., *Thermoplastics and thermoplastic composites*. 2018: William Andrew.
7. Gibson, R.F., *Principles of composite material mechanics*. 2016: CRC press.
8. Antunes, R.A. and M.C.L. de Oliveira, *Materials selection for hot stamped automotive body parts: An application of the Ashby approach based on the strain hardening exponent and stacking fault energy of materials*. Materials & Design, 2014. **63**: p. 247-256.
9. Callister, W.D., *Materials science and engineering an introduction*. 2007: John Wiley.
10. Gardyński, L., et al., *Research of composite materials used in the construction of vehicle bodywork*. 2018. **12**.
11. Mallick, P.K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 2007: CRC press.
12. Dhakal, H. and S.O. Ismail, *Sustainable Composites for Lightweight Applications*. 2020.
13. Clyne, T. and D. Hull, *An introduction to composite materials*. 2019: Cambridge university press.
14. De Moura, M., A. Magalhães, and A.B. Morais, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2009: Publindústria.
15. Anandakumar, P., M.V. Timmaraju, and R. Velmurugan, *Development of efficient short/continuous fiber thermoplastic composite automobile suspension upper control arm*. Materials Today: Proceedings, 2020.
16. Mallick, P., *Processing of Polymer Matrix Composites: Processing and Applications*. 2017: CRC Press.
17. Chawla, K.K., *Composite materials: science and engineering*. 2012: Springer Science & Business Media.
18. Biron, M., *Thermosets and composites: material selection, applications, manufacturing and cost analysis*. 2013: Elsevier.

19. Lee, S.M., *Handbook of composite reinforcements*. 1992: John Wiley & Sons.
20. Park, S.-J., *Carbon fibers*. Springer Series in Materials Science, 2015. **210**.
21. Kar, K.K., *Composite materials: processing, applications, characterizations*. 2016: Springer.
22. Bhatt, P. and A.J.M.S.R.I. Goe, *Carbon fibres: production, properties and potential use*. 2017. **14**(1): p. 52-57.
23. Chen, J.Y., *Activated carbon fiber and textiles*. 2016: Woodhead Publishing.
24. Cao, C., et al., *Strong, conductive aramid fiber functionalized by graphene*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021. **140**: p. 106161.
25. Lin, G., et al., *Combined treatments of fiber surface etching/silane-coupling for enhanced mechanical strength of aramid fiber-reinforced rubber blends*. *Materials Chemistry and Physics*, 2020. **255**: p. 123486.
26. Agarwal, B.D., L.J. Broutman, and K. Chandrashekhara, *Analysis and performance of fiber composites*. 2017: John Wiley & Sons.
27. Advani, S.G. and K.-T. Hsiao, *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. 2012: Elsevier.
28. Awais, H., et al., *Environmental benign natural fibre reinforced thermoplastic composites: A review*. 2020: p. 100082.
29. Biron, M., *Chapter 9 - Future Prospects for Thermoplastics and Thermoplastic Composites*, in *Thermoplastics and Thermoplastic Composites (Third Edition)*, M. Biron, Editor. 2018, William Andrew Publishing. p. 1083-1126.
30. Mallick, P.K., *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles*. 2020: Woodhead publishing.
31. Resins, E. *Why Thermoplastic Composites Are Hot in Automotive*. 2014 Janeiro, 2021]; Available from: <https://www.ptonline.com/articles/why-thermoplastic-composites-are-hot-in-automotive>.
32. Today, P. *Dashboard retainer boasts industry-leading thinwalling*. 2014 Janeiro, 2021]; Available from: <https://www.plasticstoday.com/dashboard-retainer-boasts-industry-leading-thinwalling>.
33. Ramos, F.J.H.T.V., et al., *Eco-friendly recycled polypropylene matrix composites incorporated with geopolymers concrete waste particles*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020. **9**(3): p. 3084-3090.
34. Choudhari, D.S. and V.J. Kakhandki, *Comprehensive study and analysis of mechanical properties of chopped carbon fibre reinforced nylon 66 composite materials*. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
35. Xiao, S.Y., S.D. Shanyi Du, and Z. Litong Zhang, *Composite Materials Engineering, Volume 1*. 2006, Chemical Industry Press.
36. Liu, X., et al., *Non-covalent modification of boron nitride nanoparticle-reinforced PEEK composite: Thermally conductive, interfacial, and mechanical properties*. *Polymer*, 2020. **203**: p. 122763.
37. Khalil, Y.P. *Specialized Thermoplastics in an Evolving Global Market*. 2016 março, 2021]; Available from: <https://insights.globalspec.com/article/3540/specialized-thermoplastics-in-an-evolving-global-market>.
38. Vaidya, U.K. and K.K. Chawla, *Processing of fibre reinforced thermoplastic composites*. *International Materials Reviews*, 2008. **53**(4): p. 185-218.

39. Pusch, J. and B. Wohlmann, *Chapter 2 - Carbon Fibers*, in *Inorganic and Composite Fibers*, B. Mahltig and Y. Kyosev, Editors. 2018, Woodhead Publishing. p. 31-51.
40. Madara, S.R., et al., *Modelling of surface roughness in abrasive waterjet cutting of Kevlar 49 composite using artificial neural network*. Materials Today: Proceedings, 2020.
41. Chhetri, S. and H. Bougherara, *A comprehensive review on surface modification of UHMWPE fiber and interfacial properties*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021. **140**: p. 106146.
42. Shanmugam, L., X. Feng, and J. Yang, *Enhanced interphase between thermoplastic matrix and UHMWPE fiber sized with CNT-modified polydopamine coating*. Composites Science and Technology, 2019. **174**: p. 212-220.
43. Bhatnagar, A., *Lightweight ballistic composites: military and law-enforcement applications*. 2016: Woodhead Publishing.
44. Barbero, E.J., *Introduction to composite materials design*. 2017: CRC press.
45. Ahmad, F., N. Yuvaraj, and P.K.J.P.C. Bajpai, *Effect of reinforcement architecture on the macroscopic mechanical properties of fibrous polymer composites: A review*. 2020. **41**(6): p. 2518-2534.
46. Minsch, N., et al., *Analysis of Filament Winding Processes and Potential Equipment Technologies*. Procedia CIRP, 2017. **66**: p. 125-130.
47. Mack, J. and R. Schledjewski, *7 - Filament winding process in thermoplastics*, in *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, S.G. Advani and K.-T. Hsiao, Editors. 2012, Woodhead Publishing. p. 182-208.
48. Bajpai, P.K. and I. Singh, *Reinforced Polymer Composites: Processing, Characterization and Post Life Cycle Assessment*. 2019: John Wiley & Sons.
49. Boisse, P., *Advances in composites manufacturing and process design*. 2015: Woodhead Publishing.
50. Yassin, K. and M. Hojjati, *Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods: A review*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2017. **31**(12): p. 1676-1725.
51. Lukaszewicz, D.H.J.A., C. Ward, and K.D. Potter, *The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future*. Composites Part B: Engineering, 2012. **43**(3): p. 997-1009.
52. Black, S. *Plant Tour: Fraunhofer ICT, Pfinztal, Germany*. 2017 Abril, 2021]; Available from: [https://www.compositesworld.com/articles/plant-tour-fraunhofer-ict-pfinztal-germany-\(2\)](https://www.compositesworld.com/articles/plant-tour-fraunhofer-ict-pfinztal-germany-(2)).
53. Velu, R., et al., *Experimental investigation on fabrication of thermoset prepreg composites using automated fibre placement process and 3D printed substrate*. Procedia CIRP, 2019. **85**: p. 296-301.
54. Dhinakaran, V., et al., *Review on study of thermosetting and thermoplastic materials in the automated fiber placement process*. Materials Today: Proceedings, 2020. **27**: p. 812-815.
55. Sun, S., et al., *Multiscale collaborative process optimization method for automated fiber placement*. Composite Structures, 2021. **259**: p. 113215.
56. Oromiehie, E., et al., *Automated fibre placement based composite structures: Review on the defects, impacts and inspections techniques*. Composite Structures, 2019. **224**: p. 110987.

57. Slange, T., et al., *Influence of preconsolidation on consolidation quality after stamp forming of C/PEEK composites*. Vol. 1769. 2016. 170022.
58. Reynolds, N., *The development of an augmented stamp-forming process for high-volume production of thermoplastic composite automotive structures*.
59. Slange, T.K., *Rapid Manufacturing of Tailored Thermoplastic Composites by Automated Lay-up and Stamp Forming: A Study on the Consolidation Mechanisms*. 2019.
60. Group, D.M. *Thermoplastic Composites and Stamping*. 2021 Janeiro, 2021]; Available from: <https://www.dedienne.com/en/page/technologies/thermoplastic-composites-and-stamping>.
61. Haanappel, S.P., *Forming of UD fibre reinforced thermoplastics*. 2013: University of Twente.
62. Slange, T.K., et al., *Towards the combination of automated lay-up and stamp forming for consolidation of tailored composite components*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019. **119**: p. 165-175.
63. Mattner, T., et al., *High-Speed Forming of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics*. *Applied Composite Materials*, 2020. **27**(1): p. 37-54.
64. Jiang, B., et al., *Molecular Dynamics Simulation on the Interfacial Behavior of Over-Molded Hybrid Fiber Reinforced Thermoplastic Composites*. 2020. **12**(6): p. 1270.
65. Suresh, S. and V.S.S.J.P. Kumar, *Investigation on influence of stamp forming parameters on formability of thermoplastic composite*. 2018. **28**(5): p. 422-432.
66. Khanjanpour, M.H. and A.A. Javadi, *Optimization of a Horizontal Axis Tidal (HAT) turbine for powering a Reverse Osmosis (RO) desalination system using Computational Fluid Dynamics (CFD) and Taguchi method*. *Energy Conversion and Management*, 2021. **231**: p. 113833.
67. Ruefer, H., *Living without mathematical statistics: accurate analysis, diagnosis, and prognosis based on the Taguchi method*. 2018: Springer.
68. Lopes, A., et al., *DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS NA FURAÇÃO DO TECIDO ÓSSEO COM RECURSO AO MÉTODO DE TAGUCHI*. 2016. **27**: p. 49-56.
69. Liu, W., et al., *Quantifying the contributions of structural factors on runoff water quality from green roofs and optimizing assembled combinations using Taguchi method*. *Journal of Hydrology*, 2021. **593**: p. 125864.
70. Domingues, J.R., F. Oliveira, and L. Esperto. *Desenho de experiências-estratégicas*. in *7º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, APAET*. 2008. Congresso Nacional de Mecânica Experimental, APAET.
71. Roy, R.K., *A primer on the Taguchi method*. 2010: Society of Manufacturing Engineers.
72. Rama Rao, S., *Application of Taguchi methods and ANOVA in optimization of process parameters for metal removal rate in electrochemical machining of Al/5%SiC composites*. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012. **2**: p. 192-197.
73. Mustapha, A.N., et al., *Taguchi and ANOVA analysis for the optimization of the microencapsulation of a volatile phase change material*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021.

74. Arun. *ANOVA: What is Analysis of Variance, Examples, Types and Assumptions*. 2020 novembro, 2021]; Available from: <https://dacg.in/2020/03/27/anova-analysis-variance-examples-types-assumptions/>.
75. Tanco, M., et al., *Dissecting DoE Software*. Six Sigma Forum Magazine, 2008. 7(3): p. 25.
76. Inc., S.-E. *Design-Expert version 13*. 2021 Abril, 2021]; Available from: <https://www.statease.com/software/design-expert/>.
77. Inc., S.-E. *What's new*. 2021 Abril, 2021]; Available from: <https://www.statease.com/docs/v13/whats-new/>.
78. Cimbala, J.M.J.P.S.U., *Taguchi orthogonal arrays*. 2014.
79. Composites, T.A. *Toray Cetex® TC910 PA6*. 2017 agosto, 2021]; Available from: https://www.toraytac.com/media/694245aa-3765-43b4-a2cd-8cf76e4aeec5/lmhIVg/TAC/Documents/Data_sheets/Thermoplastic/UD%20tapes,%20prepregs%20and%20laminates/Toray-Cetex-TC910_PA6_PDS.pdf.
80. Harrison, P., et al., *Induction melt thermoforming of advanced multi-axial thermoplastic composite laminates*. Journal of Manufacturing Processes, 2020. 60: p. 673-683.
81. Matsuo, T., M. Hojo, and K. Kageyama. *Influence of gripping condition and matrix type on tensile properties of unidirectional carbon fiber reinforced thermoplastic composites*. in *ICCM-21 conference*. 2017.
82. *ASTM D3171-15, Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials*. 2015, American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA. p. 11.

ANEXOS

6 ANEXOS

6.1 ANEXO1

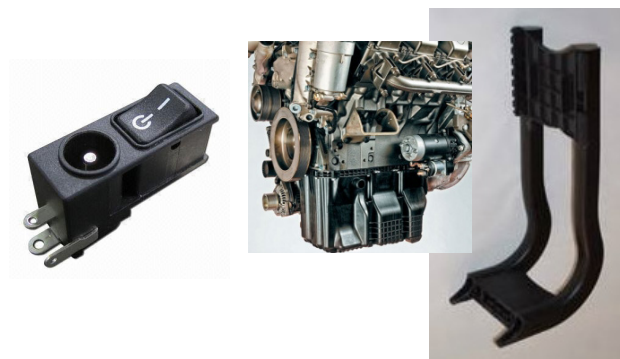
PRODUCT DATA SHEET

DESCRIPTION

Toray Cetex® TC910 is a thermoplastic composite using a polyamide 6 (PA6) matrix resin. This product provides excellent mechanical performance at a good price-to-weight ratio. It features high strength and wear resistance and performs well at elevated temperatures. TC910 is also resistant to solvents. As a result of these attributes, Toray Cetex® TC910 is commonly used in a variety of automotive and transportation applications. Secondary details in the final part may be injection overmolded using injection-grade polyamides. Toray Cetex® TC910 is available in glass or carbon reinforced UD tapes.

FEATURES

- ▶ Good resistance to solvents
- ▶ Excellent balance of strength and impact resistance
- ▶ Moldable and formable
- ▶ Excellent temperature resistance and strength makes it ideal for housings and under the hood applications
- ▶ Excellent impact and solvent resistance
- ▶ Good elevated temperature resistance



PRODUCT TYPE

Nylon 6-based Thermoplastic Composite

TYPICAL NEAT RESIN PROPERTIES

Heat Deflection Temperature	200°C (392°F)
-----------------------------	---------------

TYPICAL APPLICATIONS

- ▶ Automotive structure
- ▶ Under the hood applications
- ▶ Replacement for highly loaded injection molded parts

SHELF LIFE

Indefinite at 25°C (77°F)



Contact us for more information:

North America/Asia/Pacific

e explore@toraytac-usa.com

t +1 408 465 8500

Europe/Middle East/Africa

e explore@toraytac-europe.com

t +44 (0)1773 530899

PRODUCT DATA SHEET

MECHANICAL PROPERTIES

Property	Condition	Method	Typical Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	900 MPa	131 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	30 GPa	4.4 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	ASTM D 790	1050 MPa	152 ksi
Flexural Modulus 0°	RTD	ASTM D 790	29 GPa	4.2 Msi
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D 3410	345 MPa	50 ksi
Short Beam Shear ILSS	RTD	ASTM D 2344	42 MPa	6.1 ksi

Toray Cetex® TC910 Nylon 6 Fiberglass Uni-directional Tape
 Resin content by weight at 40%. Composite density 1.73 g/cm³.
 Tape width 166 mm (6.5"). Tape thickness 0.25 mm (0.010").
 Recommended processing temperature is 249–271°C (480–520°F)

MECHANICAL PROPERTIES

Property	Condition	Method	Typical Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	1900 MPa	276 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	100 GPa	14.5 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	ASTM D 790	950 MPa	138 ksi
Flexural Modulus 0°	RTD	ASTM D 790	97 GPa	14.1 Msi
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D 3410	375 MPa	54 ksi
Short Beam Shear ILSS	RTD	ASTM D 2344	43 MPa	6.2 ksi

Toray Cetex® TC910 Nylon 6 Carbon Fiber Uni-directional Tape
 Resin content by weight at 40%. Composite density 1.45 g/cm³.
 Tape width 166 mm (6.5"). Tape thickness 0.16 mm (0.007").
 Recommended processing temperature is 249–271°C (480–520°F)

Revised 07/2019

TORAY_TC910_PDS_v3.0_2019-07-12 Page 2/2

© 2019. All data given is based on representative samples of the materials in question. Since the method and circumstances under which these materials are processed and tested are key to their performance, and Toray Advanced Composites has no assurance of how its customers will use the material, the corporation cannot guarantee these properties. Toray®, (Toray) AmberTool®, (Toray) Cetex®, (Toray) MicroPly™, and all other related characters, logos, and trade names are claims and/or registered trademarks of Toray Industries Inc. and/or its subsidiary companies in one or more countries. Use of trademarks, trade names, and other IP rights of Toray Industries Inc. without prior written approval by such is strictly prohibited.